تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهارم، شماره ۲، پائیز ۱۳۸۷
Volume 4, No. 2, Fall 2008 (IR-WRR)
۳۵-۴۵

پردازش غیر خطی سیگنال‌های فرآیند پویای بارش ـ رواناب به روش اطلاعات محور سببی (مطالعه موردی حوضه خرسان)

نوید جلال کمالی[۱] و حسین صدقی[۲]

چکیده

بخش عمده‌ای از تحقیقات هیدرولوژی بر مدل‌سازی فرایند پویاوغیرخطی بارش ـ رواناب متمرکزاست. تبدیل بارش به رواناب در عرصه حوضه به طور قطع شامل روابط غیر خطی پیچیده‌ای است که حاصل تعامل مجموعه‌ای از فرآیندهای هیدرولوژیکی مختلف می‌باشند. به این لحاظ به نظر می‌رسد که مدل‌سازی استوکاستیک فرایند نسبت به مدل‌سازی قطعی آن منطقی‌تر است. در این تحقیق جهت اجتناب از به کارگیری فرضیات اثبات نشده و بعضا گمراه‌کننده در جداسازی سری‌های زمانی بارش و رواناب به مؤلفه‌های مجزای بارش مازاد و رواناب مستقیم، بارش کل در مقابل رواناب کل مدل گردید.

استفاده از مدل تابع انتقال با یک متغیر ورودی (بارش) و یک متغیر خروجی (رواناب) ، انتقال آن به سیستم معادلات فضای حالت و نهایتا بهره‌گیری از روش استوکاستیک مدل‌سازی اطلاعات محور سببی مبتنی بر آلگوریتم برگشتی صافی کالمن، برخورد این تحقیق در شناسایی رابطه غیرخطی بین بارش ورواناب بوده است. رهیافت فوق بر حوضه خرسان از زیرحوضه‌های اصلی کارون بزرگ اجرا گردید. برقراری تناسب بین پارامترهای واسنجی شده و خصوصیات روندیابی جریان در حوضه، آشکارکننده یک طبیعت موازی محتمل در این زیرحوضه بود. نهایتا جهت کمی سازی اعتماد پذیری مدل شناسایی شده ، تحلیل حساسیت براساس روش شبیه سازی مونت کارلواجرا گردید.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات محور سببی، فرآیند بارش، رواناب، مدل‌های مخازن خطی، فرآیند جریان موازی، تخمین زمانی پارامترهای وابسته حالت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۱ شهریور ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۹ آبان ۱۳۸۷

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان.
۲- استاد هیدرولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات، تهران

Non-Linear Signal Processing of Rainfall-Runoff Process Using Data-Based Mechanistic Modeling (DBM)
Case Study: Khersan Basin

N. jalalkamali [1] and H. Sedghi [2]

Abstract

There were many hydrological researches focused on dynamic and linear modeling of rainfall-runoff process.

Conversion of rainfall data to runoff consists of nonlinear complex relationships which are resulted from interactions of different sets of hydrological process. The stochastic modeling is therefore seems to be more sensible in this estimate than deterministic ones.

In this research observed runoff is modeled against total rainfall. This will mainly avoid misleading theories in breaking the rainfall and runoff time series into the excess rainfall and the direct runoff time series,.

A Transfer Function (TF) model with single input and single output variable (SISO) is used in this research. This function is transferred to the state space equations. The stochastic Data-Based Mechanistic modeling (DBM) method relying upon recursive Kalman filtering algorithm is then used to identify the non-linear relationship between rainfall and runoff.

This approach is applied to the Khersan sub basin in the Great Karun catchment south western Iran. The relation between the calibrated parameters and the routine characteristics of the basin flow showed a probable parallel structure of flow routine in this sub basin.

Finally the sensitivity analysis is performed using the Monte Carlo Simulation (MCS) in order to quantify the reliability of the model.

***Keywords*:** Data-Based Mechanistic Modeling, Rainfall-Runoff Process, Linear Store Models, Parallel Flow Process, Time Variable and State Dependent Parameter Estimation.

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran,
Email: njalalkamali@yahoo.com
2- Professor, Department of Irrigation, College of Agriculture, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran,
Email: hsedgh@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌های پیش روی علم هیدرولوژی، مدل‌سازی فرآیند بارش ـ رواناب در مقیاس تک واقعه‌ای می‌باشد. حجم بسیار بالای متون علمی منتشر شده و نیز تحقیقات در دست انجام در این زمینه مؤید مطلب مذکور است. با توجه به عدم وجود یک برخورد یکسان که مورد پذیرش همه محققین باشد، انجام تحقیقات اضافی و تکمیلی در این راستا کاملاً موجه به نظر می‌رسد.

عوامل خطا حاکم بر اینگونه مدل‌ها را می‌توان در یکی از سه دسته کلی زیر گنجاند Beven (2001). ۱- خطا در ساختار فرضیات مدل ۲- عدم امکان تعیین دقیق شرایط اولیه و مرزی سیستم حوضه‌ای ۳- عدم امکان اندازه‌گیری بدون خطای مشاهدات.

در عمده رویکردهای مدل‌سازی با تکیه بر فلسفهٔ قیاس کل به جزء[1] فرض می‌شود که معادلات ارائه شده به خوبی توانایی تشریح رفتار سیستم را دارند در حالی که با توجه به ساده‌سازی‌های اعمال شده در استخراج این معادلات فرض مذکور منجر به خطا در ساختار مدل می‌گردد. در مقابل در این تحقیق راه کار متکی بر قیاس جزء به کل[2] پیش گرفته شده است. در این راه کار تلاش می‌گردد که فرضیات اولیه در مورد سیستم در حداقل ممکن نگه داشته شود و صرفا براساس مشاهدات ثبت شده، تعاملات حاکم بر سیستم استنتاج گردد.

در سالهای اخیر، استفاده از مدل‌های جعبه سیاه متکی بر آلگوریتم‌های جدید بهینه سازی حجم عمده تحقیقات در این بخش را به خود اختصاص داده است Wagener (2004) همچنین به نظر می‌رسد ارتباط پارامترهای واسنجی شده یک مدل با فیزیک مسئله یا به عبارت دیگر وجود تفسیری فیزیکی از پارامترها یک ضرورت به شمار می‌رود. مدل‌های جعبه سیاه فاقد چنین خصوصیتی هستند. از طرف دیگر بهره‌گیری از مدل‌های با مبنای فیزیکی نیز دارای محدودیتهای خاص خود می‌باشد. یکی از مهمترین آنها خطا به علت ساده‌سازی‌های اعمال شده بر معادلات حاکم بر پدیده‌های فیزیکی حوضه است ودیگری نیاز این مدل‌ها به حجم زیادی از اطلاعات مشاهداتی است Beven (2001).

رویکرد این مطالعه که تحت عنوان روش مدل‌سازی اطلاعات محور سببی[3] (DBM) شناخته می‌شود،رویکردی متفاوت است که در آن بدون اتکاء به ساختاری از پیش تعیین شده، خصوصیات خطی و غیرخطی رابطه بین متغیر ورودی و خروجی سیستم صرفاً بر اساس طبیعت اطلاعات ثبت شده استخراج می‌گردد ضمن آنکه تلاش شده که تفسیری فیزیکی از پارامترهای استخراج شده نیز ارائه گردد.

۲- آماده‌سازی اطلاعات

اطلاعات ثبت شده در حوضه خرسان یکی از زیرحوضه‌های کارون بزرگ درمطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. رودخانه خرسان از ارتفاعات دنا در بخش جنوبی حوضه کارون سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیری حدود سیصد کیلومتر در محل بارز در ۶۰ کیلومتری بالادست پل شالو به کارون می‌پیوندد. حوضه آبریز این رودخانه به وسعت بیش از ۹۰۰۰ کیلومترمربع بخش‌هایی از استان‌های اصفهان، کهکیلویه و بویراحمد و فارس را پوشش می‌دهد. قلل مرتفع این حوضه بخش قابل ملاحظه‌ای از رطوبت انتقالی را عمدتا به صورت برف دریافت می‌دارند صدقی(۱۳۷۱). شکل (۱) حوضه خرسان همراه با موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

شکل ۱- حوضه خرسان همراه با ایستگاههای مورد استفاده

از آنجا که تحلیل سیلاب‌های منفردی که حاصل نزول یک بارش حداکثر چند روزه هستند به هیچ وجه همه جنبه‌های رفتاری مختلف سیستم حوضه‌ای را در پاسخ به سیگنال‌های بارش تحریک نمی‌کنند به این لحاظ در این مطالعه یک دوره ۱۹ روزه متشکل از دو واقعه متوالی طوفان در اسفند ۱۳۷۶ و فروردین ۱۳۷۷ انتخاب گردید. توالی دو واقعه حدی مذکور در فاصله چند روز این امکان که اثرات افزایش ذخیره‌ای حوضه در طول واقعه اول، در واقعه دوم بروز نماید و لذا این اثر در مدل‌سازی دیده شود را فراهم می‌آورد.

در این تحقیق توزیع مکانی بارش بر مبنای گزارش جامعی که توسط دکتر صدقی و همکاران (۱۳۷۹) ارائه شده، استخراج گردید. در مطالعهٔ مذکور با انتخاب ۱۵۰ ایستگاه باران‌سنجی در محدودهٔ حوضهٔ کارون و مجاور آن وبازسازی اطلاعات بارش در ۱۶۶نقطه کمکی دیگر با استفاده از روابط رگرسیونی خطوط همباران روزانه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ترسیم گردیده بود. این خطوط مرجع استخراج توزیع مکانی بارش این تحقیق قرارگرفتند.

Archive of SID
www.SID.ir

توزیع زمانی بارش معرف حوضه بر اساس اطلاعات ۶ ایستگاه مجهز به باران نگار که دارای اطلاعات ثبت شده مورد نیاز این تحقیق بوده‌اند استخراج گردید . (جدول ۱)

جدول ۱- ایستگاههای مورد استفاده در استخراج توزیع زمانی رگبارمعرف حوضه

ایستگاه	یاسوج	حنا	پاتاوه	آلونی	لردگان	باغ ملک
طول جغرافیایی	۳۶° ۵۱´	۴۳° ۵۱´	۱۵° ۵۱´	۰۴° ۵۱´	۴۹° ۵۰´	۵۲° ۴۹´
عرض جغرافیایی	۳۹° ۳۰´	۱۱° ۳۱´	۵۷° ۳۰´	۳۲° ۳۱´	۳۱° ۳۱´	۳۲° ۳۱´
ارتفاع(متر)	۱۸۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰۰	۱۸۸۰	۱۵۸۰	۶۷۵

جهت وزن دهی توزیع زمانی بارش ثبت شده در هر ایستگاه ، دو روش پلی‌گون‌های تیسن وروش عکس مربع فاصله[۴] مقایسه گردیدند و روش عکس مربع فاصله انتخاب شد. معیار انتخاب میزان هم تغییری سری زمانی بارش معرف حاصل از هر یک از این روشها با سری زمانی رواناب بود. (شکل ۲)

۳- رویکرد مدل‌سازی اطلاعات محور سببی (DBM)

رویکرد مدل‌سازی اطلاعات محور سببی و کاربرد آن به طور مفصل در مراجع زیر تشریح گردیده است. [Beven (2001) ، Young (2001) ، Young (2002a)].

این روش مبتنی بر فلسفه استنتاج جزء به کل و با نگه داشتن فرضیات اولیه در حداقل سطح ممکنه، کم پارامترترین ساختار مدل از نوع مفهومی[۵] را متکی بر تحلیل اطلاعات ثبت شده ارایه می‌نماید. در این روش هیچ فرض اولیه‌ای برای ساختار مدل در نظر گرفته نمی‌شود جز آن که از توابع عمومی انتقال خطی[۶] برای نسبت دادن بارش به رواناب بهره‌گیری خواهد شد. هر تابع انتقال توسط سه گانه δ [m,n, δ] شناخته می شود که در آن δ تعداد بازه‌های زمانی تاخیر ورودی نسبت به خروجی مدل و m,n درجه چند جمله‌ای‌های تاخیرانداز می‌باشند.

تحلیل‌های ریاضی این روش برمبنای بهره‌گیری از قدرت روشهای برگشتی صافی کردن[۷] استوار است که در آن به جای تخمین ایستای پارامترها در طول بازه زمانی مشاهداتی، به پارامترهای مدل اجازه تغییر در زمان داده می‌شود. در این روش با فرض تبعیت تغییرات زمانی هر پارامتر برمبنای فرایند گام برداری تصادفی[۸] و سپس اعمال آلگوریتم‌های صافی روبه جلوبرگشتی[۹] و آلگوریتم برگشتی روبه عقب هموارسازی در بازه زمانی ثابت[۱۰] (FIS) پارامترهای مدل به صورت متغیرهای وابسته به زمان تخمین زده می‌شوند. چنانچه تغییرات یکی از پارامترهای مدل در مقایسه با عناصر دیگر خیلی کوچک باشد می‌توان چنین استنتاج نمود که تغییرات زمانی پارامتر مذکور کوچک بوده یا اصولاً دارای تغییرات زمانی نیست. معیار سنجش تغییرات زمانی پارامترها ، کوواریانس بخش اغتشاش خالص فرایند گام‌برداری تصادفی است که تحت نام نسبت واریانس اغتشاش[۱۱](NVR) شناخته می‌شود. بعلاوه نحوه تغییرات زمانی پارامترها ونیز تغییرات آنها در مقابل تغییرات سایر متغیرهای حالت سیستم آشکار کننده خصوصیات خطی یا غیر خطی رابطه متغیرهای ورودی وخروجی سیستم بوده ودر استخراج رابطه نهایی تبدیل بارش به بارش موثر وسپس رواناب قابل استفاده می باشند .

در این روش عدم اطمینان متناظر با پارامترهای مدل توسط ماتریس کوواریانس خطا کمی می‌شود. ماتریس مذکور در تحلیل حساسیت مدل به روش‌های شبیه‌سازی عددی نظیر روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو[۱۲] که تاحدودی توصیف کننده عملکرد مدل است استفاده می‌شود .

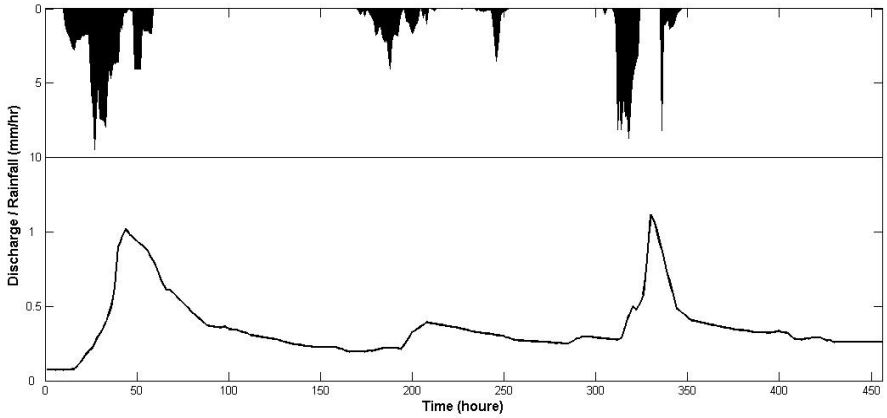
۴- استخراج مدل

۴-۱- شناسایی مدل اولیه تابع انتقال

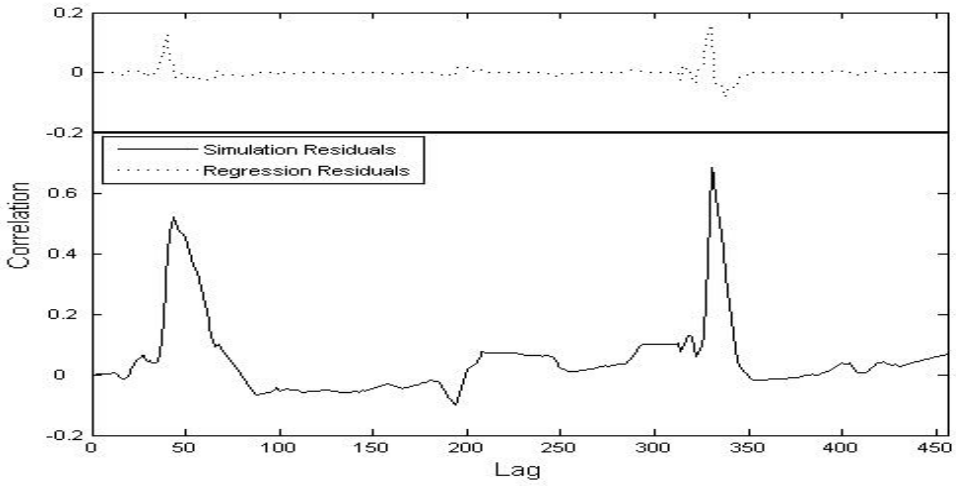
در این مرحله کم پارامترترین مدل تابع انتقال (TF) (از مرتبه یک یا حداکثر دو) برای شناسایی و ردیابی روابط غیرخطی بین ورودی و خروجی سیستم استخراج می‌گردد. روش کلی در انتخاب بهترین مرتبه مدل (TF) آزمون ترکیب‌های مختلف ممکن از مراتب سه گانه و سپس انتخاب ترکیب بهینه با اتکاء به معیارهای نیکویی برازش است. معیارهای عددی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از ضریب تعیین شبیه سازی (R^2_T) و معیار اطلاعات یانگ[۱۳] (YIC). پارامترهای توابع انتقال نیز با استفاده از روش متغیرابزاری پالایش شده[۱۴] (SRIV) Young et al. (2004) تخمین زده می‌شوند.

با عنایت به مطالب فوق مدل (TF) با مرتبه [۲ ۱ ۱] و معیارهای R^2_T = ۰/۶۷۹ و YIC = −۸/۵۱ به عنوان بهترین مدل اولیه انتخاب گردید. اشکال (۳) و (۴) به ترتیب مانده‌ها وتوابع خود همبستگی (ACF) وخود همبستگی جزئی (PACF) سری زمانی مانده‌های پاسخ شبیه سازی ورگرسیون مدل را نشان می‌دهند.

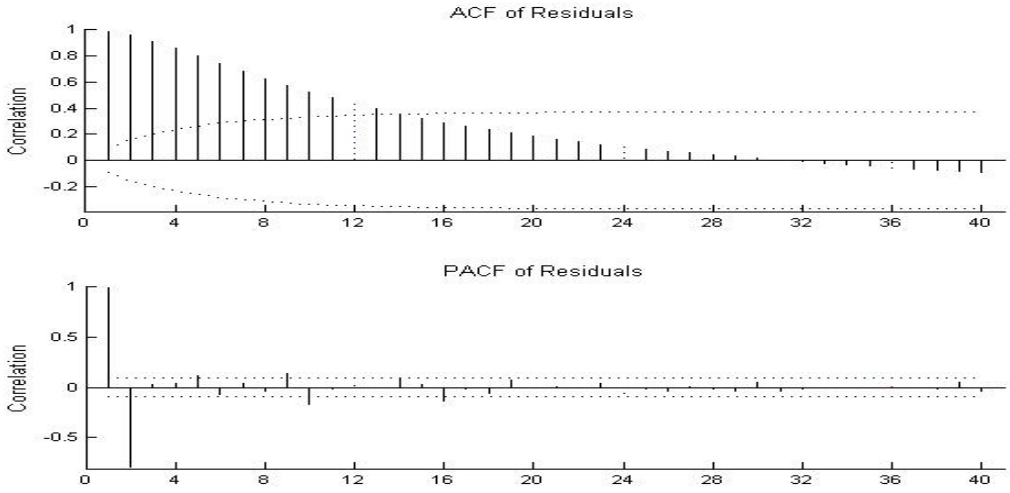
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- سری‌های زمانی بارش معرف– رواناب – حوضه خرسان – ۲۶ اسفند ۱۳۷۶ الی ۱۵ فروردین ۱۳۷۷



شکل ۳- سری زمانی مانده‌ها – بالا : پاسخ رگراسیون – پایین : پاسخ شبیه‌سازی



شکل ۴- بالا: تابع خودهمبستگی مانده‌ها – پایین: تابع خودهمبستگی جزئی مانده‌ها

www.SID.ir

خود همبستگی‌های معنی‌دار مانده‌ها حاکی از وجود ساختارهای شناسایی نشده در قالب مدل خطی اولیه می‌باشد.

۴-۲- تخمین پارامترهای متغیر زمانی

با اعمال آلگوریتم (FIS) جهت تخمین وابسته به زمان پارامترهای مدل (TF)، مقادیر نسبت واریانس اغتشاش (NVR) در آخرین تنظیم و بهینه‌سازی برابر ۰/۰۱۷۳ برایb_0 و ۳/۹۸ e-۳۰+ برای a_1دست آمد.a_1 ضریب رواناب با یک گام زمانی تاخیر وb_0 ضریب بارش با δ گام زمانی تاخیررواناب نسبت به بارش در مدل (TF) است . نسبت واریانس اغتشاش پارامترها(NVR) که شاخصی از تغییرات زمانی آنها می‌باشد با یکدیگر قابل مقایسه نبوده و حاکی از تغییرات شدید پارامتر $b_{0,t}$ نسبت به پارامتر $a_{1,t}$ است. تغییرات زمانی پارامتر $b_{0,t}$ در مدل خطی (TF) نیز دلالت بر وجود رابطه‌ای غیرخطی بین ورودی و خروجی به مدل می‌باشد

۴-۳- استخراج صافی تبدیل بارش به بارش مؤثر

تحلیل‌های بند قبل دلالت داشتند بر وجود تغییرات شدید زمانی در پارامتر $b_{0,t}$. پارامتر مذکور ضریب متغیر بارش در مدل (TF) است و این به آن معنی است که عامل غیرخطی کننده رابطه بارش – رواناب را باید درون این پارامتر جستجو نمود. لذا به نظر می‌رسد که بتوان رابطه تبدیل بارش کل به بارش مؤثر را از تغییرات زمانی $b_{0,t}$ استخراج نمود. در این مطالعه از اصطلاح بارش مؤثر به جای بارش مازاد استفاده شده است و بر تفاوت معنایی آن دو نیز تاکید می‌گردد. جداسازی بارش کل به دو بخش بارش مازاد و تلفات راه کاری است که طبیعت اغلب موارد از آن تبعیت نمی‌کند Beven (2001). بطور سنتی فرض می‌گردد که شکل هیدروگراف سیلاب بر اساس مکانیزم بارش مازاد بر نفوذ کنترل می‌گردد در حالی که چنین مکانیزمی الزاماً در حوضه‌ها حاکم نبوده و شکل هیدروگراف سیلاب متأثر از عوامل مختلف دیگری از جمله ذوب برف، ذخایر آبی موجود در حوضه قبل از واقعهٔ طوفان و ... می‌باشد که مجموعاً تشکیل‌دهنده یک سری زمانی ورودی به مدل هستند که در این مطالعه تحت عنوان سری زمانی بارش مؤثر از آن نام برده شده است.

ذخیره رطوبتی خاک یکی از مهمترین متغیرهای حالت سیستم است که در طول دوره بارش تغییر می‌کند و تغییرات آن بر تولید بارش مؤثر تاثیر می‌گذارد، از آنجا که از متغیر حالت مذکور در طول وقایع بارش اندازه‌گیری‌ای موجود نیست به نظر می‌رسد که بهترین جانشین آن، رواناب مشاهداتی باشد. رواناب مشاهداتی در طول واقعه بارش در دسترس‌ترین شاخصی است که مستقیما منعکس‌کننده شرایط رطوبتی حوضه بوده و اثرات تغییرات ذخیره‌ای حوضه به طور مستقیم در تولید رواناب تاثیرگذار است.

وجود رابطه‌ای بین پارامتر مذکور و جریان مشاهداتی کاملا آشکار است. شکل مذکور براساس تخمین‌های $b_{0,t}$ با بالاترین اعتمادپذیری ترسیم شده است. جهت بازسازی رابطه $b_{0,t}$ و متغیر حالت جریان از دو رابطه نمایی مختلف به صورت معادله (۱) بهره‌گیری شد.

$$b_t = \alpha . y_t^{\beta} + \xi_t \qquad (۱)$$

معادله برازش یافته نزدیکی بالایی را با نقاط تخمین نشان می‌دهند. با اعمال روابط فوق بر تابع انتقال اولیه خواهیم داشت:

$$y_t = \frac{\alpha y_t^{\beta}}{1 - a_1 L^{-1}} . r_{t-\delta} \qquad (۲)$$

که از آن سری زمانی جدیدی به صورت رابطه (۳)، استخراج خواهد شد.

$$u_{t-\delta} = \alpha y_t^{\beta} . r_{t-\delta} \qquad (۳)$$

$$y_t = \frac{1}{1 - a_1 L^{-1}} . u_{t-\delta} \qquad (۴)$$

که در آن r_t سری زمانی بارش کل می‌باشد. سری زمانی جدید (u_t)، سری زمانی تبدیل یافته بارش‌های کل است که رابطه تبدیل بارش کل به بارش مؤثر در آن نهفته است. در این مطالعه رابطه فوق همان جزء غیرخطی تبدیل بارش به رواناب انگاشته شده است. بهره‌گیری از یک رابطه نمایی به صورت فوق علاوه بر اینکه با فیزیک مسئله نیز انطباق دارد در تعدادی از مطالعات دیگر نیز منجر به نتایج بسیار خوبی شده است Young (2001) .

برای رعایت توازن جرمی سیستم در ساختار غیرخطی استخراج بارش موثر ضریب α به عنوان ضریب مقیاس در نظر گرفته شد به گونه‌ای که:

$$\alpha = \sum y_t / \sum y_t^{\beta} . r_t \qquad (۵)$$

رابطه (۵) تلویحا به معنای تساوی حجم رواناب رودخانه‌ای و حجم بارش موثر در طول بازه زمانی مشاهداتی می‌باشد. بدیهی است که هرچه طول بازه زمانی مشاهداتی طولانی‌تر باشد فرض فوق به حقیقت نزدیکتر خواهد بود. شکل (۶)

۴-۵- بهینه‌سازی نهایی

با استخراج عامل غیرخطی فرایند بارش – رواناب اکنون می‌توان امیدوار بود که رابطه رواناب و سری زمانی بارش موثر به یک رابطه

Archive of SID

www.SID.ir

خطی تقلیل یافته باشد. در این مرحله با آزمون مراتب مختلف از سه گانه‌های $[n,m,\delta]$ بهترین مدل استخراج شده از مرتبه [۵ ۳ ۴] با معیارهای نیکویی برازش R_T^2 = ۰/۹۲۱ (۹۲٪ از اطلاعات جریان توسط مدل تشریح می‌گردد.) و YIC = −۷/۳۱۹ به دست آمد. معیارهای مذکور حاکی از برازش نسبتا خوب مدل بر سری اطلاعات مشاهداتی می‌باشد.

۵- صحت‌سنجی مدل

در شکل (۷) سری زمانی مانده‌ها از جهات مختلف بررسی شده است. خود همبستگی قابل توجه در سری زمانی مانده‌ها آشکار است. اما همبستگی در عرض مانده‌ها و ورودی مدل چندان قابل توجه نمی‌باشد. به این ترتیب به نظر می‌رسدکه رابطه غیرخطی ارایه شده به طور کامل قادر به بازسازی رفتار غیرخطی سیستم در تبدیل بارش به رواناب نبوده است. در شکل (۸) سری زمانی مانده‌های رگراسیون (پیش دید یک گام به جلو[۱۵])نشان داده شده است. اگرچه در برخی زمان‌های تاخیر ضرایب خود همبستگی معنی‌دار ارزیابی می‌گردند اما با توجه به پیچیدگی پدیده و حجم اندک سری زمانی مشاهداتی و نظر به اینکه حذف کامل همبستگی‌ها عملا ناممکن است Young (2001)، لذا می‌توان سری زمانی مانده‌ها را در این حالت ارضاء کننده توصیف نمود.

نهایتا تحقیقات اضافی جهت شناسایی روابط غیرخطی کامل‌تری که منتهی به ارایه مدل‌های کاراتر از حوضه شود با استفاده از اطلاعات سری‌های زمانی طولانی‌تر همچنان بحثی گشوده باقی خواهد ماند.

۶- تفسیر فیزیکی مدل

اگرچه توانایی مدل نهایی در توصیف اطلاعات مشاهداتی خصوصا در پیش دیدهای یک گام به جلو ارضاء کننده ارزیابی می‌شوند اما مدل مذکور براساس استراتژی (DBM) به شکل فوق کاملا ارضاء کننده نیست. استراتژی (DBM) تنها در صورتی نتایج مدل‌سازی را معتبر می‌شناسد که بتوان مدل حاصله را با استفاده از دانش هیدرولوژی تفسیر نمود، هر چند این استراتژی به طور کامل نیز به تئوری‌های موجود هیدرولوژی وفادار نبوده و هر جا که نتایج حاصله در تقابل با تئوری‌های موجود باشند سعی در نقد، تصحیح و تکمیل آنها خواهد نمود.

با تجزیه توابع انتقال واسنجی شده به توابع انتقال مرتبه اولی که به صورت سری یا موازی به هم متصل هستند و انطباق توابع انتقال مرتبه اول با مخازن روندیابی خطی جریان، می‌توان پارامترهای تابع انتقال مذکور را به برخی خصوصیات رفتاری حوضه نسبت داد Beven (2001).

از آنجا که تجزیه تابع انتقال نهایی به توابع انتقالی که به صورت سری یا موازی با یکدیگر مرتبط هستند منجر به بروز مقادیر ویژه مجازی که فاقد تفسیر فیزیکی هستند می شود،تخمین مجدد پارامترهای تابع انتقال با محدودیت قرارگیری مقادیر ویژه مدل به دامنه اعداد حقیقی، اجرا گردید.در این فرایند ضریب تعیین مدل به R_T^2 = ۰/۸۷۴ تقلیل یافت.

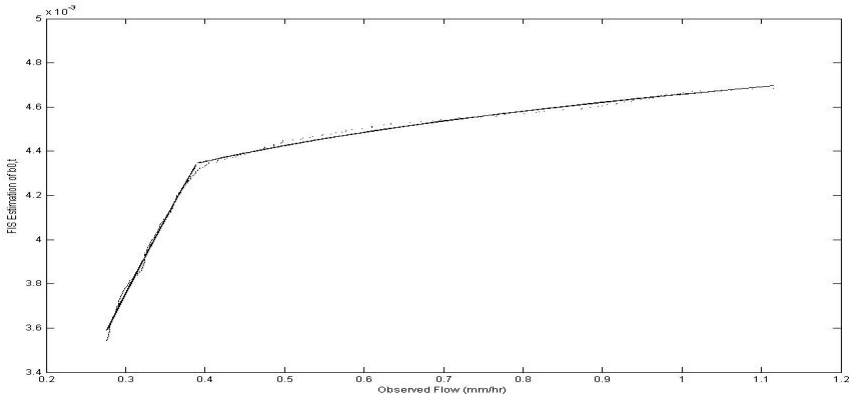
اگرچه در این مرحله کارایی مدل اندکی کاهش یافت اما استخراج ساختاری از طبیعت روندیابی جریان حاصل آن خواهد بود که نتیجه ارزشمندی است.

مطابق شکل (۹) بارش صافی شده (مؤثر) به دو مسیر اصلی موازی وارد می‌شود که هر مسیر خصوصیات روندیابی و سهم متوسط خود از دریافت بارش موثر را دارد. یکی از مسیرها، مسیر سریع، توصیفی از رفتار حوضه در پاسخ سریع به سیگنال‌های بارش ورودی را ارایه می‌دهد که خود از دو مسیر موازی متشکل از مخازن خطی سری تشکیل شده است.

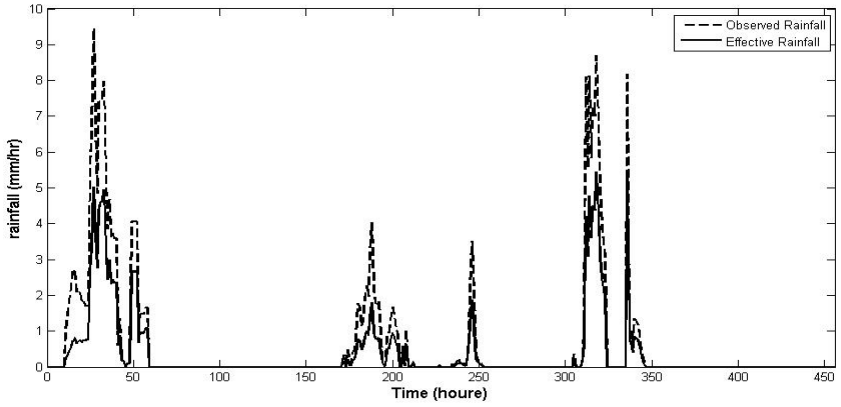
تشخیص مسیرهای جریان براساس پارامتر میانگین زمان نگهداشت[۱۶] هر مخزن انجام می‌شود. برخلاف سنت رایج تجزیه هیدروگراف، در اینجا مسیرهای فوق نماینده‌ای از جریانهای سطحی و جریان پایه انگاشته نمی‌شوند.

شکل (۱۰) نمایانگر جریان روندیابی شده توسط دو مسیر تند و کند شناسایی شده، جریان کل شبیه سازی شده و جریان مشاهداتی است. استخراج مسیرهای جریان متضمن هیچ‌گونه نتیجه‌گیری قطعی‌ای در ارتباط با فرایندهای جریان سطحی و زیرسطحی نبوده و ثابت‌های زمانی ارایه شده صرفا با استفاده از اطلاعات مشاهداتی تخمین زده شده‌اند. همانطور که از شکل (۱۰) ملاحظه می‌گردد مسیر کند جریان نیز در بازه‌های زمانی بارش عکس‌العمل نشان می‌دهد که آن را می‌توان به افزایش ذخیره رطوبتی حوضه یا تحریک و جابجایی آب ذخیره شده قبلی در حوضه نسبت داد. با توجه به ثابت زمانی نسبتا بزرگ این مسیرها، فروکش جریانی که توسط مسیرهای فوق‌الذکر کنترل می‌گردد بسیار بطئی می‌باشد. در این حالت ۴۸٪ از حجم بارش مؤثر توسط مسیر سریع و ۵۲٪ دیگر آن توسط مسیر کند روندیابی می‌گردد.

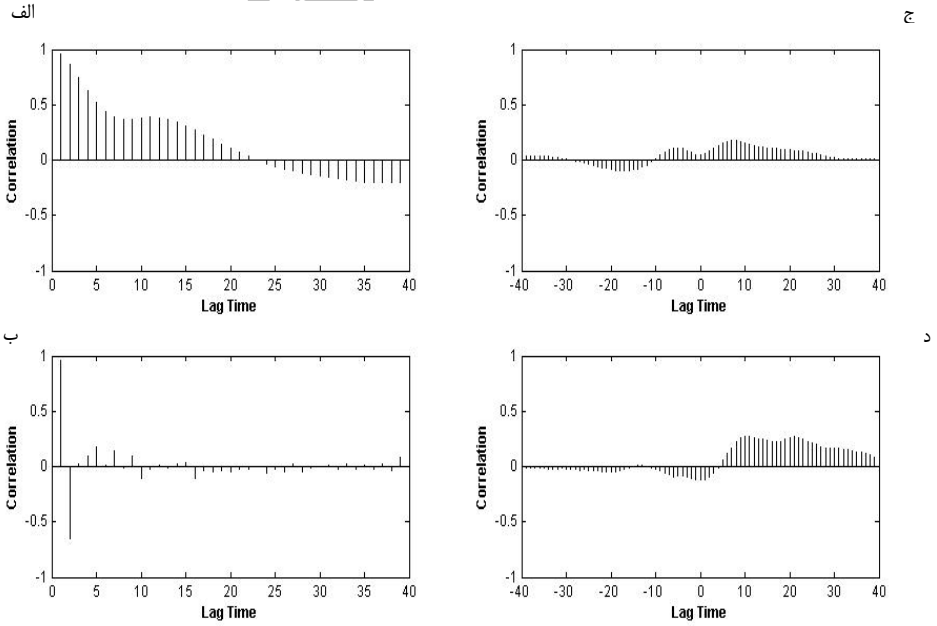
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۵- تخمین پارامتریک پارامتر b0,t در مقابل جریان مشاهداتی



شکل ۶- سری‌های زمانی بارش مشاهداتی و بارش مؤثر

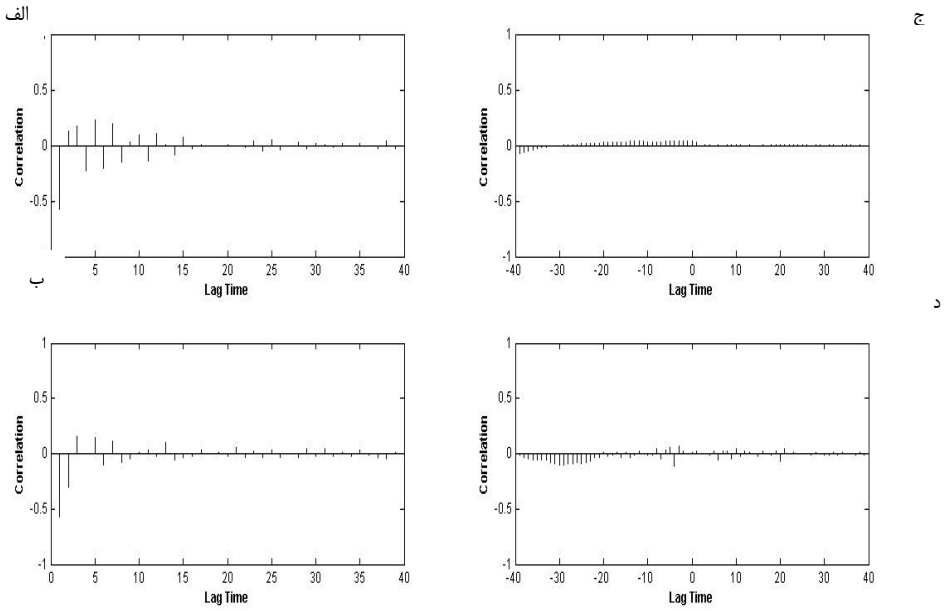


شکل ۷- خصوصیات مانده‌های مدل شبیه‌سازی

الف) خودهمبستگی مانده‌ها ب) خودهمبستگی جزئی مانده‌ها

ج) همبستگی در عرض مانده‌ها و ورودی مدل د) همبستگی در عرض مانده‌ها و خروجی مدل

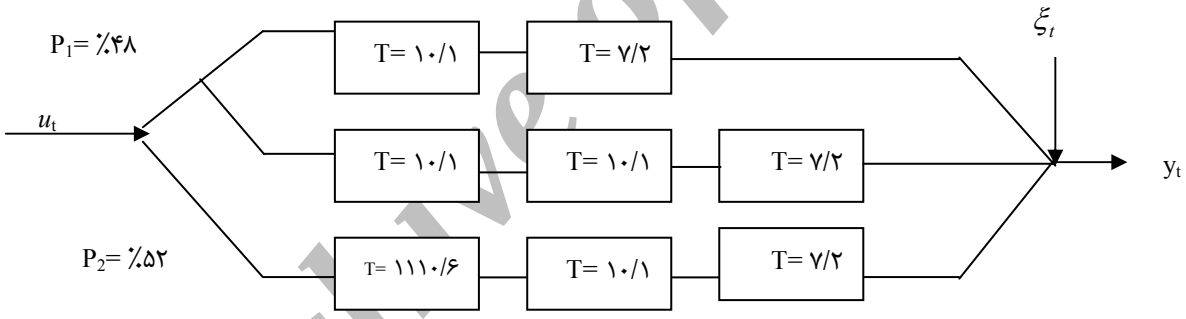
www.SID.ir



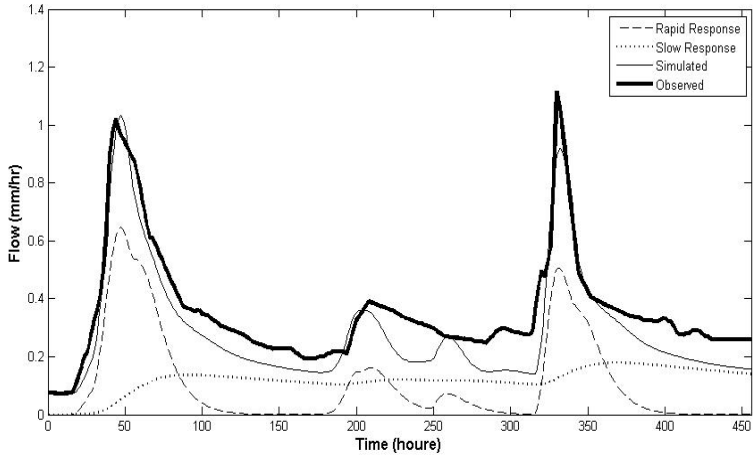
شکل ۸- خصوصیات مانده‌های مدل رگرسیـون

الف) خودهمبستگی مانده‌ها ب) خودهمبستگی جزئی مانده‌ها

ج) همبستگی در عرض مانده‌ها و ورودی مدل د) همبستگی در عرض مانده‌ها و خروجی مدل



شکل ۹- روندیابی بارش مؤثر از طریق مسیرهای مـوازی



شکل ۱۰- هیدروگراف‌های مسیرهای جریان تنـد، کند، شبیه‌سازی شده و جریان مشاهداتی

www.SID.ir

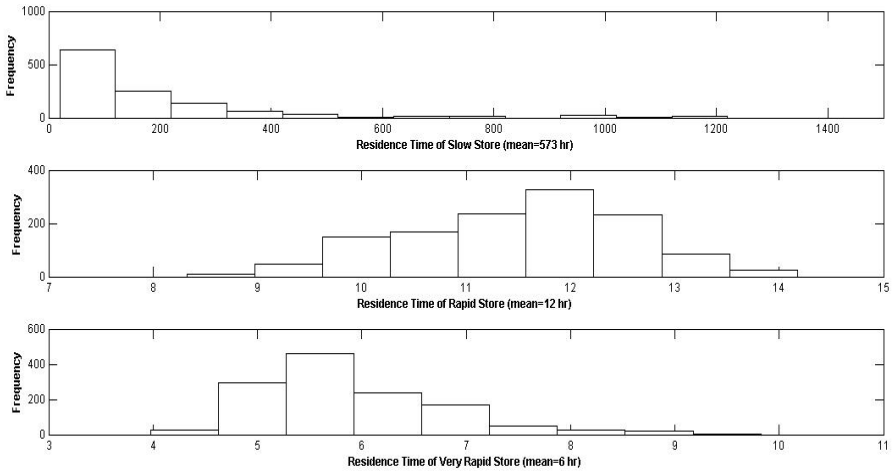
۷-تحلیل حساسیت مدل

یکی از مزایای استفاده از روشهای استوکاستیک مدل‌سازی خصوصا استراتژی مدل‌سازی (DBM) توانایی آنها در استفاده از تکنیک‌های تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) می‌باشد.

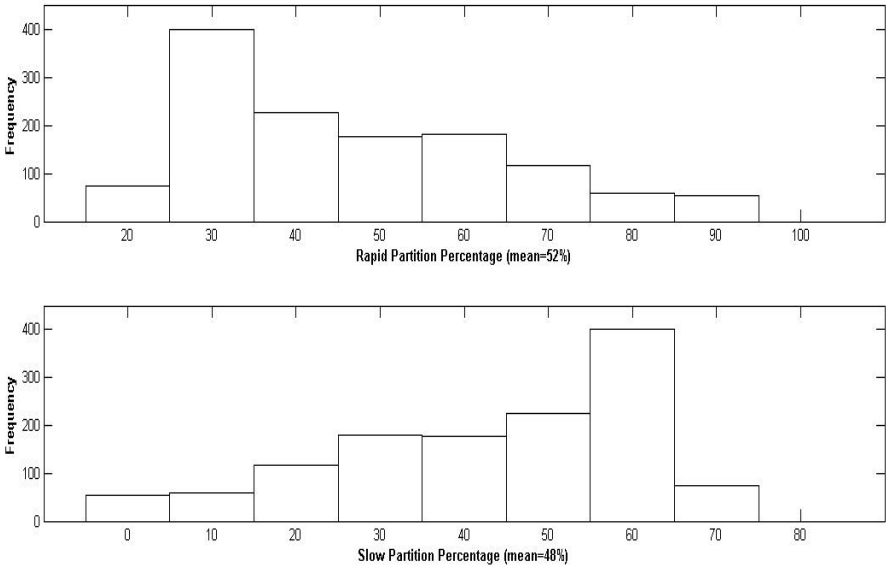
بررسی عناصر ماتریس کوواریانس تخمین پارامترها دلالت بر وجود همبستگی بسیار بالا بین پارامترهای مدل تابع انتقال دارد. در این مطالعه برای حفظ همبستگی‌های مذکور و نیز در نظر گرفتن طبیعت تصادفی بودن پارامترها (عمدتا به دلیل عدم اطمینان ورودی مدل و سایر اغتشاشات نظیر اغتشاشات فرآیند و اغتشاش مقادیر اندازه‌گیری شده) توزیع احتمال حاکم بر پارامترها توزیع نرمال چند متغیره فرض گردید.

شکل‌های (۱۱) الی (۱۲) حاصل چندین میلیون مرتبه اجرای مدل هستند که از آن میان نزدیک به ۱۳۰۰ اجرا ارضاءکننده تشخیص داده شدند.

در شکل (۱۲) تحلیل حساسیت درصد جریان عبوری از هر فرآیند منعکس شده. اگرچه بطور متوسط هر یک از مسیرها تقریبا نیمی از بارش مؤثر را روندیابی می‌کنند، اما بیشترین فراوانی متناظر است با عبور ۳۰ الی ۴۰ درصد بارش از مسیر سریع و نتیجتا ۶۰ الی ۷۰ درصد ازمسیر کند. چنانچه بتوان عمده عملکرد مسیر کند را به جریان‌های پایه و آب ذخیره شده در حوضه قبل از واقعه طوفان نسبت داد، مطلب مذکور نتیجه‌ای است که در تقابل با روش‌های رایج جداسازی جریان پایه از رواناب سطحی ارزیابی می‌گردد.



شکل ۱۱- تحلیل حساسیت متوسط زمان نگه‌داشت مخازن خطی به لحاظ فراوانی وقـوع



شکل۱۲- تحلیل حساسیت درصد جریان عبوری از هر مسیر به لحاظ فـراوانی

www.SID.ir

۸- نتیجه‌گیـری

در این مطالعه مدل‌سازی فرآیند بارش ـ رواناب زیر حوضه خرسان از حوضه کارون بزرگ با استفاده از روش(DBM) مورد بررسی قرار گرفت.

جهت پرهیز از خطای ناشی از فرض جداسازی رواناب به جریان پایه و رواناب مستقیم و نیز خطای جداسازی بارش مازاد از بارش کل، بارش کل در مقابل رواناب کل مدلسازی شد. تحلیل وابسته به زمان پارامترها دلالت بر وجود رابطه‌ای غیرخطی بین بارش و رواناب داشت. صافی تبدیل بارش کل به بارش مؤثر براساس وابستگی حالت پارامتر متناظر با متغیر بارش با جریان مشاهداتی استخراج گردید.

نظر به پویایی رفتار سیستم‌های زیست محیطی خصوصا سیستم‌های حوضه‌ای صحت‌سنجی مشروط بر پیش‌دیدها زمانی قابل اجرا است که سری زمانی بارش و رواناب پیوسته‌ای با طول کافی از حوضه در دست باشد که بخشی از آن جهت شناسایی ساختار مدل و بخش دیگر آن برای صحت سنجی مدل به کار رود. متاسفانه حجم اطلاعات مشاهداتی وقایع بارش ـ رواناب در مقیاس ساعتی در حدی اندک است که با استفاده از آن تنها شناسایی و تخمین پارامترهای مدل آن هم در حداقل سطح قابل قبول امکان‌پذیر گردید. لذا در این مطالعه صحت‌سنجی کفایت آماری مدل استخراج شده همراه با شبیه‌سازی مونت‌کارلو جهت ارزیابی مدل ارایه گردید. به علاوه با همه اهمیت توانایی مدل در بازسازی اطلاعات مشاهداتی به نظر می‌رسد که این توانایی شرط کافی در پذیرش مدل نیست. در حقیقت جهت اتکاء به نتایج مدل‌های وقایع طبیعی نیاز به انتساب پارامترهای مدل به خصوصیات سیستم طبیعی احساس می‌گردد. تمایز استراتژی (DBM) با مدل‌های جعبه سیاه در همین نکته است.

این روش اگرچه در محاسبات کمی پیچیده است اما حاصل آن شناسایی ساختاری نسبتاساده با تعداد کم پارامتر است که هر یک از پارمترها را می توان به خصوصیتی فیزیکی از رفتار حوضه در روندیابی جریان نسبت داد.

نهایتا اینکه، علیرغم شناسایی بخشی از رفتار حوضه، مدل ارایه شده مشکلاتی در ارتباط با کفایت تابع انتقال نیز دارد. بخش بزرگی از این عدم کفایت به عقیده مؤلف عدم کفایتی است که در میان کلیه مدل‌های بارش ـ رواناب از هر نوعی که باشند ملاحظه می‌گردد و آن مطمئنا به علت کاستی در تعریف رابطه غیرخطی بارش موثر و نیز احتمالا تاثیر سایر متغیرها بر تولید رواناب است که در نظر گرفته نشده‌اند. در مقابل مشاهده گردید که مدل، پیش‌دیدهای یک گام به جلوی کاملا موجهی را ارایه می‌کنند. به این لحاظ این مدل‌ها بستر بسیار مناسبی را برای پیش‌بینی و توسعه سیستم‌های هشدار سیلاب فراهم می‌آورند.

۹- تشکـــر

عمده تحلیل‌های این مطالعه توسط جعبه ابزار Captain قابل نصب در نرم افزار MATLAB اجرا شده است. لذا در این جا از پروفسور یانگ و همکاران ایشان از بخش علوم زیست‌محیطی دانشگاه لنکستر انگلستان که جعبه ابزار مذکور را در اختیار قرار دادند تشکر می‌گردد.

پی‌نوشت

1. Deductive
2. Inductive
3. Data-Based Mechanistic Modelling
4. Inverse-Distance-Squared Method
5. Conceptual
6. General Linear Transfer Function
7. Recursive Filtering
8. Generalised Random Walk Process
9. Forward-pass Filtering
10. Backward-Recursive Fixed Interval Smoothing
11. Noise Variance Ratio
12. Monte Carlo Simulation
13. Young Information Criteria
14. Simplified Refined Instrumental Variable
15. One Step Ahead Prediction Errors
16. Mean Residence Time

۱۰- مراجع

صدقی، ح. (۱۳۷۱)، "ارزیابی و برآورد ابعاد حداکثر بارش و سیلاب متحمل حوضه آبریز کارون در پل‌شالو به عنوان معیار طراحی سد کارون ۳"، تهران، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۵۵ صفحه.

صدقی، ح. و همکاران (۱۳۷۹)، "پروژه به روزرسانی و بررسی گزارشات مطالعات هیدرولوژی سیلاب گتوند ـ گزارش نهایی"، تهران، شرکت خدمات مهندسی برق مشانیر،۱۱۰صفحه.

Beven, K.J. (2001), "Rainfall-Runoff Modelling: The Primer", *Chichester: J. Willey*,360P.

Wagener, T., Wheater, H.S. and Gupta, H. (2004), "RainFall-Runoff Modeling in Gauged and

Archive of SID
www.SID.ir

Young, P.C. (2002a), "Advances in Real-Time Flood Forecasting", *CRES Report Number TR/176, Lancaster University Press, UK*.

Young, P.C., Taylor C.J., Tych, W., Pedregal, D.J. & McKenna, P.G. (2004), "The Captain Toolbox", *Center for Research on Environmental Systems and Statistics, Lancaster University, U.K*.

Ungaugaed Gatchments"., *Imperial College Press,* 306p.

Young, P.C. (2001), "Data-Based Mechanistic Modelling and Validation of Rainfall-Flow Processes", *Chichester: J. Willey*, pp. 117-161.

Archive of SID

www.SID.ir