بهنگام‌سازی زمان واقعی در مدل پیش‌بینی سیل با بکارگیری روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE)[1]
بخش اول: متدولوژی

بهرام ثقفیان[1*]، علی حیدری[2]، رضا مکنون[3]

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- بهنگام‌سازی زمان واقعی مدلهای هیدرولوژیک در سیستمهای پیش‌بینی سیل، امری اجتناب ناپذیر است. پارامترهـای مدلهای ریاضی با استفاده از داده‌های دبی و تراز مشاهده‌ای زمان واقعی در سیستم تله‌متری، بهنگام می‌شوند. در این مقاله یک متدولوژی جدید و متفاوت با روشهای مرسوم بهنگام‌سازی ارائه می‌شود. در این متدولوژی از تلفیق روش مونت کارلو و تئوری بیز[2] برای بهنگام‌سازی پارامترهای مدل بارش– رواناب در زمان واقعی استفاده می‌شود. مبنای این روش، استفاده از تعدادی متناهی از پارامترهای تصادفی تولیدی و تعیین محدودهٔ پیش‌بینی‌ها بر اساس نتایج شبیه‌سازی از پارامترهای مدل بارش– رواناب است. بدین منظور با استفاده از دبی مشاهده‌ای در زمان واقعی و دبی محاسبه‌ای، تشابهات مشروط[3] تعیین و از آن برای تعیین تشابهات پیشین و پسین استفاده می‌شود. این روند با ارسال اطلاعات جدید هواشناسی و هیدرومتری در هر گام زمانی تکرار می‌شود. در این روش توزیع احتمالاتی دبی سیل در هر گام زمانی با استفاده از نتایج تعدادی متناهی از پارامترهای مدل بارش– رواناب تعیین می‌شود. زمان پیش هشدار[4] در روش پیشنهادی، فاصله زمانی بین پایدار شدن توزیع احتمالاتی دبی اوج پیش‌بینی و زمان واقعی وقوع آن است که در متدولوژی جدید، انعطاف‌پذیری تغییر پارامترهای مدل در مقایسه با روشهای مرسوم قابل توجه است.

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

1- مقدمه

پیش‌بینی سیل با زمان پیش‌هشدار کافی، یکی از چالشهای روز در مبحث هیدرولوژی است. روشهای متعددی مانند فضای حالت-مکان[5] در این زمینه بکار برده شده است. (Fread, Lewis, 1994; Day, 1985; Kitanidis, Bras, 1980).

یکی از روشهای شناخته شده در این زمینه، فیلتر بسط یافته کالمن است که در آن خطی‌سازی برای توابع غیر خطی نیر گنجانده شده است. آخرین دستاورد در روشهای فضای حالت، با عنوان روش فیلتر بسط یافته کالمن (EKF)[6] در سیستمهای بزرگ و پیچیده بکار برده شده است (Evensen, 1994).

1. Generalized Likelhood Uncertainty Estimation
2. Bayes
3. Conditional Likelihood
4. Lead Time
5. State-Space
6. Ensemble Kalman Filter

پایه محاسباتی EKF بر کوواریانس خطاها همراه با توابع بازگشتی[1] استوار است که در آن معالادت پایه مدل بارش– رواناب برای توسعه مدل بهنگام‌سازی زمان واقعی، استفاده می‌شود.

در رابطه با پیش‌بینی، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از منابع مختلف ایجاد خطا، موجب افزایش ضریب اطمینان نتایج می‌شود. در این زمینه، عدم قطعیت ناشی از خطای اطلاعات ورودی در برخی از مدلهای پیش‌بینی سیل نظیر ESP[2] (Day, 1985) در نظر گرفته شده است. در این مدلها سری زمانی داده‌های هواشناسی که در زمانهای آتی می‌تواند اتفاق بیافتد، به عنوان داده‌های محتمل ورودی در نظر گرفته شده و محدودهٔ پیش‌بینی‌ها بر اساس گروه داده‌های ورودی تعیین می‌شود. با اعمال عدم قطعیت داده‌های ورودی در زمان واقعی وقوع سیل، عدم قطعیت ناشی از خطای براورد پارامترهای مدل بر اساس داده‌های تاریخی به ندرت در بهنگام‌سازی پیش‌بینی منظور شده است. بررسیهای عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدلها نیز بیشتر به واسنجی مدلها بر اساس داده‌های تاریخی محدود می‌شود. در این بررسیها روش مونت کارلو برای بررسی عدم قطعیت مدلهای بارش– رواناب به‌کار می‌رود. با افزودن قابلیت اصلاح پارامترها با اطلاعات جدید، روشهای متعددی بر مبنای مونت کارلو نظیر GLUE و MCMC[3] توسعه یافته است. (Bate, Campbell, Beven,Binley,1992; Kuczara, Parent, Campbell, et al, 1999; 2001; 1998)

در روشهای حاصل از بکارگیری مفهوم مونت کارلو، به خلاف روشهای فضای حالت، اصلاح پیش‌بینی‌ها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی و مقایسه آن با داده‌های مشاهده‌ای انجام می‌شود. مقایسه بر مبنای توابع هدف و با توجه به میزان عدم انطباق هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای انجام می‌شود.

واسنجی مدلهای هیدرولوژیکی با داده‌های تاریخی به علت ساده‌سازی ساختار آنها و خطا در داده‌های ورودی ثبت شده، همواره با عدم قطعیت همراه است. این عدم قطعیتها سبب می‌شوند که یافتن ساختار مدل یا گروهی از پارامترهای بهینه منحصر به فرد در مرحله واسنجی غیر ممکن شود. (Beven, Freer, 2002; Beven, Binley, 1992).

حیدری و همکاران (1383) واسنجی تاریخی یک مدل بارش– رواناب توزیعی را به ترتیب با استفاده از روش مونت کارلو و روش تلفیقی مونت کارلو و تئوری بیز در حوضه آبریز قره‌سو مورد آزمون قرار دادند که در آن عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش– رواناب کمّی گردید. در این تحقیق، روش فوق برای تعیین توزیع احتمالاتی هر یک از پارامترهای مدل با استفاده از سیلابهای تاریخی ثبت شده به کار رفت و به ازای سیلابهای جدید ثبت شده، این توزیع با استفاده از تئوری بیز اصلاح شد.

در سیستم‌های پیش‌بینی سیل به علت استفاده بهنگام از داده‌های ثبت شده در سیستم تله‌متری، عدم قطعیتها می‌توانند به نحو چشم‌گیری افزایش یابند. برای کاهش عدم قطعیت و خطاهای پیش‌بینی در این سیستمها از دبی و تراز ثبت شده در سرشاخه‌های حوضه به منظور بهنگام کردن پارامترهای مدلهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این بخش از سسیتم پیش‌بینی سیل، بهنگام‌سازی زمان واقعی را تشکیل می‌دهد. روشهایی که برای کاهش عدم قطعیت پارامترها و داده‌های ورودی مدلهای هیدرولوژیکی به‌کار برده شده‌اند معمولاً پایه مونت کارلو دارند. در این روشها به جای گروهی از پارامترهای مدل، پارامترهای بیشماری مبنا قرار می‌گیرد که در آن محدوده تغییرات دبی یا حتی توزیع احتمالاتی آن، تعیین کننده محدوده پیش‌بینی مدل است.

در این مقاله روش تلفیقی مونت کارلو و تئوری بیز با عنوان GLUE به منظور بهنگام‌سازی زمان واقعی سیل به‌کار می‌رود. این روش که امکان یکسانی نتایج را در

1. Recursive
2. Ensenble Stream Flow Prediction
3. Marcove Chaine Monte Carlo

ساختارهای مختلف مدل یا گروه‌های پارامترهای مختلف مدل هیدرولوژیکی در نظر می‌گیرد، برای اولین بار توسط Beven, Binley (1992) پیشنهاد شد، اما سابقه آن به شناخت بیشتر محدودیتهای ساختاری مدلهای هیدرولوژیکی شبیه‌سازی بارش– رواناب باز می‌گردد (Grayson, 1992; Beven, 1985). تاکنون این روش در واسنجی مدل بارش– رواناب و سایر مدلهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر اساس داده‌های ثبت شده به‌کار رفته، اما کارایی آن در واسنجی زمان واقعی مدلهای پیش‌بینی سیل بررسی نشده و این کار هدف مقالهٔ حاضر است. در واقع به‌جای استفاده از روشهای مرسوم بهنگام‌سازی زمان واقعی پیش‌بینی سیل - که عمدتاً بر حل توابع برگشتی استوارند (نظیر فیلتر کالمن)- یک روش مبتنی بر مونت کارلو بدین منظور استفاده می‌شود. متدولوژی پیشنهادی در این بخش از مقاله و نتایج آن در بخش دوم مقاله ارائه می‌شود.

2- مدل بارش-رواناب

در این مقاله به منظور مدلسازی بارش-رواناب از روش توزیعی-مفهومی استفاده شد و برنامه کامپیوتری آن توسعه یافت. در مدلسازی توزیعی، نگرش نسبتاً جدیدی وجود دارد که به آن مادکلارک گفته می‌شود. روش مادکلارک روشی مفهومی از نوع ذخیره‌ای است که توزیع مکانی را نیز در نظر می‌گیرد. این روش در سالهای اخیر توسعه یافته و اصول محاسباتی آن بر اساس تغییرات زمان حرکت رواناب از مناطق مختلف حوضه تا خروجی آن، شکل می‌گیرد.

(Peters, Easton, 1996; Kull, Feldman, 1998)

مشابه روش هیدروگراف واحد کلارک، محاسبات رواناب در روش مادکلارک بر اساس انتقال و ذخیره حوضه انجام می‌شود. انتقال توسط مدل زمان– مساحت در قالب شبکه مربعی حوضه تعیین و سپس اثر ذخیره‌ای حوضه با مدل مخزن خطی محاسبه می‌شود. برای هر مربع شبکه، پس از تعیین فاصله تا خروجی حوضه، زمان انتقال رواناب از هر مربع شبکه به خروجی حوضه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{cell} = t_c . d_{cell} / d_{\max} \qquad (1)$$

که در آن t_{cell} زمان حرکت رواناب از هر مربع تا خروجی حوضه بر حسب ساعت، d_{cell} فاصله پیمایش رواناب از هر مربع تا خروجی حوضه، t_c زمان تمرکز حوضه برحسب ساعت و d_{max} فاصله پیمایش برای مربعی که بیشترین فاصله از خروجی حوضه را دارد، می‌باشد.

در این روش رواناب هر مربع در هر گام زمانی، از حاصل ضرب مساحت آن در شدت بارش مؤثر تعیین می‌شود. شدت مؤثر بارش نیز پس از تعیین مقدار نفوذ هر مربع از کل بارش متوسط آن، محاسبه می‌شود. گروه زمانی رواناب سطحی هر مربع با توجه به زمان پیمایش تعیین می‌شود و ترکیب آنها هیدروگراف خروجی حوضه را بدون در نظر گرفتن اثر ذخیره‌ای به‌دست می‌دهد. سپس با روندیابی هیدروگراف حاصل در مخزن خطی، هیدروگراف جریان خروجی حوضه تعیین می‌شود (حیدری، 1381).

برای شبیه‌سازی سهم حجم رواناب از بارش توأم برف و باران، از روش نفوذ نمایی پیشنهادی بسته نرم‌افزاری HEC (HEC, 1999) استفاده شده که در آن محاسبه نفوذ ناشی از ذوب برف نیز امکان‌پذیر است. در محاسبه حجم رواناب به روش نفوذ نمایی، چهار رابطه متشکل از شش پارامتر به صورت زیر وجود دارد که دو رابطه (3) و (4) به ترتیب برای محاسبه نفوذ حاصل از بارش باران و ذوب برف در هر گام زمانی به‌کار می‌رود:

$$\mathrm{AL} = (\mathrm{AK} + 0.2\,DL(1 - \frac{C}{DL})^2)\mathrm{P}^{\mathrm{ER}} \quad C \le DL \qquad (2)$$

$$AK = \frac{SR}{RL^{0.1C}} \qquad \text{بارش} \qquad (3)$$

$$AK = \frac{SS}{RK^{0.1C}} \qquad \text{ذوب برف} \qquad (4)$$

که در آن AK ضریب نفوذ در شروع گام زمانی

محاسبات، AL نفوذ پتانسیل بر حسب (mm/hr)، C نفوذ تجمعی بر حسب (mm)، P عمق بارش در هر گام زمانی بر حسب (mm)، SR بر حسب (mm/hr)، DL, RL, ER برحسب (mm) پارامترهای نفوذ بارش باران و RK, SS بر حسب (mm/hr) پارامترهای نفوذ ذوب برف است. پارامترهای ER، RL، RK بی بعد است.

به منظور تعیین هیدروگراف خروجی، ابتدا هیدروگراف خروجی حوضه بدون اعمال اثر ذخیره‌ای حوضه بر اساس مجموع هیدروگرافهای حاصل از هر مربع محاسبه و سپس هیدروگراف حوضه در مخزن خطی، به صورت زیر روندیابی می‌شود:

$$C_a=\Delta t/(R+0.5\Delta t) \quad (5)$$

$$C_b=1-C_a \quad (6)$$

$$O_i=C_a(E_i.A_{cell})+C_b.O_{i-1} \quad (7)$$

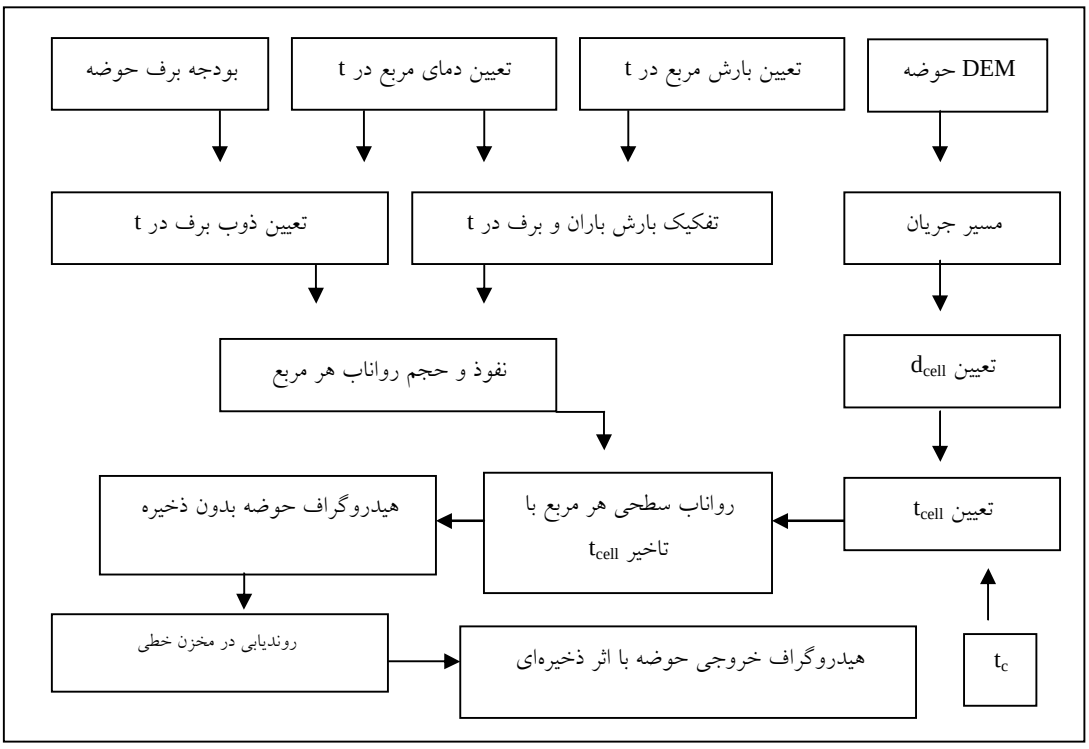
$$Out_i=(O_{i-1}+O_i)/2 \quad (8)$$

که در آن A_{cell} مساحت هر مربع برحسب متر مربع، C_a و C_b ضرایب روندیابی ذخیره‌ای، E_i نفوذ در زمان i به متر، R ضریب ذخیره حوضه به ساعت، O_i دبی محاسبه‌ای در گام زمانی i، O_{i-1} دبی محاسبه‌ای در گام زمانی i-1، O_t دبی مشاهده‌ای در زمان t، Out_i دبی متوسط محاسبه‌ای خروجی از حوضه در گام زمانی i است. دبی بر حسب متر مکعب در ثانیه اندازه‌گیری می‌شود.

بارش متوسط حوضه که بر اساس آن بارش هر مربع تعیین می‌شود، با استفاده از روش کریجینگ تعیین می‌گردد که در آن از حداقل‌سازی خطا در نقاط مشاهده‌ای (ایستگاه‌های باران‌سنجی) استفاده می‌شود. مراحل شبیه‌سازی بارش– رواناب در مدل توسعه یافته به روش مادکلارک در شکل 1 نشان داده شده است.

2- مفاهیم روش GLUE

همواره برای تعیین پارامترهای مدلهای ریاضی، واسنجی مدل براساس داده‌های تاریخی انجام شده و مجموعه‌ای از پارامترهای منحصر به فرد برای مدل حاصل می‌شود.



شکل 1 مراحل محاسباتی مدل بارش– رواناب به روش مادکلارک

در این فرایند چنانچه دوره واسنجی تغییر کند، پارامترهای بهینه مدل نیز تغییر خواهد کرد. یکی از روشهای شناخت عدم قطعیت پارامترهای مدل، فرض عدم وجود پارامترهای منحصر به فرد یا ساختار بهینه برای مدل است. با این فرض می‌توان محدوده‌ای را برای پارامترهای مدل در نظر گرفت و ترکیب مختلف پارامترها را برای یک ساختار مشخص مدل، مورد آزمون قرار داد. بدیهی است در برخی موارد به ازای محدودهٔ وسیعی از یک پارامتر، نتایج یکسانی حاصل می‌شود. این امر اهمیت ترکیبات مختلف پارامترها و فرض عدم وجود گروهی از پارامترهای بهینه منحصر به فرد را دو چندان می‌سازد. چنانچه مدل بهینه منحصر به فرد وجود نداشته باشد، امکان رده‌بندی گروهی از پارامترهای مدل، با مقایسه نتایج وجود دارد. در این روش، به هر گروه از پارامترها، یک مدل اطلاق می‌شود. در رابطه با رده‌بندی، تعدادی از مدلها (گروه پارامترها) قطعاً رد خواهند شد (مدلهای مردود[1]). معیار مقایسه نتایج مدلهای مختلف، تابع نیکویی برازش یا به عبارت دیگر تشابهات مدلها است. بدیهی است این معیار می‌تواند وابسته به دوره[2] زمانی واسنجی باشد و با تغییر دوره زمانی آن، رتبه‌بندی این مدلها نیز تغییر یابد؛ به‌طوری که بهترین مدل در اولین دوره، لزوماً برای دوره دوم بهترین نیست. در روش GLUE مدلهای قابل قبول بر اساس تشابهات محاسبه شده از دوره واسنجی، وزن‌دهی شده و این وزنها برای تعیین توزیع تجـمعی پیش‌بینی‌ها استفاده می‌شوند که بدین ترتیب عدم قطعیتهای پیش‌بینی، کمینه می‌شود. باید تاکید شود که در روشهای بررسی عدم قطعیت مدلهای هیدرولوژیکی، پارامترها مستقل از یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه همیشه به صورت گروهی با آنها برخورد می‌شود.

با توجه به وجود عدم قطـعیت‌های متعـدد در پارامترهای مدلها و داده‌های ورودی، پیش‌بینی‌ها باید بیانگر محدوده‌های اطمینان یا توزیع احتمالاتی متغیر پیش‌بینی باشد. در روش GLUE محدودسازی عدم قطعیت پارامترها با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و بکارگیری تئوری بیز امکان‌پذیر است. در این روش با دسترسی به دبی مشاهده‌ای، بهنگام‌سازی وزنهای حاصل از تشابهات پیشین انجام می‌شود. سپس توزیع پیشین تشابه توسط تشابهات مشروط داده‌های مشاهده‌ای اصلاح شده و توزیع تشابه بهنگام یا پسین را شکل می‌دهد. در این روش تمایل، بیشتر به کاهش تعداد مدلهای قابل قبول است. بدین معنا که با افزایش داده‌ها، ناحیه مورد قبول فضای پارامتری کاهش یافته و مدلهای با انطباق ضعیف از مجموعه جوابها حذف می‌شود. با کنار گذاشتن مدلهای نامناسب، توزیع احتمالی پیش‌بینی‌ها در هرگام زمانی بر اساس دبی‌های حاصل از شبیه‌سازی مدلهای قابل قبول و وزنهای ناشی از تشابهات تعیین می‌شود. با وجود توزیع احتمالاتی پیش‌بینی در هر گام زمانی، محدوده اطمینان تغییرات را می‌توان مشخص کرد.

3- به‌کارگیری GLUE در بهنگام‌سازی زمان واقعی

بهنگام‌سازی زمان واقعی در این مقاله بر اساس روش GLUE انجام شد. این روش عمدتاً در شبیه‌سازی و واسنجی مدل بارش-رواناب در دوره تاریخی داده‌های ثبت شده بکار رفته است (Beven, 2002; Freer, Beven; 1996).

حیدری و همکاران (1384) این روش را برای واسنجی و بررسی عدم قطعیت پارامترهای بارش-رواناب بکار بردند. بهنگام‌سازی توسط روش GLUE مستقل از نوع معادلات پایه مدل بارش-رواناب انجام می‌شود و به خطاهای حاصل در اجراهای متعدد با گروه پارامترهای مختلف در شبیه‌سازی مونت کارلو، وابسته است. بنابراین هیچ محدودیتی در کاربرد این روش در بهنگام‌سازی مدلهای بارش– رواناب مختلف وجود ندارد و تنها محدودیت آن

1. Nonbehavioral
2. Period

می‌تواند مربوط به زمان اجرای مدل حاصل از تعداد زیاد گروه پارامترهای مختلف در روش مونت کارلو باشد. این روش در بهنگام‌سازی زمان واقعی در سیستمهای پیش‌بینی سیل در این مقاله بکار رفته است.

4- پیاده‌سازی روش GLUE

برای پیاده‌سازی این روش مراحل پیشنهادی زیر لازم است:

الف- اولین گام، تعیین محدوده تغییرات هر پارامتر است که بر اساس نتایج واسنجی سیلابهای به وقوع پیوسته تاریخی انجام می‌شود. در روش GLUE تشابهات پیشین[1] برای پارامترهای خارج از این محدوده، صفر در نظر گرفته می‌شود.

ب- در دومین گام، به روشی برای نمونه‌برداری فضای پارامتری نیاز است که در بیشتر موارد این کار توسط شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از توزیع یکنواخت تصادفی در محدودهٔ مشخص پارامترها انجام می‌شود. از آنجا که تابع توزیع احتمالاتی (PDF) تشابهات توسط وزنهای مختص به هر مدل تعریف می‌شود، لذا استفاده از توزیع یکنواخت کاربرد روش را ساده‌تر کرده و امکان بهنگام‌سازی تشابهات را فراهم می‌سازد.

ج- در سومین گام، به تعریف معیار تشابه به عنوان تابع هدف، نیاز است. انتخاب آستانه خاص برای قبول یا رد مدل، براساس این معیار انجام می‌شود. حتی ممکن است بیش از یک تابع هدف حاصل از داده‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد که در این صورت نحوه ترکیب این توابع باید تعیین شود. تئوری بیز چارچوب مناسبی را برای استفاده از این معیارهای تشابه در حالت تشابهات ترکیبی و تشابهات بهنگام شده حاصل از داده‌های مشاهده‌ای فراهم می‌سازد.

برای ارزیابی کاربرد روش GLUE در بهنگام‌سازی زمان واقعی پیش‌بینی سیل، دو روش مختلف مورد آزمون قرار می‌گیرد. در روش اول با عنوان مجزا، دوره‌های زمانی مجزا در طول هیدروگراف سیل تعیین و تابع تشابه بر اساس خطاهای پیش‌بینی در این دوره تعیین می‌شود. در روش دوم به صورت پیوسته دوره‌های زمانی نسبت به ابتدای هیدروگراف تعیین می‌شوند. به منظور آزمودن این دو روش، ابتدا دوره‌های زمانی (مجزا یا پیوسته) در هیدروگراف سیل تعیین و دبی ثبت شده در هر دوره برای تعیین محدوده تغییرات پارامترهای بارش– رواناب و به دنبال آن محدوده پیش‌بینی دبی سیل بکار گرفته می شود. سپس گروه‌های بیشماری از پارامترهای مدل بارش-رواناب- که هر یک، مدل نامیده می‌شوند- در زمان واقعی شبیه‌سازی سیل تولید می‌شود. پس از اجرای مدل بارش-رواناب به ازای هر ترکیب پارامترها و محاسبه معیار تشابه، مدلهای مورد قبول بر اساس معیار تشابه انتخاب شده، تعیین می‌شوند.

5- معیار تشابه

معیار تشابه پیشنهادی در بهنگام‌سازی زمان واقعی تابع وزنی زیر است:

$$w_t = (O_t + Qmean_\tau)/(2 * Qmean_\tau) \quad (9)$$

$$\sigma_i^{\,2} = \frac{\sum_{t=1}^{n} w_t (x_t - \bar{x})^2}{n-1} \quad (10)$$

$$L(\theta_i | Y) = (1 - \frac{\sigma_i^{\,2}}{\sigma_{obs}^{\,2}})^N \quad (11)$$

که در آن t گام زمانی شبیه‌سازی، τ زمان واقعی بهنگام‌سازی، $Qmean_\tau$ متوسط دبی هیدروگراف مشاهده‌ای از زمان شروع تا زمان واقعی τ به m^3/s، O_t دبی مشاهده‌ای در زمان t به m^3/s، w_t وزن مربوط به دبی هیدروگراف در زمان t، x_t خطای محاسبه‌ای حاصل از اختلاف دبی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای هیدروگراف سیل در زمان t به m^3/s، $\bar{x}$ متوسط وزنی خطاها در طول

1. Prior Likelihood

هیدروگراف تا زمان t به m^3/s، σ_i^2 واریانس خطاهای متأثر از وزن دبی هیدروگراف در مدل i تا زمان τ، $L(\theta_i|Y)$ معیار تشابه iامین مدل مشروط بر مشاهدات از شروع هیدروگراف تا زمان t، σ_{obs}^2 واریانس دبی‌های هیدروگراف مشاهده‌ای، n تعداد گامهای زمانی از شروع هیدروگراف تا زمان t و N پارامتر رابطه است که میزان تأثیر آن در تشابهات توسط حیدری و همکاران (1384) ارائه شده است. هر چه مقدار این پارامتر افزایش یابد تعداد مدلهای مورد قبول برای معیار معین رد مدلها، کاهش خواهد یافت. در آزمون روش GLUE برای بهنگام‌سازی زمان واقعی، N برابر یک در نظر گرفته شده است.

در این تابع، نحوه وزن‌دهی به هر خطای محاسبه‌ای در طول زمان هیدروگراف، وابسته به مقدار دبی در آن زمان است. به بیان دیگر چنانچه هیدروگراف سیل به صورت خط فرض شود، وزن یکسانی به دبی‌های هیدروگراف تخصیص می‌یابد و با زنگوله‌ای شدن هیدروگراف، وزن دبی اوج نسبت به پایه افزایش می‌یابد. در واقع این وزنها که به شکل هیدروگراف هر سیل بستگی دارد، سبب افزایش میزان تاثیر دبی اوج در تابع تشابه می‌شوند. بنابراین در بخش اوج هیدروگراف، خطاها، وزن بیشتری نسبت به سایر بخشهای هیدروگراف در محاسبه مقدار تشابه می‌گیرند. هر چه دبی از اوج به دبی پایه در دو شاخه افزایشی و فروکش نزدیک می‌شود، از این وزن کاسته می‌شود. با تعیین مدلهای مورد قبول با انتخاب یک آستانه در معیار تشابه، تشابهات مدلهای مورد قبول پس از مقیاس سازی مجدد (مجموع تشابهات برابر واحد) تشابه پیشین را شکل می‌دهد که در واقع نقش وزنهای مختص به هر شبیه‌سازی مدل را ایفا می‌کند. با تخصیص این وزنها به دبی‌های حاصل از شبیه‌سازیهای مدلهای بیشمار در هر گام زمانی و گروه پارامترهای مورد قبول، به‌ترتیب توزیع احتمالاتی دبی‌ها و توزیع پارامترها بر اساس تشابه پیشین نتیجه می‌شود.

6- بهنگام‌سازی تشابهات

به منظور پیش‌بینی بر اساس تشابه پسین، از تئوری بیز به صورت زیر استفاده می‌شود. تشابهات پیشین بر اساس معیار تشابه، اصلاح شده و تشابه پسین را شکل می‌دهد:

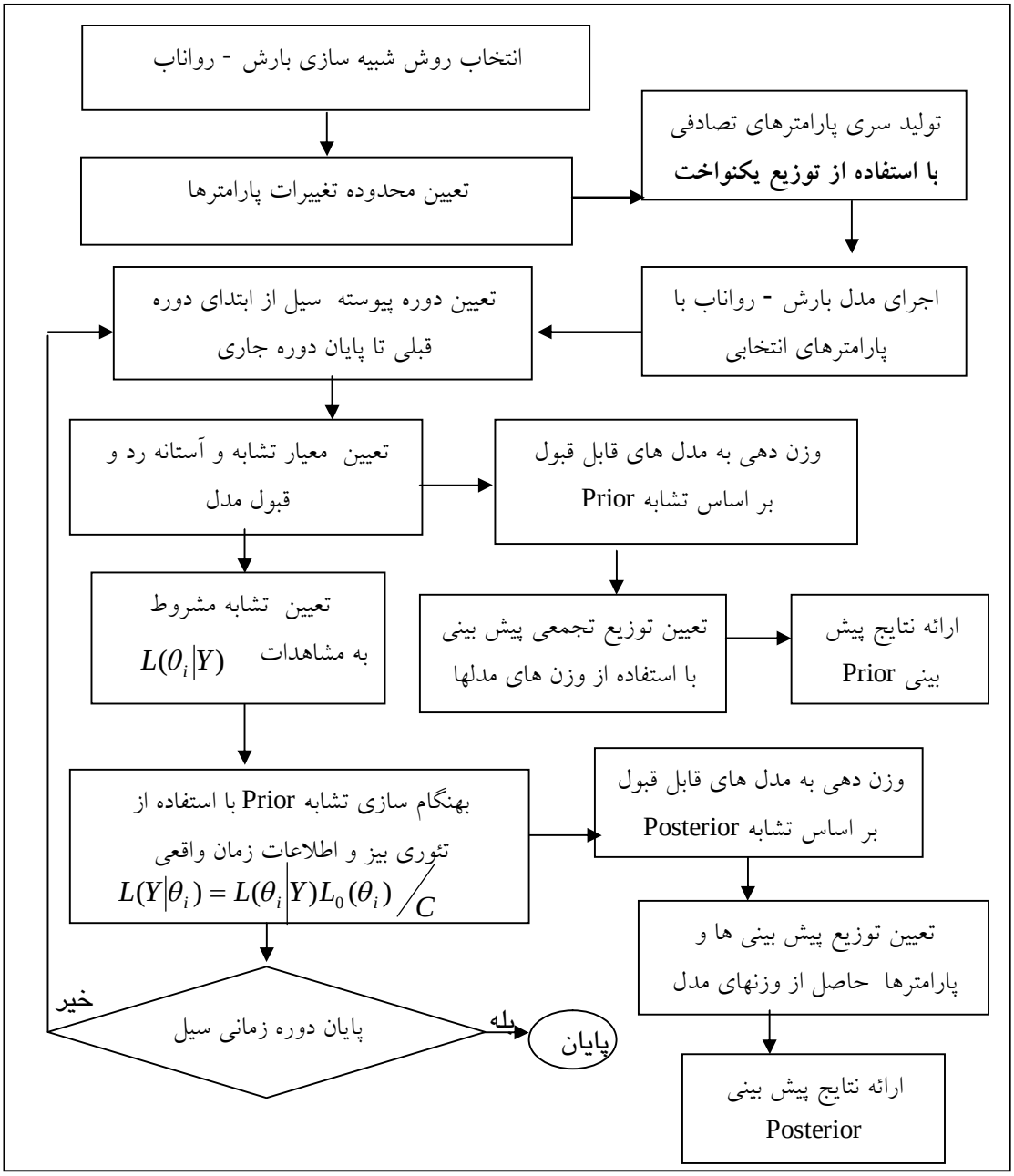
$$L(Y|\theta_i) = L(\theta_i|Y).L_0(\theta_i)/C \qquad (13)$$

که در آن $L_0(\theta_i)$ تشابه پیشین گروه پارامترهای θ، $(\theta_i|Y)$ معیار تشابه حاصل از گروه متغیرهای مشاهده‌ای Y، $L(Y|\theta_i)$ تشابه پسین شبیه‌سازی Y با θ معلوم و C ضریبی ثابت است به طوری که مجموع $L(Y|\theta_i)$ برابر یک شود.

معیار تشابه $L(\theta_i|Y)$ برای iامین مدل همراه با گروه پارامترهای θ_i مشروط به داده‌های مشاهده‌ای Y است که در آن امکان ارزیابی حساسیت پارامترهای منفرد با در نظر گرفتن توزیع مدلهای قابل قبول توسط وزنهای تشابه وجود دارد [2]. پس از محاسبه تشابه پسین، توزیع احتمالاتی دبی‌های هر گام زمانی و پارامترهای مورد قبول با اختصاص تشابه پسین به عنوان وزنهای مدلها تعیین می‌شود که در واقع توزیع پیش‌بینی‌ها و پارامترها را بر اساس تشابه پسین شکل می‌دهد. با معلوم بودن توزیع دبی‌ها و پارامترها، می‌توان محدوده پیش‌بینی‌ها و پارامترها را بر اساس سطوح اطمینان مختلف محاسبه کرد.

در کاربرد روش GLUE در بهنگام‌سازی زمان واقعی، دبی‌های مشاهده‌ای سیل در زمان واقعی به صورت دوره‌هایی مجزا و پیوسته می‌توانند در اصلاح پیش‌بینی‌ها نقش ایفا کنند. در دوره‌های مجزا، دبی‌های بخشهای مختلف در تعداد گامهای زمانی مشخص می‌توانند در تعیین تشابهات مشروط استفاده شوند. در این بهنگام‌سازی هر تعداد گام زمانی- بسته به تعداد مراحل بهنگام‌سازی- می‌تواند بکار رود. با افزایش تعداد مراحل بهنگام‌سازی، تعداد دبی‌های هر مرحله کاهش می‌یابد. از آنجا که در محاسبه تشابهات مشروط از واریانس دبی مشاهده‌ای استفاده می‌شود، لذا امکان افزایش تعداد مراحل

بهنگام‌سازی و بهنگام‌سازی در هر گام زمانی وجود ندارد. در دوره‌های پیوسته، دبی‌های هیدروگراف سیل از زمان شروع سیل تا زمان واقعی در تعیین تشابهات مشروط بکار می‌روند. در شکل 2 مراحل محاسباتی بهنگام‌سازی زمان واقعی در روش پیوسته با بکارگیری GLUE نشان داده شده است. زمان واقعی بهنگام‌سازی می‌تواند پس از چند گام یا در هر گام زمانی باشد. در این روش محدودیتی برای افزایش مراحل بهنگام‌سازی بجز در شروع هیدروگراف وجود ندارد. اما در صورت بیشتر بودن زمان اجرای مدل در مقایسه با گام زمانی داده‌های دریافت شده از شبکه تله‌متری، تعداد مراحل بهنگام‌سازی، به زمان اجرای مدل محدود می‌شود.



شکل 2 مراحل بهنگام‌سازی پارامترهای بارش-رواناب و اصلاح پیش‌بینی در زمان واقعی

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله متدولوژی جدیدی برای بهنگام‌سازی زمان واقعی با بکارگیری روشی بر مبنای مونت کارلو ارائه شد. در این روش تئوری بیز به همراه مونت کارلو برای بهنگام‌سازی و اصلاح خطاها بر اساس داده‌های زمان واقعی بکار گرفته می‌شود. طبق مبانی این روش، تابع تشابه مشروط داده‌ها همراه با تشابهات پیشین و پسین، به عنوان ضریبی برای اصلاح محدوده پیش‌بینی‌های سیل بکار می‌رود. بدین صورت که گروه دبی‌های محاسبه‌ای پس از اعمـــال ضریب اصلاحی در هر گام زمانی حاصل از تعداد معتنابهی از مدلهای قابل قبول[1] تعیین و توزیع احتمالاتی این دبی‌ها در هر گام زمانی محاسبه می‌شود.

در مقایسه با سایر روشهای بهنگام‌سازی، روش GLUE قابلیت انعطاف‌پذیری مناسبی برای انطباق هیدروگراف پیش‌بینی بر هیدروگراف مشاهده‌ای با اطلاعات زمان واقعی دارد. به عبارتی محدوده تغییرات پارامترهای بارش-رواناب چنان وسیع تعریف می‌شود که بر اساس داده‌های زمان واقعی ارسالی از شبکه تله‌متری، دبی مشاهده‌ای در محدوده پیش‌بینی حاصل از محدوده پارامترها قرار می‌گیرد. سپس بهنگام‌سازی برای کاهش محدوده پیش‌بینی براساس دبی مشاهده‌ای انجام می‌شود.

در متدولوژی پیشنهادی، فقط عدم قطعیت ناشی از پارامترها منظور شد در حالی که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های ورودی نیز می‌تواند نقش زیادی در کاهش خطاها ایفـــا کند. در این زمینه پیش‌بینی بارش محتمل به عنوان داده ورودی در پیش‌بینی سیل انجام می‌شود که معمولاً با خطای زیادی همراه است.

در بسیاری از سیستمهای پیش‌بینی سیل از ESP[2] برای تعیین توزیع احتمالاتی پیش‌بینی‌ها بر اساس بارشهای محتمل قابل وقوع در زمان واقعی استفاده می‌شود، به طوری که با در نظر گرفتن چندین سری زمانی بارش، محدودهٔ پیش‌بینی‌ها تعیین می‌شود. به منظور اعمال عدم قطعیت ناشی از اطلاعات ورودی و پارامترهای مدل بارش-رواناب می‌توان روش GLUE را با روشهایی نظیر ESP ادغام کرد و به نتایجی رسید که در آن، هر دو عدم قطعیت ملحوظ شده است. علاوه بر تعیین نحوه تلفیق این عدم قطعیت‌ها، اجرای مدلهای ترکیبی عدم قطعیت، مستلزم بکارگیری کامپیوترهای بسیار قوی است. تلفیق عدم قطعیت‌های اطلاعات ورودی و پارامترهای مدل می‌تواند به عنوان نگرش جدیدی در این زمینه مطرح شود.

8- فهرست علائم

A_{cell}	مساحت هر مربع برحسب مترمربع
AK	ضریب نفوذ در شروع گام زمانی محاسبات
AL	نفوذ پتانسیل بر حسب (mm/hr)
C	نفوذ تجمعی بر حسب میلیمتر
c	ضریب ثابت
C_a, C_b	ضرایب روندیابی ذخیره ای
d_{cell}	فاصله پیمایش رواناب از هر مربع تا خروجی حوضه،
d_{max}	فاصله پیمایش برای مربعی که بیشترین فاصله از خروجی حوضه را دارد
E_i	نفوذ در زمان i بر حسب متر
DL,RL, ER	پارامترهای نفوذ بارش باران بر حسب میلیمتر
$L(\theta_i \mid Y)$	معیار تشابه i امین مدل مشروط بر مشاهدات از شروع هیدروگراف تا زمان t
$L_0(\theta_i)$	تشابه پیشین سری پارامترهای θ
$L(Y \mid \theta_i)$	تشابه پسین شبیه‌سازی Y با θ معلوم
n	تعداد گام های زمانی از شروع هیدروگراف تا زمان t
N	پارامتر بی بعد رابطه عملکرد
O_i	دبی محاسبه ای در گام زمانی i

1. Behavioral
2. Ensemble Stream Flow Prediction

دبی محاسبه ای در گام زمانی i-1	O_{i-1}
دبی مشاهده ای در زمان t بر حسب m^3/s	O_t
دبی متوسط محاسبه‌ای خروجی از حوضه در گام زمانی i	Out_i
عمق بارش در هر گام زمانی بر حسب میلیمتر	P
متوسط دبی هیدروگراف مشاهده ای از زمان شروع تا زمان واقعی τ بر حسب m^3/s	$Qmean_\tau$
ضریب ذخیره حوضه بر حسب ساعت	R :
پارامترهای نفوذ ذوب برف بر حسب (mm/hr)	SS ,RK
پارامتر نفوذ نمایی بر حسب (mm/hr)	SR
گام زمانی شبیه سازی	T
زمان تمرکز حوضه برحسب ساعت	t_c
زمان حرکت رواناب از هر مربع تا خروجی حوضه بر حسب ساعت	t_{cell}
خطای محاسبه ای حاصل از اختلاف دبی محاسبه ای و مشاهده ای هیدروگراف سیل در زمان t بر حسب m^3/s	x_t
متوسط وزنی خطاها در طول هیدروگراف تا زمان t بر حسب m^3/s	$\bar{x}$
وزن مربوط به دبی هیدروگراف در زمان t	w_t
زمان واقعی بهنگام‌سازی	T
واریانس خطاهای متأثر از وزن دبی هیدروگراف در مدل i تا زمان τ	σ_i^2
واریانس دبی‌های هیدروگراف مشاهده‌ای	σ_{obs}^2

8- منابع

[۱] حیدری ع.، پیش‌بینی سیل در زمان واقعی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدلهای بارش– رواناب، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیر کبیر، زمستان 1381.

[۲] 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.

[۳] حیدری ع.، ثقفیان ب. و مکنون ر.، تلفیق تئوری بیز با روش مونت کارلو جهت ارتقای نتایج واسنجی مدلهای هیدرولوژیکی، مجله تحقیقات منابع آب، پاییز 1384.

[4] Bates B. C., Campbell E. P. (2001), A Morkov Chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall – runoff modeling, Water Resource Research, 37(4): 125-132.

[5] Beven K. J., (1985), "Distributed modeling in M. G. Anderson and T. P. Burt (Eds)", Hydrological Forecasting, Wiley, Chichester, UK, 405-435.

[6] Beven K. J., (2000), Rainfall – Runoff modeling, John Wiley & Sons, LTD, PP. 314.

[7] Beven K. J. (2001), How far can we go in distributed hydrological modeling?, Hydrology & Earth System Sciences, 5(1), 1-12.

[8] 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.

[9] Beven K. J., Binley A. (1992), The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, Hydrological Processes, 6(3): 279-298.

[10] Beven K. J., Freer J. (2001), Equifinality, data assimilation and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology, Journal of Hydrology, 249 :11-29.

[11] Campbell E. P., Cox, Bates B. C. (1999), A Bayesian approach to parameter estimation and pooling in nonlinear flood event models, Water Resource Research, 35(1): 58-71.

[12] Day G. N., (1985), "Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS", Journal of Water Ressource Planning and Management,

590-605.

[13] Evensen, G., (1994), Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. J. Geophys. Res., 99:1043–1062.

[14] Fread D. L., Lewis J. M., Carroll T. R., Rost A. A. and Ingram J. J., (1998) "Improving Real Time Hydrological Service in the USA, Part II: Inundation Mapping Using Dynamic Streaflow Modeling", British Hydrological Society, 1050-1069.

[15] Freer J. and Beven K. J. (1996), Baysian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach, Water Resource Research, 32(7): 2161-2173.

[16] Hydrologic Engineering Center, (1999), "HEC1 user manual; Technical Reference Manual", US Army Crops of Engineers.

[17] Kitanidis P. K. and Bras R. L., (1980), "Real-Time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model: 1- Analysis Uncertainty", Water Resources Research, 16(1): 10-25.

[18] Kitanidis P. K. and Bras R. L., (1980), "Real-Time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model: 1. Analysis of uncertainty, 2. Application and results", Water Resources Research, 16(6): 1025-1044.

[19] Kull D., Feldman A., (1998), Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE , 3(1), 9-19.

[20] Kuczara G., Parent E. (1998), Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm, Journal of Hydrology, 211, 11-29.

[21] Peters J, Easton D., (1996), Runoff simulation using radar rainfall data, Water Resource Bulletin , AWRA, 32(4), 753-760.