

طراحی مدل شبه‌دینامیکی پیش‌بینی سیل برای زمان حقیقی

سهراب حجام* و منیره رفیعی*

*مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۸۲،۴۲، پذیرش مقاله: ۸۴،۸،۲۴)

چکیده

بر پایه شاخص‌های مدل تابع انتقال مدل آماری دینامیک با توجیه فیزیکی به کمک پایداری ریاضیاتی مشتق شده است. این مدل به کمک تغییر در شرایط حوضه در زمان واقعی عمل می‌کند و نتایج قابل قبول فیزیکی به دست می‌دهد. ساخت مدل در این بررسی از راه بسته نرم‌افزاری تدوین شده صورت می‌گیرد. این برنامه نیازمند دو فایل ورودی شامل فایل داده‌های بارندگی و داده‌های رواناب است. در این بررسی برای ساخت مدل از داده‌های ساعتی دبی و باران هشت رویداد در ایستگاه بهبهان حوضه مارون استفاده شده است. در مرحله شبیه‌سازی مدل، سه عامل حجم (α)، شکل (ϵ) و زمان (γ) معرفی و به کار گرفته شده است که تأثیرات انفرادی و تجمعی هیچ کدام از آنها موجب ناپایداری، نوسان و منفی شدن پاسخ ضربه واحد مدل نمی‌شود. با تعدیل کردن این سه عامل، مدل بهنگامی ساخته شد که دقت بیشتری نسبت به مدل ایستا دارد. چنانچه بهنگام کردن مدل با این پارامترها که به طور خودکار و با توجه به روش کمترین مربعات بازگشتی در برنامه به دست می‌آیند مطلوب نباشد، با انتخاب دستی این سه پارامتر می‌توان به جواب‌های مطلوب‌تری رسید. آخرین بخش مربوط به پیش‌بینی سیل است. این بخش با استفاده از یافته‌های مرحله کالبرنی و مرحله بهنگام کردن مدل به کمک پارامترهای حجم، شکل و زمان، برای پیش‌بینی دبی به کار می‌رود. به منظور آزمون مدل، از چهار رویداد دیگر ایستگاه بهبهان استفاده شده است. نتایج به دست آمده اجازه می‌دهد تا دبی واقعی و دبی پیش‌بینی شده برای چند گام بعدی مقایسه شود.

واژه‌های کلیدی: بارندگی- رواناب، بهنگام سازی، تابع انتقال فیزیکی، پاسخ ضربه، پیش‌بینی سیل، زمان حقیقی

۱ مقدمه

فراوانی در این کشورها شده است (مارش، ۲۰۰۱). بر اساس آمار موجود، تعداد سیل‌های جاری شده در ایران در دوره ۲۵ ساله ۱۳۵۱ تا ۱۳۷۵، ۹۶۷ مورد (هر سال به طور متوسط ۳۹ مورد) و تعداد تلفات انسانی حداقل ۱۸۸۲ نفر بوده است. جمع خسارت‌های ملموس سیل‌های جاری شده دوره ۲۵ ساله بالغ بر ۹۱۶۲ میلیارد ریال (هر سال به طور متوسط ۳۶۶/۵ میلیارد ریال) یا در هر روز بیش از یک میلیارد ریال برآورد شده است (مهدوی، ۱۳۷۸).

مدل‌های متعددی در زمینه پیش‌بینی بهنگام سیل در دنیا بسط و توسعه یافته است که از نقطه نظر پیچیدگی و سهولت به کارگیری، به درجات متعددی تقسیم شده‌اند.

پیش‌بینی سیل از جمله می‌تواند در قالب دو دسته مدل‌های دینامیکی و آماری صورت پذیرد. مدل‌های

سیل یکی از مهم‌ترین و در عین حال پرتواترترین بلاای طبیعی است. از جمله برآورد شده که سیل طی یک صد سال (از ۱۸۷۰ تا ۱۹۷۰) در هر سال به طور متوسط در سطح جهان باعث مرگ ۵۰۰۰ نفر و خسارتی بالغ بر ۱۵۰۰ میلیون دلار شده است (نمک، ۱۹۸۶). تلفات و خسارات سیل فقط محدود به کشورهای توسعه نیافته نیست، بلکه کشورهای پیشرفته نیز با آن دست به گریبان‌اند. به طور مثال خسارات سیل بزرگ ۱۹۹۳ در می‌سی‌سی‌پی آمریکا به تنهایی حدود ۱۵ تا ۲۰ میلیون دلار تخمین زده شده است (کریستوفوویک، ۱۹۹۵). در این کشور در هر سال به طور متوسط خسارت ناشی از سیل متجاوز از ۲ میلیون دلار است (یاپو و سروشیان، ۱۹۹۳). طغیان رودخانه‌ها و وقوع سیل طی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ میلادی در اروپا و انگلستان باعث از بین رفتن منابع مالی

دینامیکی عمدتاً با در نظر داشتن قوانین فیزیکی درگیر عملی است. شناخت دقیق این قوانین و قانونمند کردن آنها که عمدتاً با سه فاز جامد، مایع، بخار آب و تبدلات انرژی بین این سه فاز مرتبط است و به ویژه به کارگیری این قوانین در زمان حقیقی با مشکلات خاص خود مواجه است. دسته دیگر مدل‌های پیش‌بینی، مدل‌های آماری‌اند که عمدتاً فیزیک مسئله را مورد توجه قرار نمی‌دهند و فقط بر تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها تأکید دارند. این دسته از مدل‌ها از نظر سهولت استفاده، بر مدل‌های قبلی ترجیح دارند. گرچه تصور کلی این است که نتایج مدل‌های دینامیکی بر مدل‌های آماری برتری دارند، لیکن این مفهوم همیشه واقعیت ندارد و درستی آن به شناخت قوانین فیزیکی حاکم و چگونگی اعمال آنها وابسته است. به سخن دیگر استفاده از مدل‌های دسته دوم نیز در بسیاری موارد اجتناب‌ناپذیر است، گرچه استفاده از هر کدام از دو دسته مدل نیز به هیچ وجه توانایی مدل‌سازی دقیق جو را تضمین نمی‌کنند (میلن، ۲۰۰۳).

در پیش‌بینی سیل باید به این نکته توجه داشت که هشدار سیل نمی‌توان فقط بر داده‌های هواشناسی متکی بود، بلکه قضاوت هیدرولوژیکی فرایند و مدل هیدرولوژیکی نیز باید مدنظر قرار گیرد (دنت، ۲۰۰۳).

مدل مورد استفاده در این مقاله در دسته مدل‌های بارندگی-رواناب جای می‌گیرد. فرایند بارندگی-رواناب فرایند غیرخطی متغیر با زمان است که به آسانی با مدل‌های ساده توصیف نمی‌شود. آن‌گونه که ذکر شد مدل‌سازی بارندگی-رواناب به دو صورت دینامیکی و آماری امکان‌پذیر است که از جمله به روش‌های هیدروگراف واحد، مدل‌های با خصایص غیرخطی، مدل‌های تابع انتقال و مدل‌های نظری قابل تقسیم است. مدل بسط یافته در این مقاله مدل تابع انتقال است.

مدل‌سازی آماری دینامیکی برای مقاصد پیش‌بینی سیل مدتی است که مورد استفاده قرار گرفته است. در این

شیوه در ابتدا ضریبی عمدتاً برابر یک بر بارندگی اعمال می‌شود تا بخشی از آن به صورت بارندگی مؤثر که مستقیماً در رواناب رودخانه دخالت می‌کند، مشخص شود. این ضریب در فرایند پیش‌بینی متناسب با عملکرد مدل بهنگام می‌شود (بون، ۲۰۰۱). در مقاله حاضر جدای از ضریب یاد شده که عامل حجم نامیده شده‌اند دو ضریب دیگر به نام‌های عامل شکل و عامل زمان نیز معرفی و به کار برده شده‌اند. هر سه این عوامل در فرایند پیش‌بینی، بهنگام خواهند شد. در زیر ابتدا اصول کلی مدل‌های تابع انتقال و در پی آن موارد به کار گرفته شده در این مقاله تشریح می‌شود.

۲ ساختار ریاضی مدل

۱-۲ اصول مدل‌های تابع انتقال

مدل‌های تابع انتقال در مدل‌سازی دستگاه‌های هیدرولوژیکی و در مهندسی کنترل و الکترونیک، بسیار مورد استفاده‌اند. مدل‌های تابع انتقال را نخستین بار باکس و جنگینز در ۱۹۷۶ معرفی کردند و مورد استفاده قرار دادند.

ارتباط بین رواناب در زمان t ، y_t و رواناب و بارندگی در زمان‌های گذشته یعنی y_{t-1} ، y_{t-2} ، y_{t-m} ، u_{t-1} ، u_{t-2} ، u_{t-n} را می‌توان به شرح زیر برقرار ساخت:

$$y_t = a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \dots + a_m y_{t-m} + b_0 u_t + b_1 u_{t-1} + \dots + b_n u_{t-n} \quad (1)$$

با اعمال تبدیل Z با تعریف $y(z) = \sum_{t=0}^{\infty} y(t)z^{-t}$ به رابطه بالا و استفاده از عملگر پس‌برنده به شرح $z^{-n} u_t = u_{t-n}$ خواهیم داشت:

$$A(z)Y_t = B(z)U_t \quad (2)$$

یا

روش کلاسیک آنها را یوسفی (۱۳۷۸) تشریح کرده است. در هیدرولوژی پاسخ ضربه یک مدل تابع انتقال باید پایدار و غیر منفی باشد ولی به شرحی که خواهد آمد در پاره‌ای موارد پاسخ ضربه مدل تابع انتقال ممکن است با ناپایداری، نوسان و پاسخ منفی همراه باشد.

۲-۲-۱ ناپایداری

پاسخ ضربه عبارت از واکنش حوضه به یک واحد بارندگی مؤثر است ولی برخلاف هیدروگراف، واحد مقدار جریانات قبلی آب رودخانه نیز در آن دخالت می‌کند. در این صورت پس از ریزش بارندگی باید آب داخل رودخانه افزایش یابد و پس از رسیدن به یک حداکثر، باروندی کاهشی به مقدار قبل از باران برسد. بنابراین یکی از موارد غیرقابل قبول برای پاسخ ضربه در مطالعات هیدرولوژی این است که پاسخ ضربه مرتباً با زمان افزایش یابد که این امر پذیرفتنی نیست چرا که تأثیر باران بعد از مدتی از بین خواهد رفت و به تبع آن می‌باید آب رودخانه شروع به کاهش کند. حالت پیوسته افزایشی پاسخ ضربه را حالت ناپایدار گویند.

در این مقاله برای تضمین داشتن پاسخ ضربه واحد پایدار یعنی رسیدن به پاسخ ضربه واحدی که از نظر دینامیکی توجیه‌پذیر باشد، به شرح زیر عمل شده است. با استفاده از خواص تبدیل z ، انتگرال کوشی و قضیه مانده‌ها می‌توان ثابت کرد که محورهای پاسخ ضربه واحد $h(t)$ به شرح زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N \text{Res} [H_{z=p_i}(z)] P_i^{n-1} \quad (۸)$$

که در آن $p_i = r_i e^{o_i}$ و r_i و o_i به ترتیب بزرگی و موقعیت زاویه‌ای قطب‌ها در داخل دایره به شعاع واحد و N تعداد قطب‌های داخل دایره به شعاع واحد است. در نتیجه، شرط لازم و کافی برای این که جمع یادشده در رابطه فوق همگرا شود، این است که برای مقادیر مختلف

$$Y_t = \frac{B(z)}{A(z)} U_t = H(z) U_t \quad (۳)$$

که در آن:

$$B(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n} \quad (۴)$$

$$A(z) = 1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} \dots - a_m z^{-m} \quad (۵)$$

به عملگر $H(z)$ تابع انتقال گفته می‌شود که به صورت زیر نیز قابل نمایش است.

$$H(z) = h_0 z^{-0} + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots \quad (۶)$$

مقادیر h_0 ، h_1 ، h_2 و تابع پاسخ ضربه نامیده می‌شوند و به شرحی که در پی می‌آید با محورهای هیدروگراف واحد که واکنش حوضه منحصراً به یک واحد بارندگی مؤثر است قابل مقایسه‌اند. مقادیر عددی تابع پاسخ ضربه از راه عمل عکس تبدیل z از $H(z)$ قابل محاسبه خواهد بود. دیده می‌شود که $H(z)$ به صورت عامل بندی سری و به شرح زیر قابل نمایش است:

$$H(z) = B(z) \times \frac{1}{A(z)} = \sum_{i=0}^n b_i z^{-i} \left[\frac{1}{1 - \sum_{i=1}^m a_i z^{-i}} \right] \quad (۷)$$

که در آن $B(z)$ یک دستگاه پاسخ ضربه خطی متناهی و $\frac{1}{A(z)}$ یک دستگاه پاسخ ضربه خطی نامتناهی است.

برای اطلاعات تفصیلی در خصوص به کارگیری مدل‌های تابع انتقال در هیدرولوژی از جمله می‌توان به بون (۲۰۰۱) و در ایران به یوسفی (۱۳۷۸) و رفیعی (۱۳۷۹) مراجعه کرد.

۲-۲ پاسخ ضربه نامناسب و راه‌حل‌های پیشنهادی برای رفع آن

برای استفاده از روش تابع انتقال به منظور برآورد رواناب، می‌باید بازه زمانی، مرتبه و ضرایب مدل مشخص شود که

خواهد داشت. در نتیجه بحث توام پایداری و غیرنوسانی بودن فقط در حالتی درست خواهد بود که β در خارج دایره به شعاع واحد و از نظر عددی مثبت باشد.

۲-۲-۳ پاسخ ضربه واحد منفی

پاسخ ضربه واحد منفی نیز نمی‌تواند در مسائل پیش‌بینی سیل مطرح باشد. بروز چنین موقعیتی بدین معنا است که ریزش باران نه تنها موجب بالا آمدن آب در رودخانه نشده بلکه باعث پایین آمدن آن نیز شده است. پاسخ منفی حالت خاصی از نوسان است که در دنباله انتهایی مشاهده می‌شود. برای تضمین نبود چنین حالتی در مدل می‌باید β عددی حقیقی و بزرگ‌تر از واحد باشد.

۲-۳-۳ هویت‌یابی مدل

از رابطه (۷) چنین استنباط می‌شود که تابع انتقال $H(z)$ ، حاصل ضرب دو بخش مخرج تابع انتقال $1/A(z)$ در بخش صورت تابع انتقال $B(z)$ است. بنابراین تابع پاسخ ضربه مدل تابع انتقال را می‌توان به کمک تلفیق دو بخش یاد شده به شرح زیر، استخراج کرد.

۲-۳-۱ بخش $B(z)$

$B(z)$ یک پاسخ ضربه متناهی دستگاه خطی است. شکل پاسخ ضربه مستقیماً از روی پارامترهای $B(z)$ قابل استخراج است. از آنجا که قطب‌های $B(z)$ در یک صفحه z همگی در مبدا قرار دارند، $B(z)$ همیشه پایدار است. پاسخ ضربه $B(z)$ تأثیر بخش بارندگی را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲ بخش $1/A(z)$

پاسخ ضربه نامتناهی دستگاه خطی و مترادف با پاسخ ضربه هیدروگراف واحد است. دیده می‌شود $H(z)$ که از عملکرد تلفیقی باران و هیدروگراف واحد حاصل

N و $i=1,2,\dots$ نامساوی $|p_i| < 1$ صادق باشد. در نتیجه برای مقادیر $t \geq 0$ پاسخ دستگاه محدود خواهد شد. اگر قطب‌های تابع انتقال تماماً در داخل دایره به شعاع واحد باشند، می‌توان چنین نتیجه گرفت که پاسخ ضربه واحد یک دستگاه گسسته خطی نامتغیر با زمان پایدار است، اگر و فقط اگر

$$\sum_{t=0}^{\infty} |h(t)| < \infty \quad (9)$$

باشد. به سخن دیگر سنجه پایداری، با مشخص کردن قطب‌های تابع انتقال قابل ارزیابی خواهد بود.

۲-۲-۲ نوسان

پاسخ ضربه واحد در مسائل مربوط به سیل نه تنها باید پایدار باشد بلکه باید نوسانی هم نباشد. حالت نوسان بیانگر این است که تأثیر یک واحد بارندگی در رواناب می‌تواند اضافه شود، بعد کاهش یابد و مجدداً افزایش یابد در حالی که پاسخ فقط با باریدن بارش می‌تواند اضافه شود، به حداکثر برسد و بعد کاهش یابد.

برای چگونگی نبود نوسان در پاسخ ضربه واحد مدل مقاله حاضر برای مثال، مجدداً دستگاهی با یک قطب حقیقی را در نظر می‌گیریم که محورهای پاسخ ضربه واحد آن به شرح زیر خواهد بود:

$$h(t) = \operatorname{Re} s [H(z)] = \left(\frac{1}{\beta} \right)^t \quad (10)$$

$$z = 1/\beta$$

به شرحی که در بحث مربوط به پایداری ملاحظه شد، فقط زمانی که β در خارج دایره واحد باشد، مدل پایدار خواهد بود. ولی این امر لزوماً بحث نوسان را نیز شامل نمی‌شود، چرا که اگر β در خارج دایره واحد ولی منفی باشد به ازای $t = 2i$ و $i = 1, 2, 3, \dots$ مقدار $h(t) > 0$ و به ازای $t = 2i - 1$ و $i = 1, 2, 3, \dots$ مقدار $h(t) < 0$ خواهد شد که نوسان را در پاسخ ضربه واحد به دنبال

$$h(t) = \frac{(N-1+t)(N-2+t)\cdots(1+t)}{(N-1)!} \quad (16)$$

$$t_{\text{peak}} = \frac{1}{L_n \beta} - 1$$

که در آنها $t=1,2,\dots$ است.

دیده می‌شود که شکل پاسخ ضربه یک مدل تابع انتقال با تغییر موقعیت قطب یا تغییر مرتبه قطب تغییر خواهد کرد. از آنجا که تغییر در مرتبه قطب مدل تابع انتقال یک فرایند پیوسته نیست و فقط می‌تواند اعداد صحیح $N=1,2,\dots$ را اختیار کند و مرتبه‌های بالا نیز برای مقاصد عملی کاربرد ندارند، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داد که بهتر است تا مرتبه قطب مدل را حداکثر به $N=3$ محدود کنیم. برای تعیین زمان حداکثر پاسخ ضربه واحد باید از $h(t)$ نسبت به t مشتق گرفت و نتیجه را مساوی صفر قرار داد.

۲-۴ بهنگام کردن مدل

به شرحی که ذکر شد هویت‌یابی مدل بر اساس رویدادهای تاریخی صورت می‌گیرد. این عمل یا از روی هم ریختن همه رویدادها و استخراج یک مدل تابع انتقال متوسط صورت خواهد گرفت. یا این که برای هر رویداد تاریخی مدل تابع انتقال مستقلی طراحی خواهد شد. در حالت اول نتایج مدل هویت‌یابی شده متوسط برای پیش‌بینی رویداد در حال وقوع بر حسب اینکه شرایط متوسط به چه میزانی با رویداد در حال وقوع تطابق داشته باشد کاملاً متغیر خواهد بود. در حالت دوم، مسئله استفاده از رویدادهای تاریخی مشابه با رویداد در حال وقوع، مستلزم وجود بانک اطلاعاتی بسیار غنی و بسیط از رویدادهای گذشته است که در این صورت با استفاده از یک دستگاه کارآمد (بیشاب و وات، ۱۹۸۹) رویداد مناسب تاریخی و هماهنگ با رویداد تحت پیش‌بینی معلوم می‌شود و از مدل مربوط به آن رویداد استفاده

می‌آید، جریان رودخانه خواهد بود. با ملاحظه مطالب قبلی برای حصول مدل تابع انتقالی که از نظر دینامیکی توجیه‌پذیر باشد، باید بخش $\frac{1}{A(z)}$ مدل تابع انتقال مثبت، پایدار و بدون نوسان باشد.

از راه بسط منطقی $\frac{1}{A(z)}$ و ساده کردن آن می‌توان

به روابط زیر رسید:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i z^{-i}}{S(z^{-1} - \beta_i)^N} \quad (11)$$

$$\beta_i \in \mathbb{R} \quad \text{and} \quad \forall \beta_i, \beta_i > 1.0$$

$$S = \frac{1}{(-\beta)^N} \quad (12)$$

در این جا فقط یک قطب مورد نظر قرار گرفته است و N مرتبه قطب است. چون همه قطب‌ها عددی حقیقی و در داخل دایره به شعاع واحدند، تابع انتقال رابطه (۱۲) همیشه پایدار، غیرمنفی و بدون نوسان خواهد بود.

از راه بسط $(z^{-1} - \beta)^N$ و ملاحظه این که $A(z) = 1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} \dots$ می‌توان نشان داد که ضرایب a مدل تابع انتقال نهایی از رابطه زیر حاصل می‌آیند:

$$a_i = -C_N^{N-1} (-\beta)^{-i} \quad (13)$$

$$\beta_i \in \mathbb{R} \quad \text{and} \quad \forall \beta_i, \beta_i > 1$$

که ضریب عمومی C_N^k به شرح رابطه زیر است:

$$C_N^k = \frac{N(N-1)(N-2)\cdots[N-(k-1)]}{k!} \quad (14)$$

پاسخ ضربه واحد $\frac{1}{A(z)}$ برای مدل‌های متفاوت به شرح

زیر قابل محاسبه خواهد بود:

برای $N=1$:

$$h(t) = \left(\frac{1}{\beta}\right)^t \quad (15)$$

و برای $N \geq 2$

بنابراین پاسخ ضربه $H(z)$ مدل دینامیک تابع انتقال پژوهش حاضر می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$H(z) = f(\alpha, \varepsilon, \gamma, z)$$

که در آن α : فاکتور حجم، ε : فاکتور شکل و γ : فاکتور زمان است. هر فاکتور یک مشخصه مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هیچ کدام سبب ناپایداری و نوسان مدل نخواهند شد. با تعدیل این سه فاکتور می‌توان مدل را دقیق‌تر از مدل ایستا بهنگام کرد.

۲-۴-۱ فاکتور تعدیل حجم α

یک راه تغییر دادن حجم پاسخ ضربه، ضرب کردن همه b_i ها در ضریب ثابت $(1+\alpha)$ است. در این جا α با توجه به شکل (۱-الف) درصد تغییر حجم است و ممکن است مقادیر مثبت و منفی را اختیار کند. در نتیجه، ضرایب مدل در مرحله فعلی (B_i و A_i) و با توجه به رابطه (۱۳) به شرح زیر محاسبه خواهند شد:

$$A_i = a_i \quad i=1,2,\dots,m$$

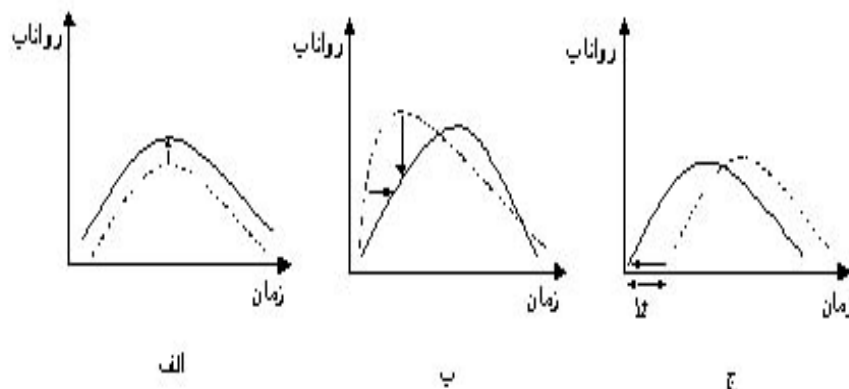
$$B_i = (1+\alpha)b_i \quad i=0,1,\dots,n$$

$$a_i = -C_N^{N-i} (-\beta)^{-i}$$

$$\beta \in \mathbb{R} \quad \text{and} \quad \beta > 1.0 \quad (18)$$

خواهد شد. لیکن در طبیعت پیدا کردن یک رویداد تاریخی کاملاً مشابه با رویداد در حال وقوع اگر غیرممکن نباشد، بسیار بعید است. نتیجه این که بهنگام کردن مدل هویت‌یابی شده در مرحله قبل و دینامیک کردن آن متناسب با شرایط رویداد در حال وقوع، اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. نقش بهنگام کردن مدل اگر از هویت‌یابی مدل مهم‌تر نباشد کم اهمیت‌تر از آن نیست (WMO,1992).

در پژوهش حاضر روشی به شرح زیر برای بهنگام کردن پاسخ ضربه واحد مورد استفاده قرار گرفته که موضوع اصلی مقاله است. آن گونه که ذکر شد می‌توان پاسخ ضربه واحد مدل هویت‌یابی شده از داده‌های تاریخی را به سهولت محاسبه و آنرا ترسیم کرد. در عین حال به کمک داده‌های ورودی (بارندگی) و خروجی (رواناب) رویداد در حال وقوع تا زمان حال، می‌توان پاسخ ضربه واحد رویداد تحت بررسی تا زمان حال را نیز مشخص و ترسیم کرد. اگر پاسخ ضربه مدل را با خط منقطع و پاسخ ضربه رویداد در حال وقوع را با خط پر نشان دهیم، به شکل ۱ تطابق نداشتن دو منحنی، ناشی از سه پارامتر خواهد بود.



شکل ۱. خطای انطباق نداشتن پاسخ ضربه مدل و پاسخ ضربه واقعی.

الف- خطای حجم ب- خطای شکل ج- خطای زمان

کرد.

$$\varepsilon = \frac{1}{L_n \beta_{\text{new}}} - \frac{1}{L_n \beta} \quad (19)$$

اما مشکلی که باقی می‌ماند این است که ε همچنین بر حجم پاسخ ضربه نیز تأثیر می‌گذارد و می‌باید با ضریب α تلفیق شود. برای حل این مشکل بایستی تأثیر نسبت دو سطح S_1 و S_2 به شرح زیر نیز در محاسبات مربوط به B_i دخالت داده شود.

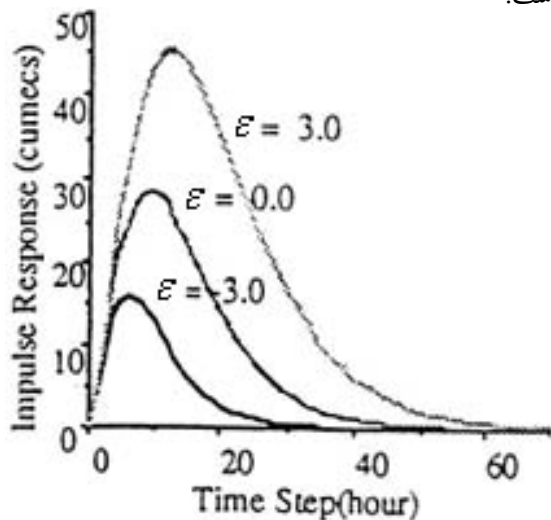
$$S_1 = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^N} \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{\beta_{\text{new}}}\right)^N} \quad (21)$$

در نهایت، مقادیر جدید ضرایب B_i که حاصل عملکرد تلفیقی α و ε خواهد بود، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

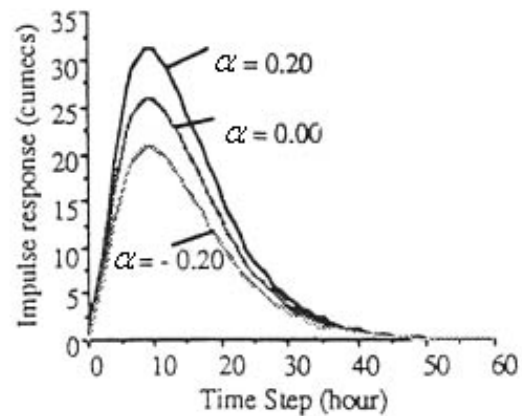
$$B_i = (1 + \alpha) \frac{S_1}{S_2} b_i = (1 + \alpha) \left[\frac{1 - \frac{1}{\beta}}{1 - \frac{1}{\beta_{\text{new}}}} \right]^N \quad (22)$$

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نقش انفرادی فاکتور تعدیل شکل و نقش تجمعی آن با فاکتور حجم نشان داده شده است.



شکل ۳. اثر عامل شکل بر پاسخ ضربه.

دیده می‌شود که چون α فقط بر پارامترهای بارندگی اعمال خواهد شد، ناپایداری و نوسان در مدل اصلی پدید نخواهد آمد. مقدار α از راه تنظیم، طوری محاسبه خواهد شد تا منحنی منقطع شکل ۱- الف بر منحنی با خط پر انطباق یابد. از شکل ۲ استنباط می‌شود که فاکتور تعدیل حجم به‌طور مؤثری در حجم پاسخ ضربه مدل نقش دارد، بدون آنکه تغییری در شکل یا زمان پاسخ حوضه ایجاد کند.



شکل ۲. تأثیر عامل حجم بر پاسخ

۲-۴-۲ فاکتور تعدیل شکل ε

شکل مدل تابع انتقال دینامیک با بخش $A(z)$ کنترل می‌شود. برای کنترل شکل پاسخ ضربه شاخصی لازم است که درجه شکل را مشخص کند. فاکتور تعدیل شکل ε مورد استفاده در این پژوهش، انحراف موقعیت حداکثر مدل دینامیک تابع انتقال و مدل هویت‌یابی شده اولیه است. واحد ε از جنس گام زمانی مدل است که عددی حقیقی خواهد بود.

برای انطباق دو منحنی با خطوط منقطع و پر در شکل ۱- ب می‌باید که β دیگری که آن را با β_{new} نشان می‌دهیم محاسبه شود و به شرح زیر و با استفاده از مشتق رابطه (۱۶)، زمان حداکثر پاسخ ضربه واحد را از هم کم

۳ عملکرد مدل

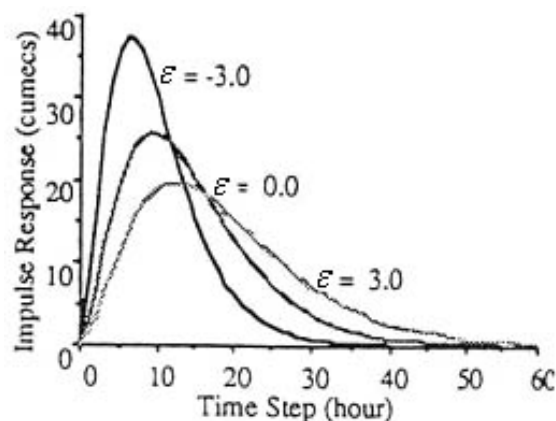
۱-۳ مقدمه

استان خوزستان یکی از سیل‌خیزترین استان‌های کشور است. به طوری که در بین ۲۸ استان کشور از دیدگاه سیل‌های بسیار مهم و مهم، به ترتیب با دفعات تکرار (۷ بار در هر ۱۰ سال) و (تقریباً یک بار در هر سال) مقام نخست و از دیدگاه سیل‌های متوسط (۷ بار در هر ۱۰ سال) مقام سوم و از دیدگاه سیل‌های عادی با تکرار هر ۳ سال، ۷ بار مقام دوم را دارد. (مهدوی، ۱۳۷۸). بنابراین برای بررسی کارایی مدل، حوضه آبریز جراحی و رودخانه اصلی آن مارون در استان خوزستان انتخاب شد. چون در حوضه مطالعاتی فقط یک ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه دبی‌سنجی وجود دارد، صرفاً بنای مدل یکپارچه در منطقه میسر است و امکان ساخت مدل‌های نیمه توزیعی و تمام توزیعی وجود ندارد.

آماره‌ای که در این قسمت مورد استفاده قرار گرفته است، مربوط به آمار ساعتی بارندگی و دبی است که از بانک اطلاعاتی شرکت تماب وابسته به وزارت نیرو استخراج شده است (تماب، سال ۱۳۷۹). از بین آماره‌های موجود، ۱۲ سیل بزرگ از دیدگاه دبی مطلق مشاهده شده نسبت به جریان پایه، انتخاب شد که ۸ رویداد برای طراحی اولیه در مرحله هویت‌یابی و شبیه‌سازی و ۴ رویداد باقی‌مانده برای آزمون معتبر بودن مدل برای مقاصد پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۳ مدل مرحله کالبدزنی و شبیه‌سازی

نخستین گام در طراحی مدل تابع انتقال، مشخص کردن بازه زمانی مدل است. این بازه به دینامیک پاسخ حوضه و خصوصیات رویدادها بستگی دارد. بحث کلی درباره بازه زمانی مدل تابع انتقال در کتاب مشکانی (۱۳۷۱) و در ارتباط با مدل‌های تابع انتقال برای مقاصد پیش‌بینی سیل در پایان‌نامه یوسفی (۱۳۷۸) قابل دسترسی است. در این



شکل ۴. اثر تلفیقی عامل شکل و حجم.

۲-۴-۳ فاکتور تعدیل زمان

زمان پاسخ ضربه مدل دینامیک تابع انتقال را می‌توان با اعمال تاخیر زمانی γ به بارندگی بهنگام کرد. در نهایت مراحل بهنگام کردن سه گانه فوق‌الذکر و محاسبه پارامترهای نهایی A_i و B_i مدل دینامیک معرفی شده در این مقاله که در یک زنجیره عمل خواهد کرد، به شرح زیر خواهد بود.

$$y_t = \sum_{i=1}^m A_i y(t-i) + \sum_{i=\gamma}^{n+\gamma} B_{i-\gamma} u_{(t-i)}$$

$$A_i = a_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$B_i = \left[\frac{\beta_{\text{new}}(\beta - 1)}{\beta(\beta_{\text{new}} - 1)} \right]^N (1 + \alpha) b_i$$

$$i = 0, 1, \dots, N$$

$$a_i = -C_N^{N-i} (-\beta_{\text{new}})^{-i}$$

$$\beta \in \mathbb{R}, \quad \beta > 1$$

$$t = 0, 1, 2, \dots$$

(۲۳)

اعمال ضرایب ∞ و ε و γ و دستیابی تطابق منحنی‌های با خطوط منقطع و پر در شکل ۱ را می‌توان با تنظیم کردن (tunning) همزمان مقادیر ∞ و ε و γ ، چه به صورت خودکار و چه به صورت دستی در قالب برنامه نرم‌افزاری رایانه‌ای عملی ساخت.

نظر گرفتن شرط امساک و معیار RMSE، مرتبه (۲ و ۳) به مثابه بهترین مرتبه انتخاب شد. در جدول ۱ برای نمونه ضرایب a ، b و RMSE برای بخشی از مرتبه‌های مطالعه شده آورده شده است.

در مرحله کالبنزی، رایانه با اعمال مقادیر صفر برای پارامترهای α ، ε و γ از راه حداقل کردن RMSE به جستجوی مناسب‌ترین ضرایب a_i و b_i پرداخته است. نتایج حاصل از این مرحله در شکل ۵ نشان داده شده است.

مرحله شبیه‌سازی به دو صورت عمل شده است، در حالت اول رایانه به‌طور خودکار و باز با مبنا قرار دادن RMSE، مقادیری را برای α ، ε و γ اعمال و متناسب با آن، ضرایب مدل را محاسبه خواهد کرد. نتیجه این مرحله در ستون آخر جدول ۲ و شکل ۶ ارائه شده است. دیده می‌شود چون در این مرحله همه رویدادها یک‌جا مورد نظر قرار گرفته است، نتیجه تفاوت بسیار معناداری با شکل ۵ نداشته است.

بررسی با توجه به یافته‌های یوسفی (۱۳۷۸) بازه زمانی مدل ۶۰ دقیقه منظور شده است.

برای کالبنزی مدل هر هشت رویداد پیش‌گفته که مجموعاً ۴۶۴ ساعت را در بر می‌گیرد، در حکم رویدادی منفرد در نظر گرفته شده است. در تعیین مرتبه مدل که در زنجیره تکرار صورت گرفته است توجیه پذیر بودن دینامیکی پاسخ ضربه، تطابق منحنی (reconvolution) با منحنی دیدبانی شده و سنجه آماری RMSE مورد نظر قرار گرفته است و نیز شرط امساک، نیز یعنی انتخاب کوچک‌ترین مرتبه در صورت وجود شرایط یکسان یا تقریباً یکسان نیز در آن اعمال شده است.

آنگونه که در بخش ۲-۳-۲ ذکر شده است تعداد پارامترهای a ، دو یا سه در نظر گرفته شد، لیکن محدودیتی در مورد تعداد پارامترهای b اعمال نشد. بررسی پاسخ ضربه مربوط به هر مرتبه نشان داد که نمودارهای پاسخ ضربه مرتبه‌های (۲ و *) هموار نیست. در مجموع با در

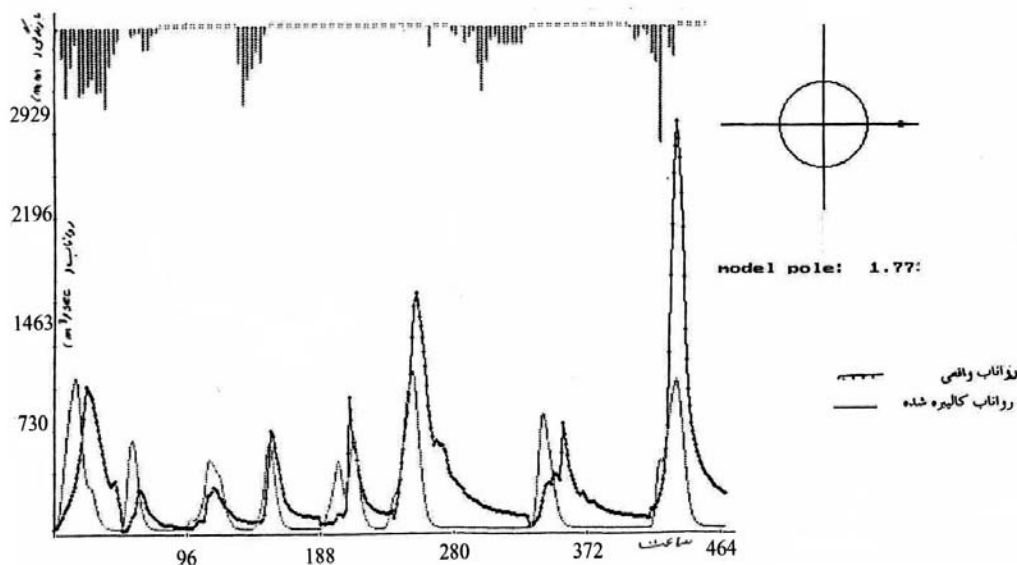
جدول ۱. مقادیر پارامترهای a و b برای برخی مرتبه‌های مطالعه شده.

الف- مقادیر a_i

a_3	a_2	a_1	(m,n)
۰/۱۷۹۴	-۰/۹۵۴۳	۱/۶۹۲۰	(۳ و *)
	-۰/۵۲۰۵	۱/۴۴۲۸	(۲ و *)

ب- مقادیر b_i و RMSE

مقدار RMSE	b_3	b_2	b_1	b_0	(m,n)
۳۹۱/۸				۱۳/۵۸۷	(۲ و ۰)
۴۲۰/۰				۱۲/۴۶۵	(۳ و ۰)
۳۷۱/۳			۹/۳۹۹۸	۶/۳۴۴۷	(۲ و ۱)
۴۰۰/۴			۹/۴۷۹۸	۵/۱۳۳۰	(۳ و ۱)
۳۴۹/۲		۱۱/۳۳۱	۲/۴۲۳۷	۴/۰۶۲۲	(۲ و ۲)
۳۷۷/۱		۱۱/۷۲۴	۲/۲۶۵۶	۲/۷۷۱۴	(۳ و ۲)
۳۳۸/۱	۶/۳۱۴	۷/۱۱۲۷	۱/۶۶۱۹	۳/۲۳۹۲	(۲ و ۳)
۳۶۵/۸	۶/۲۳۶	۸/۰۵۱۵	۱/۵۰۹۶	۱/۹۵۸۶	(۳ و ۳)



شکل ۵. منحنی دبی دیدبانی و برآورد شده در مرحله کالبزنی.

دست آمده است، عملی می‌شود. نتایج به دست آمده اجازه می‌دهد تا دبی واقعی و دبی پیش‌بینی شده برای چند گام بعدی مقایسه شود. در مرحله پیش‌بینی آخرین مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و بارندگی و مقادیر پیش‌بینی شده بارندگی برای زمان‌های آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نقطه شروع در مدل‌سازی بارندگی - رواناب از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بررسی نقطه شروع، زمان کمترین مقدار دبی دیدبانی شده پیش از شروع سیل در نظر گرفته شده است.

در انتخاب مدل شبیه‌سازی مشخص شده در مرحله قبل برای صدور پیش‌بینی، مدلی مناسب‌تر خواهد بود که شرایط پیشین آن با شرایط پیشین رویداد تحت بررسی یکسان باشد. این آگاهی در اینجا وجود نداشته است، اما استفاده از مدل حاصل از پردازش بر هر هشت رویداد مرحله کالبزنی و همین‌طور استفاده از هر کدام از مدل‌های حاصل از انطباق حداکثر جریان دیدبانی و برآورد شده رویدادهای تفکیکی، میسر بوده است.

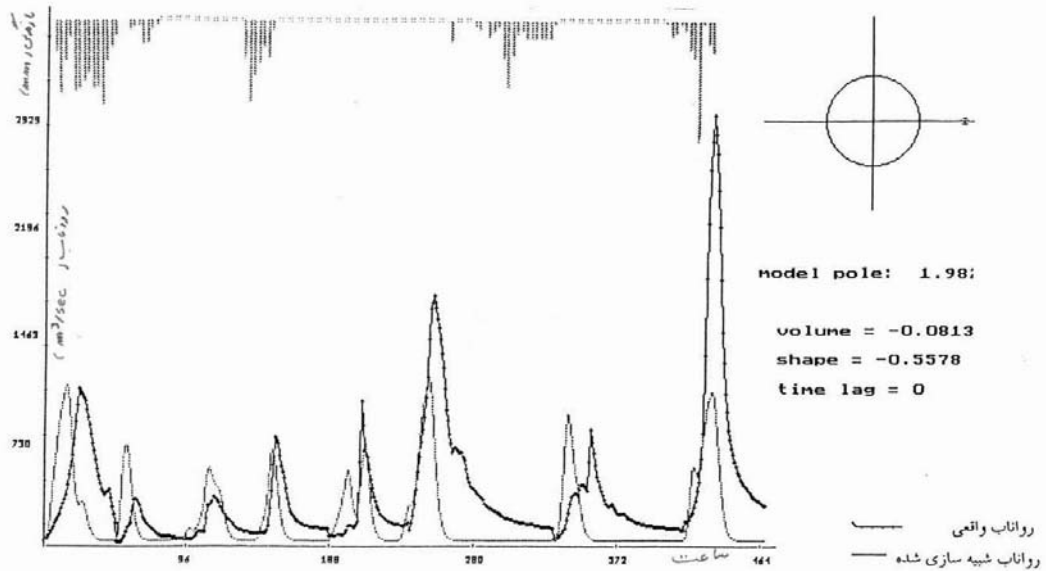
برای بررسی تأثیر انفرادی هریک از رویدادهای هشت‌گانه در مرحله دوم شبیه‌سازی حداکثر جریان دیدبانی و برآورد شده هر کدام از رویدادها به صورت غیرخودکار و با اعمال دید کارشناسی تطابق داده شدند. مقادیر فاکتورهای تعدیل سه‌گانه پیش‌گفته برای هر رویداد تفکیکی در ستون‌های ۱ تا هشتم جدول ۲ ملاحظه می‌شود و برای نمونه در شکل‌های ۷ و ۸ که به ترتیب حاصل انطباق مقادیر برآورد شده حداکثر بر حداکثر دیدبانی شده رویداد اول و هشتم است، عملکرد مدل بر رویدادهای دیگر نشان داده شده است. دیده می‌شود که اگرچه در این حالت درجه انطباق برای هر رویداد تفکیکی بسیار بهتر است، برای هفت رویداد دیگر، نتایج خیلی رضایت‌بخش نیست.

۳-۳ مرحله پیش‌بینی

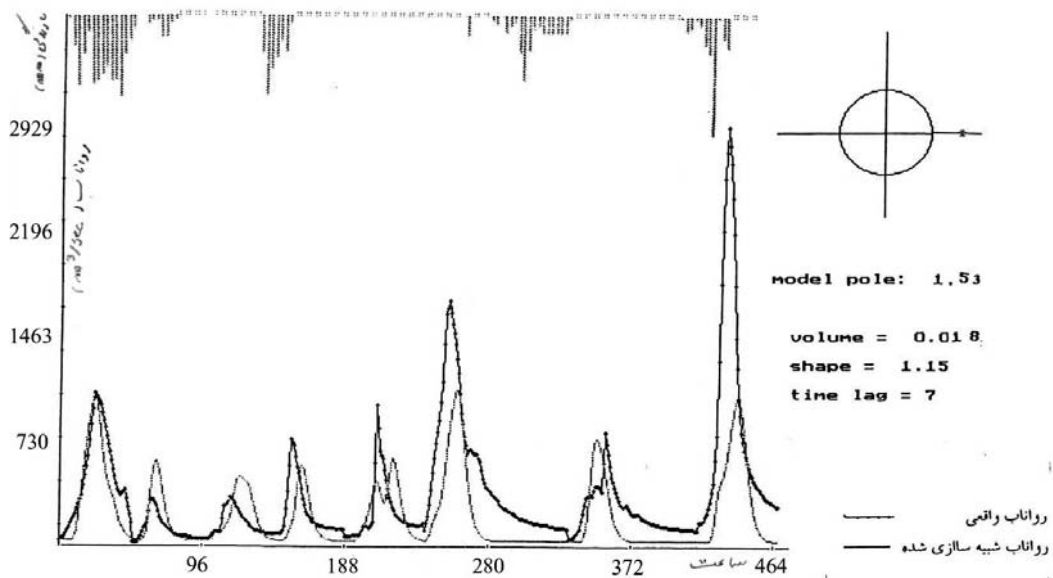
آخرین بخش مقاله مربوط به پیش‌بینی سیل است. این بخش به کمک داده‌های مرحله کالبزنی که قبلاً به

جدول ۲. مقادیر پارامترهای α ، ε و γ برای انطباق دبی بیشینه شبیه‌سازی با دبی بیشینه واقعی در مرحله کالبرنی.

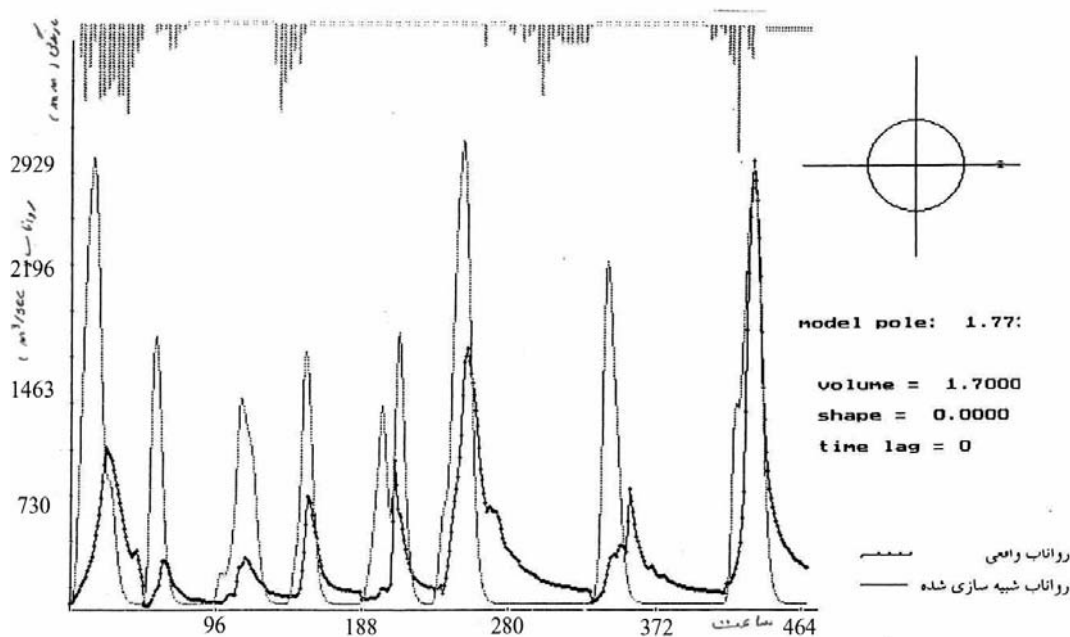
شماره حداکثر رویداد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	حالت خودکار
زمان γ	۷	۳	۰	۲	۱	۳	۱۰	۰	۰
حجم α	۰/۰۱۸	-۰/۳۵	۰/۳	۰/۰۹	۰/۱	۰/۵	۰/۳	۱/۷	-۰/۰۸۱
شکل ε	۱/۱۵	۲/۹	۱	-۰/۵	-۰/۵	۰/۳	۳	۰	-۰/۵۶



شکل ۶. منحنی دبی دیدبانی و برآورد شده در مرحله شبیه‌سازی خودکار.



شکل ۷. منحنی دبی دیدبانی و برآورد شده حاصل از انطباق دو حداکثر در رویداد اول.



شکل ۸. منحنی دبی دیدبانی و برآورد شده حاصل از انطباق دو حداکثر در رویداد هشتم.

است:

نتایج پیش‌بینی رویداد اول که در ساعت ۱۰ صبح روز بیست و ششم آذر ۱۳۶۴ رخ داده است به ترتیب با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده حاصل از انطباق حداکثر جریان دیدبانی و برآورد شده رویداد اول مرحله کالبنزی به تاریخ هشتم بهمن ۱۳۶۰، رویداد دوم مرحله کالبنزی به تاریخ بیست و سوم آذر ۱۳۶۱ و رویداد سوم به تاریخ بیستم دی ۱۳۶۱ در شکل‌های ۹-الف تا ۹-ج نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی رویداد اول به کمک پارامترهای تغییر حداکثر دوم و سوم داده‌های کالبنزی شکل‌های ۹-ب و ۹-ج دیده می‌شود که پیش‌بینی قبل از بیشینه جریان با واقعیت مشاهده شده تفاوت دارد، در حالی که پیش‌بینی پس از وقوع مناسب بوده و به جریان مشاهده شده نزدیک است. پیش‌بینی‌های همین رویداد با استفاده از پارامترهای تغییر حداکثر اول شکل ۹-الف اساساً با واقعیت تفاوت دارند.

در این مقاله برای جامعیت بخشیدن به اهداف مقایسه‌ای عملکرد مدل، سه مدل شبیه‌سازی شده از انطباق جریان دیدبانی و برآورد شده بر حداکثر رویدادهای اول تا سوم مرحله کالبنزی انتخاب و حاصل عملکرد هر کدام برای پیش‌بینی رویدادهای چهارگانه با هم مقایسه شده است.

از آن‌جا که ارائه پیش‌بینی برای همه ساعت‌های رویدادهای چهارگانه در هم‌شدگی خطوط پیش‌بینی را به همراه دارد و تشخیص آنها را با مشکل مواجه می‌کند، پیش‌بینی‌ها برای هر رویداد فقط برای شش زمان انتخابی متفاوت صورت گرفته است. حداقل دو زمان پیش از بیشینه جریان، یک زمان در محدوده بیشینه جریان و دو زمان بعد از آن انتخاب شده است. ولی نتایج خطای مدل برای همه زمان‌های هر رویداد نیز محاسبه شده و که در جدول ۳ آمده است.

در زیر، نتیجه پیش‌بینی حاصل از مدل، به تفکیک هر کدام از رویدادهای چهارگانه به اختصار تشریح شده

است، با استفاده از مدل‌های اول تا سوم مرحله کالبنزی به ترتیب در شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۰-ج نشان داده شده است. دیده می‌شود که در پیش‌بینی حاصل از رویداد دوم مرحله کالبنزی شکل ۱۰-ب کلیه پیش‌بینی‌های قبل و بعد از وقوع حداکثر جریان با واقعیت مشاهده شده تطابق خوبی دارند. در شبیه‌سازی این رویداد به کمک پارامترهای تغییر حداکثر اول (شکل ۱۰-الف)، پیش‌بینی‌های قبل از وقوع حداکثر جریان مناسب بوده ولی پیش‌بینی‌های بعد از وقوع تطابق چندانی ندارند. همچنین در شبیه‌سازی این رویداد با پارامترهای تغییر حداکثر سوم، چون اساساً تأخیر زمانی در شبیه‌سازی لحاظ نشده است، پیش‌بینی‌ها در هیچ‌یک از حالات مناسب نیست. اما برعکس اگر خطای همه پیش‌بینی‌های حاصله از رویداد ۲ را به شرح جدول ۳، صرف‌نظر از انطباق حداکثر جریان دیدبانی و پیش‌بینی شده مورد توجه قرار دهیم، رویداد شماره ۳ مرحله کالبنزی نتایج رضایت‌بخش‌تری را نشان می‌دهد.

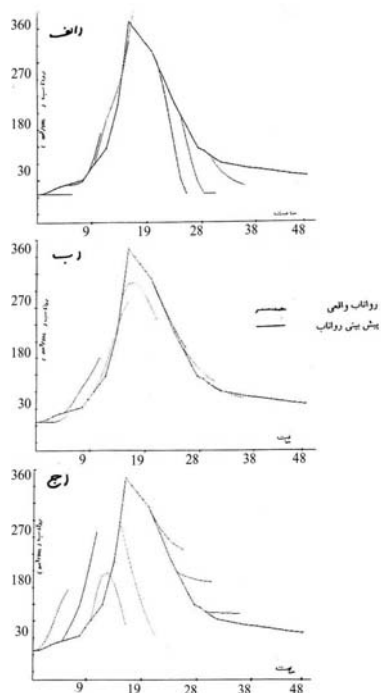
در شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-ج نتایج پیش‌بینی رویداد سوم که در ساعت یک بامداد دوازدهم آذر ۱۳۶۸ اتفاق افتاده، باز هم به کمک مدل‌های حاصل از شبیه‌سازی رویدادهای اول تا سوم مرحله کالبنزی نشان داده شده است. در هر سه شبیه‌سازی این رویداد که رویدادی با دو اوج است، پیش‌بینی جریان فقط پیش از شکست اول (نقطه‌ای در منحنی دبی که در آن از سرعت صعود جریان کاسته می‌شود) مناسب است. در اینجا نیز با توجه به جدول ۳ ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن کلیه پیش‌بینی‌های حاصل از رویداد شماره ۳، نتایج حاصل از رویداد ۳ مرحله کالبنزی در تمامی پیش‌بینی‌های یک تا هفت گام به جلو بهتر بوده است که این خود از مشابهت نسبی رویداد تحت پیش‌بینی با رویداد مرحله کالبنزی حکایت دارد. بدیهی است که نتیجه به‌دست آمده را نمی‌توان به رویدادهای آتی تعمیم داد.

در جدول ۳ نیز مقادیر $RMSE(1)$ تا $RMSE(7)$ که به ترتیب مقادیر ریشه مربعات خطای پیش‌بینی یک گام تا هفت گام به جلو برای ساعت‌های متفاوت رویدادهای چهارگانه مرحله پیش‌بینی است، به تفکیک هر رویداد مرحله پیش‌بینی و هر حداکثر رویدادهای سه‌گانه مرحله کالبنزی داده شده است. دیده می‌شود که اگر همه پیش‌بینی‌های حاصل برای رویداد شماره یک را منظور کنیم، رویداد شماره ۳ مرحله کالبنزی در مجموع پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به دو رویداد شماره ۱ و ۲ ارائه داده است.

جدول ۳. مقادیر خطا در پیش‌بینی یک تا هفت گام به جلو.

شماره رویداد پیش‌بینی	شماره رویداد مرحله کالبنزی			
	۱	۲	۳	۴
۱	۵۲/۷	۱۰۷/۶	۵۰۴/۱	۳۷۵/۶
	۱۰۸/۷	۱۵۵/۹	۶۷۳/۴	۷۲۲/۸
	۱۳۳/۳	۱۹۶/۸	۷۴۴/۰	۹۷۳/۲
	۱۳۶/۶	۲۳۶/۷	۷۸۵/۴	۱۰۶۱/۰
	۱۵۸/۸	۲۴۸/۵	۸۰۱/۸	۱۰۹۱/۴
	۱۷۵/۱	۲۵۳/۶	۷۹۵/۰	۱۱۰۴/۴
۲	۱۸۰/۸	۲۵۹/۴	۷۸۲/۱	۱۱۱۸/۵
	۴۰/۲	۹۳/۶	۴۶۹/۳	۳۳۵/۵
	۹۶/۱	۱۲۵/۱	۶۰۷/۱	۶۴۴/۴
	۱۱۸/۲	۱۴۹/۴	۶۴۱/۷	۸۷۲/۴
	۱۱۵/۵	۱۶۹/۱	۶۲۲/۲	۹۴۹/۱
	۱۱۶/۳	۱۷۸/۸	۶۶۸/۰	۹۷۵/۹
۳	۱۱۶/۲	۱۷۸/۲	۶۵۸/۸	۹۶۹/۲
	۱۱۶/۲	۱۷۷/۴	۶۴۹/۴	۹۵۹/۶
	۳۴/۳	۷۹/۶	۴۴۱/۲	۳۱۷/۴
	۷۳/۵	۱۰۸/۴	۵۵۷/۱	۵۹۷/۰
	۹۶/۳	۱۳۳/۴	۵۸۰/۵	۷۹۸/۷
	۱۰۲/۴	۱۴۴/۳	۵۹۱/۶	۸۵۷/۹
	۱۰۶/۰	۱۵۹/۲	۶۰۸/۳	۸۸۰/۶
	۱۰۱/۹	۱۶۵/۴	۶۱۷/۳	۸۶۷/۵
	۹۴/۸	۱۷۲/۳	۶۲۴/۶	۸۵۰/۲

حاصل عملکرد مدل برای پیش‌بینی رویداد دوم که در ساعت یک بامداد بیست و هشتم دی ۱۳۶۱ رخ داده



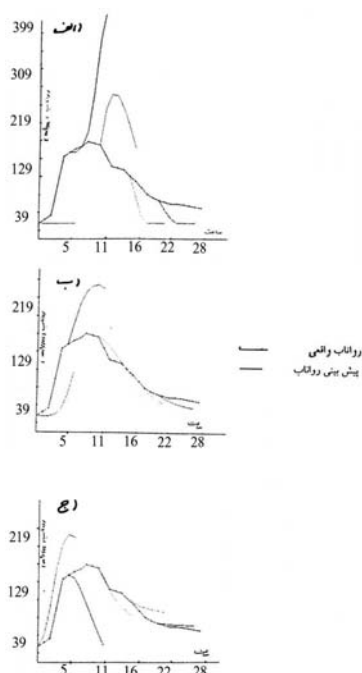
شکل ۱۰. نتایج پیش‌بینی رویداد دوم.

الف - به کمک رویداد اول ب - به کمک رویداد دوم ج - به کمک رویداد سوم

روش آماری و دینامیکی برای مدل‌سازی فرایند بارندگی و رواناب وجود دارد. گرچه در این بررسی روش آماری به کار رفته است، با بسط ریاضی بخش‌های مختلف مدل، نتیجه نهایی از توجیه دینامیکی برخوردار است.

فرایند بارندگی - رواناب پدیده‌ای غیرخطی و متغیر با زمان است. بنابراین استفاده از مدل تابع انتقال ایستا که خطی و ثابت با زمان است موجب بروز خطا می‌شود. برای به حداقل رساندن خطا در مدل دینامیک مقاله حاضر برای استفاده در زمان حقیقی سه پارامتر حجم، شکل و زمان بر پاسخ ضربه مدل تابع انتقال معرفی و اعمال شده است. سه پارامتر یاد شده با بسط مناسب ریاضی و توجه به فیزیک پدیده تحت بررسی معرفی و محاسبه شده‌اند.

با به کارگیری مثال‌های واقعی، دقت عملکرد هر کدام از پارامترها مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است



شکل ۹. نتایج پیش‌بینی رویداد اول.

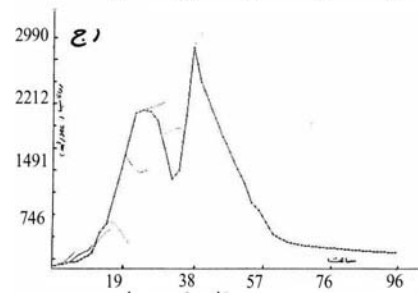
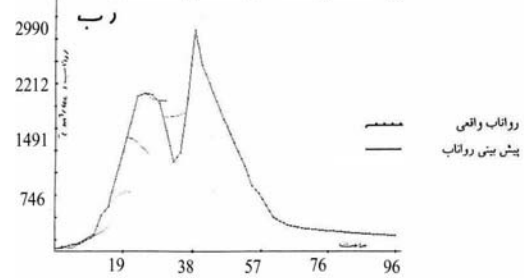
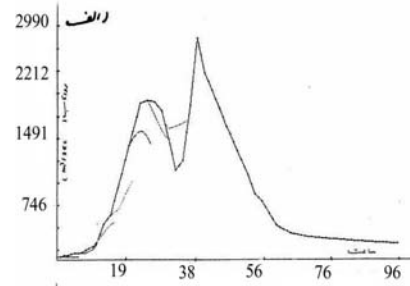
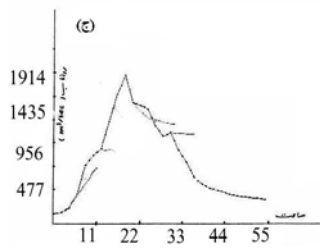
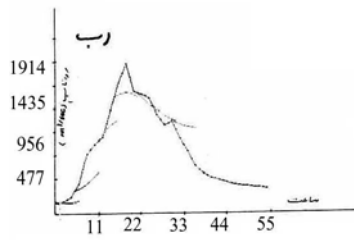
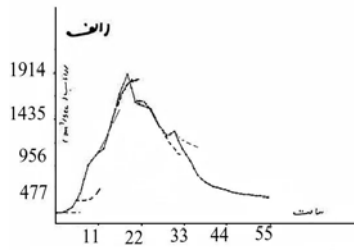
الف - به کمک رویداد اول ب - به کمک رویداد دوم ج - به کمک رویداد سوم

بالاخره نتایج پیش‌بینی برای رویداد چهارم تحت بررسی که در ساعت ۱۸ روز چهاردهم اسفند ۱۳۶۹ رخ داده است به ترتیب با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده رویدادهای اول تا سوم مرحله کالبرنی در شکل‌های ۱۲ - الف تا ج نشان داده شده است.

دیده می‌شود که شبیه‌سازی با حداکثر اول در مجموع مناسب است ولی در دو حالت دیگر با وجود داشتن RMSE کمتر، کیفیت پیش‌بینی نزول کرده است. از دیدگاه ملاحظه خطای همه پیش‌بینی‌های یک تا هفت گام به جلو به شرح جدول ۳، نتایج حاصل از رویداد شماره ۳ مرحله کالبرنی برای این رویداد نیز از دو رویداد دیگر بهتر بوده است.

۴ نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش‌های پیشین یاد شد، از جمله دو



شکل ۱۱. نتایج پیش‌بینی رویداد سوم.

الف - به کمک رویداد اول ب - به کمک رویداد دوم ج - به کمک رویداد سوم

شکل ۱۲. نتایج پیش‌بینی رویداد چهارم.

الف - به کمک رویداد اول ب - به کمک رویداد دوم ج - به کمک رویداد سوم

کرد. پارامتر تغییر شکل (ε) تلفیقی از بزرگی جریان و زمان وقوع آن است. با بسط ریاضی مناسب، رابطه‌ای کاربردی برای تغییر دادن این پارامتر معرفی شده و به کار رفته است. در نهایت، پارامتر زمان در این مدل معرفی شده است. اهمیت این پارامتر، با توجه به اهمیت زمان پیش‌بینی جریان حداکثر، مشخص می‌شود.

قابلیت تغییرپذیری خودکار و دستی این پارامترها در نرم‌افزارهای معرفی شده، طراحی شده است. دقت عمل نسبی و قابلیت این قسمت از مدل نیز در چارچوب مثال‌های کاربردی در متن آزمون شده است. امکانات تصویری زمان حقیقی مدل معرفی شده از جمله قابلیت‌های

که پارامترهای انتخابی در بالا بردن کیفیت پیش‌بینی حاصل از مدل دینامیک مؤثرند. از این میان پارامتر تغییر حجم که در تغییر ضریب جریان (بخشی از بارندگی مؤثر در رواناب) نقش دارد و در طی رویداد نیز دستخوش تغییر می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که در ابتدای هر رویداد معمولاً بخش اعظم بارندگی به اعماق نفوذ می‌کند و فقط بخش اندکی از آن جریان می‌یابد. با پیشرفت رویداد این روند عکس می‌شود، به طوری که در ادامه، مقدار α افزایش می‌یابد. از این نظر در مدل طراحی شده شرایطی فراهم آمده تا بتوان با پیشرفت رویداد، به‌طور مرتب مقدار پارامتر تغییر حجم را تعدیل

منابع

- تماب، ۱۳۷۹، مهندسين مشاور وابسته به وزارت نیرو، بانک اطلاعات.
- رفیعی، م.، ۱۳۷۹، طراحی یک مدل نیمه فیزیکی زمان واقعی پیش‌بینی سیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هوشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- مشکانی، م.، ۱۳۷۱، تحلیل سری‌های زمانی، پیش‌بینی و کنترل. دانشگاه شهید بهشتی، جلد اول و دوم ۷۲۷ صفحه.
- مهدوی، م.، ۱۳۷۸، مدیریت سیل، مرحله اول. برنامه عمران ملل متحد و وزارت کشور، ۱۰۰ صفحه.
- یوسفی، ن.، ۱۳۷۸، طراحی یک مدل بهنگام پیش‌بینی سیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هوشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Beven, k. J., 2001, Rainfall-runoff modelling. Wiley, 360.
- Bishop, R., and Watt, W. E., 1989, Development of an expert system for selection of flood forecasting method. Can: Water resour., 14, 5-17.
- Box, G. E. P., and Jenkins, G. M., 1976, Time series analysis, forecasting and Control. Holdenday. 553.
- Dent, J., 2003, Forecasting precipitation from the flood hydrologist's perspective. Meteorology and hydrology-towards closer collaboration. Weather, 58, 92-93.
- Krzysztofowicz, R., 1995, Recent advances associated with flood forecasting and warning systems. Reviews of Geophysics, Supplement, 1139-1147.
- Marsh, T., 2001, The 2000/01 flood in the UK-a brief overview. Weather, 56, 343-345.
- Mylne, k., 2003, Recent advances in probabilistic forecasting. Meteorology and hydrology-towards closer collaboration. Weather, 58, 92-93.
- Nemec, J., 1986, Hydrological forecasting. D. Reidel publishing Co. 239.
- WMO, 1992, Simulation real-time inter-comparison of hydrological models. WMO No. 779, operational hydrology report No. 38.
- Yapo, P., and Sorooshian, S., 1993, A Markov chain flow model for flood forecasting: WRR J., 29, 2427-2436.

نرم‌افزار طوری طراحی شده است که کاربر را قادر می‌سازد با توجه به تغییرات مختلف آن تصمیمات مقتضی را اخذ کند و در جهت بالابردن دقت پیش‌بینی عمل نماید. در ارزیابی نتایج حاصل از این مدل اولاً می‌باید به این نکته توجه کرد که همه مدل‌های بارندگی - رواناب توصیفی ناکامل از فرایند پیچیده غیرخطی بارندگی - رواناب به دست می‌دهند و در پیش‌بینی دقیق مقدار رواناب ناتوان‌اند (بون، ۲۰۰۱) و در ثانی باید خطاهای ناشی از اندازه‌گیری باران و دبی در سطح کشور را نیز در عملکرد هر مدل و خطای آن مورد نظر قرار داد. نتیجه کلی این که مدل معرفی شده را حداقل از دیدگاه نخستین بررسی‌ها و با توجه به امکانات موجود در کشور می‌توان در شمار گزینه‌های مناسب ارزیابی کرد. در عین حال می‌توان در حوضه‌های اصلی و معرف کشور با تشکیل بانک اطلاعات غنی و با در نظر گرفتن شرایط پیش از وقوع هر رویداد، آنها را دسته‌بندی و هر دسته را مستقلاً کالبرنی نمود. بدیهی است در این صورت با در دست داشتن شرایط پیشین یک رویداد در حال وقوع و مراجعه به بانک اطلاعاتی یاد شده و یافتن رویداد نسبتاً مشابه آن در گذشته و استفاده از مدل خاص آن رویداد، می‌توان نتایج پیش‌بینی را بهتر کرد. افزون بر این با اجرای مدل به صورت نیمه توزیعی در حوضه‌هایی که امکان تقسیم آن به چند زیر حوضه وجود دارد، مدل مناسب برای هر زیر حوضه را معرفی کرد و در نهایت از ترکیب نتایج این مدل‌ها، پیش‌بینی نهایی را برای حوضه کلی به دست داد.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، به لحاظ کمک مالی در قالب طرح تحقیقاتی "طراحی یک مدل آماری و تمام تصویری زمان واقعی پیش‌بینی سیل" به شماره ۶۵۱/۱/۴۵۶ سپاسگزاری می‌شود