

Non-Linear Signal Processing of Rainfall-Runoff Process Using Data-Based Mechanistic Modeling (DBM)

Case Study: Khersan Basin

N. jalalkamali¹ and H. Sedghi²

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.

پردازش غیر خطی سیگنال‌های فرآیند پویای بارش -
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 پویا غیرخطی بارش - رواناب متمرکز است. تبدیل بارش به رواناب در عرصه حوضه به طور قطع شامل روابط غیر خطی پیچیده‌ای است که حاصل تعامل مجموعه‌ای از فرآیندهای هیدرولوژیکی مختلف می‌باشد. 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 بعضی گمراهنگی 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 فضایی حالت و نهایتاً بهره‌گیری از روش استوکاستیک مدل‌سازی اطلاعات محور سببی مبتنی بر الگوریتم برگشتی صافی کالمون، برخورد این تحقیق در شناسایی رابطه غیرخطی بین بارش و رواناب 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. نهایتاً جهت کمی سازی اعتماد پذیری مدل شناسایی شده، تحلیل حساسیت براسانس روش شبیه سازی مونت کارلو اجرا 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- 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

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان.

۲- استاد هیدرولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۱- مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌های پیش روی علم هیدرولوژی، مدل‌سازی فرآیند بارش - 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.



شکل ۱- حوضه خرسان همراه با ایستگاه‌های مورد استفاده

از آنجا که تحلیل سیال‌های منفردی که حاصل نزول یک بارش حداقل 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 مشکل از دو واقعه متوالی طوفان در اسفند ۱۳۷۶ و فروردین ۱۳۷۷ انتخاب گردید. توالی دو واقعه حدی مذکور در فاصله چند روز این مکان 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 مطالعه مذکور با انتخاب ۱۵۰ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده حوضه کارون و مجاور آن و بازسازی اطلاعات بارش در ۱۶۶ نقطه کمکی دیگر با استفاده از روابط رگرسیونی خطوط همباران روزانه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ترسیم گردیده بود. این خطوط مرجع استخراج توزیع مکانی بارش این تحقیق قرار گرفتند.

در عمدۀ رویکردهای مدل‌سازی با تکیه بر فلسفه قیاس کل به جزء^۱ فرض می‌شود که معادلات ارائه شده به خوبی توانایی تشریح رفتار استخراج این معادلات فرض مذکور منجر به خطا در ساختار مدل می‌گردد. در مقابل در این تحقیق راه کار متنکی بر قیاس جزء به کل^۲ پیش گرفته شده است. در این راه کار تلاش می‌گردد که فرضیات اولیه در مورد سیستم در حدائق ممکن نگه داشته شود و صرفاً براساس مشاهدات ثبت شده، تعاملات حاکم بر سیستم استنتاج گردد.

در سالهای اخیر، استفاده از مدل‌های جعبه سیاه متنکی بر آلگوریتم‌های جدید بهینه سازی حجم عمدۀ تحقیقات در این بخش را به خود اختصاص داده است (Beven 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 قادر 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 و دیگری نیاز این مدل‌ها به حجم زیادی از اطلاعات مشاهداتی است (Beven 2001).

رویکرد این مطالعه که تحت عنوان روش مدل‌سازی اطلاعات محور سببی^۳ (DBM) شناخته می‌شود، رویکردی متفاوت است که در آن بدون انکاء 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.

زمانی هر پارامتر برمبنای فرایند گام برداری تصادفی^۸ و سپس اعمال آلگوریتم‌های صافی رویه جلوبرگشتی^۹ و آلگوریتم برگشتی رویه 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 گام برداری (NVR) تصادفی است که تحت نام نسبت واریانس اغتشاش^{۱۱} (NVR) شناخته می‌شود. بعلاوه نحوه تغییرات زمانی پارامترها و نیز تغییرات آنها در مقابل تغییرات سایر متغیرهای حالت سیستم آشکار کننده خصوصیات خطی یا غیر خطی رابطه متغیرهای ورودی و خروجی سیستم بوده و در استخراج رابطه نهایی تبدیل بارش به بارش موثر و سپس رواناب قابل استفاده می‌باشد.

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 نظری روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو^{۱۲} که تاحدودی توصیف کننده عملکرد مدل است استفاده می‌شود.

۴- استخراج مدل ۴- شناسایی مدل اولیه تابع انتقال

در این مرحله کم پارامترین مدل تابع انتقال (TF) (از مرتبه یک یا حداقل 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 برآش است. معیارهای عددی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از ضریب تعیین شبیه سازی_T (R^2_T) و معیار اطلاعات یانگ^{۱۳} (YIC). پارامترهای تابع 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 [۱ ۲ ۱] و معیارهای $R^2_T = 0.679$ و $YIC = -8/51$ به عنوان بهترین مدل اولیه انتخاب گردید. اشکال (۳) و (۴) به ترتیب مانده‌ها و تابع خود همبستگی (ACF) و خود همبستگی جزئی (PACF) سری زمانی مانده‌های پاسخ شبیه سازی ورگرسیون مدل را نشان می‌دهند.

توزیع زمانی بارش معرف حوضه بر اساس اطلاعات ۶ ایستگاه مجهر 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 رگبار معرف 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'	۳۳°۳۱'	۳۱°۳۱'	۳۲°۳۱'
ارتفاع(متر)	۱۸۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰۰	۱۸۸۰	۱۵۸۰	۶۷۵

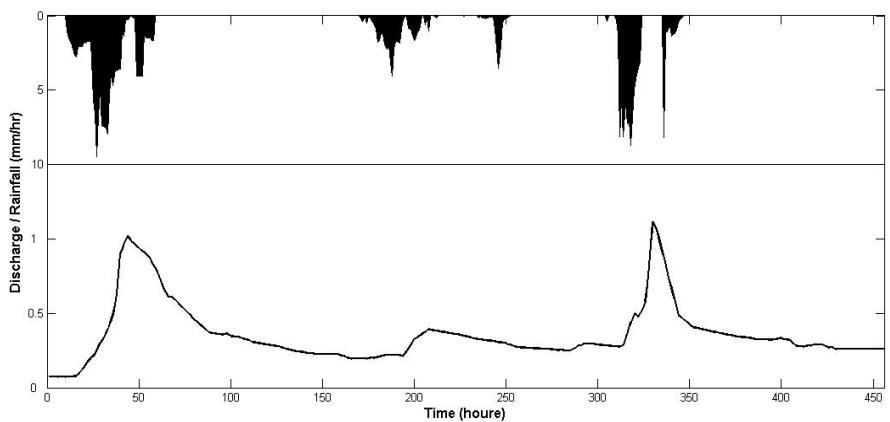
جهت وزن دهی توزیع زمانی بارش ثبت شده در هر ایستگاه، دو روش پلی‌گون‌های تیسن و روش عکس مربع فاصله^{۱۵} مقایسه گردیدند و روش عکس مربع فاصله انتخاب شد. معیار انتخاب میزان هم تغییری سری زمانی بارش معرف حاصل از هر یک از این روشها با سری زمانی رواناب بود. (شکل ۲)

۳- رویکرد مدل‌سازی اطلاعات محور سبیب (DBM)

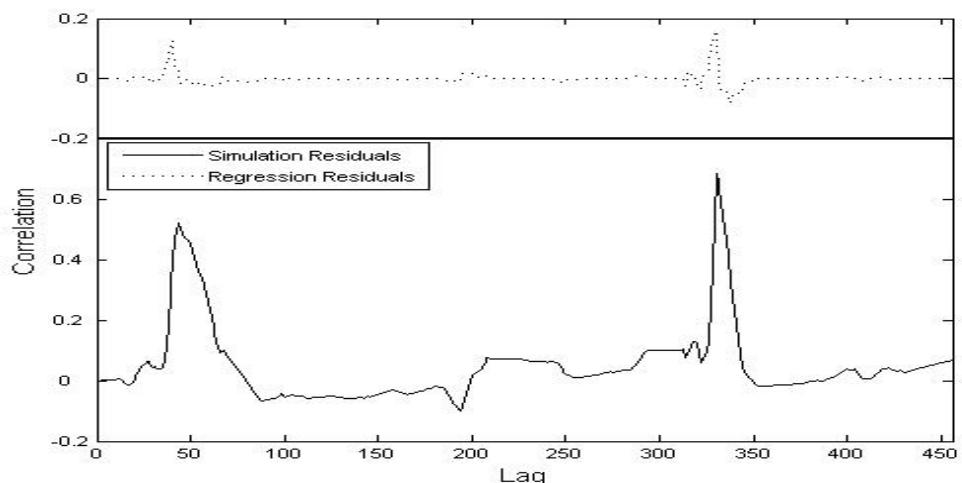
رویکرد مدل‌سازی اطلاعات محور سبیب و کاربرد آن به طور مفصل در مراجع زیر تشریح گردیده است. [Beven (2001) ، Young (2001a) ، Young (2001)

این روش مبتنی بر فلسفه استنتاج جزء به کل و با نگه داشتن فرضیات اولیه در حداقل سطح ممکنه، کم پارامترین ساختار مدل از نوع مفهومی^{۱۶} 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^{۱۷} برای نسبت دادن بارش به رواناب بهره‌گیری خواهد شد. هر تابع انتقال توسط سه گانه [m,n,^{۱۸}] شناخته می‌شود که در آن ^{۱۹} تعداد بازه‌های زمانی تاخیر ورودی نسبت به خروجی مدل و m,n درجه چند جمله‌ای‌های تاخیرانداز می‌باشد.

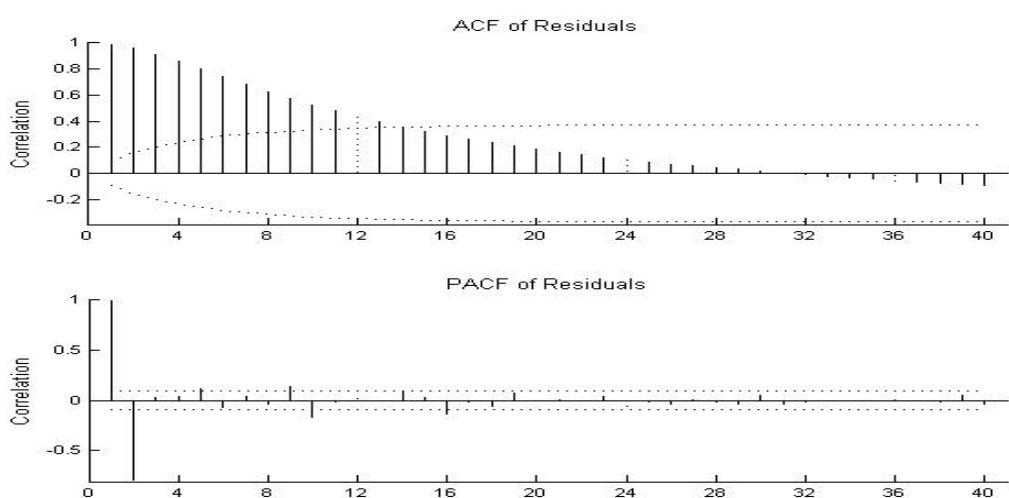
تحلیل‌های ریاضی این روش برمبنای بهره‌گیری از قدرت روش‌های برگشتی صافی کردن^{۲۰} استوار است که در آن به جای تخمین ایستگاه پارامترها در طول بازه زمانی مشاهداتی، به پارامترهای مدل اجازه تغییر در زمان داده می‌شود. در این روش با فرض تبعیت تغییرات



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



شکل ۳- سری زمانی ماندها - بالا : پاسخ رگرسیون - پایین : پاسخ شبیه سازی



شکل ۴- بالا: تابع خودهمبستگی ماندها - پایین: تابع خودهمبستگی جزئی ماندها

تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۲، پائیز ۱۳۸۷

Volume 4, No. 2, Fall 2008 (IR-WRR)

شرایط رطبیتی حوضه بوده و اثرات تغییرات ذخیره‌ای حوضه به طور مستقیم در تولید رواناب تاثیرگذار است.

وجود رابطه‌ای بین پارامتر مذکور و جریان مشاهداتی کاملاً 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.

$$b_t = \alpha \cdot y_t^\beta + \xi_t \quad (1)$$

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

$$y_t = \frac{\alpha y_t^\beta}{1 - a_1 L^{-1}} r_{t-\delta} \quad (2)$$

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

$$u_{t-\delta} = \alpha y_t^\beta \cdot r_{t-\delta} \quad (3)$$

$$y_t = \frac{1}{1 - a_1 L^{-1}} u_{t-\delta} \quad (4)$$

که در آن y_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 مؤثر ضریب α به عنوان ضریب مقیاس در نظر گرفته شد به گونه‌ای که:

$$\alpha = \sum y_t / \sum y_t^\beta \cdot r_t \quad (5)$$

رابطه (۵) تلویحاً به معنای تساوی حجم رواناب رودخانه‌ای و حجم بارش مؤثر 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- بهینه‌سازی نهایی

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

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

۴- 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 $173/0.0/0.0$ برای $b_{0,t}$ و e^{-30} برای $a_{1,t}$ دست آمد. ضریب رواناب با یک گام زمانی تاخیر و ضریب بارش با δ گام زمانی تاخیر رواناب 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- استخراج صافی تبدیل بارش به بارش مؤثر

تحلیل‌های بند قبل داشتند بر وجود تغییرات شدید زمانی در پارامتر $b_{0,t}$. پارامتر مذکور ضریب تغییرات زمانی 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 تأکید می‌گردد. جداسازی بارش کل به دو بخش بارش مازاد و تلفات راه کاری است که طبیعت اغلب موارد از آن تعیین نمی‌کند (Beven 2001). بطور سنتی فرض می‌گردد که شکل هیدروگراف سیلان بر اساس مکانیزم بارش مازاد بر نفوذ کنترل می‌گردد در حالی که چنین مکانیزمی‌الزاماً در حوضه‌ها حاکم نبوده و شکل هیدروگراف سیلان متأثر از عوامل مختلف دیگری از جمله ذوب برف، ذخایر آبی موجود در حوضه قبل از واقعه طوفان و ... می‌باشد که مجموعاً تشکیل دهنده یک سری زمانی ورودی به مدل هستند که در این مطالعه تحت عنوان سری زمانی بارش مؤثر از آن نام برده شده است.

ذخیره رطبیتی خاک یکی از مهمترین متغیرهای حالت سیستم است که در طول دوره بارش تغییر می‌کند و تغییرات آن بر تولید بارش مؤثر تأثیر می‌گذارد، از آنجا که از متغیر حالت مذکور در طول واقعی 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 مستقیماً منعکس کننده

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 $R_T^2 = 0.874$ 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 می شود 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 سیگنال های بارش ورودی را ارایه می دهد که خود از دو مسیر موازی مشکل از مخازن خطی سری تشکیل شده است.

تشخیص مسیرهای جریان براساس پارامتر میانگین زمان نگهدارش^{۱۴} هر مخزن انجام می شود. برخلاف سنت رایج تجزیه هیدرولوگراف، در اینجا مسیرهای فوق نماینده ای از جریانهای سطحی و جریان پایه انگاشته نمی شوند.

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 م牲من هیچ گونه نتیجه گیری قطعی ای در ارتباط با فرایندهای جریان سطحی و زیرسطحی نبود و ثابت های زمانی ارایه شده صرفا با استفاده از اطلاعات مشاهداتی تخمین زده شده اند. همانطور که از شکل (۱۰) ملاحظه می گردد مسیر کند جریان نیز در بازه های زمانی بارش عکس العمل نشان می دهد که آن را می توان به افزایش ذخیره رطوبتی حوضه یا تحریک و جابجایی آب ذخیره شده قبلی در حوضه نسبت داد. با توجه به ثابت زمانی نسبتاً بزرگ این مسیرها، فروکش جریانی که توسط مسیرهای فوق الذکر کنترل می گردد بسیار بطيئی می باشد. در این حالت ۴۸٪ از حجم بارش مؤثر توسط مسیر سریع و ۵۲٪ دیگر آن توسط مسیر کند روندیابی می گردد.

خطی تقلیل یافته باشد. در این مرحله با آزمون مراتب مختلف از سه گانه های $[n, m, \delta]$ بهترین مدل استخراج شده از مرتبه [۵ ۳ ۴] با معیارهای نیکویی برازش $R_T^2 = 0.921$ و $YIC = -7/319$ از اطلاعات جریان توسط مدل تشریح می گردد. معیارهای مذکور حاکی از برازش خوب مدل بر سری اطلاعات مشاهداتی می باشد.

۵- صحبت سنجی مدل

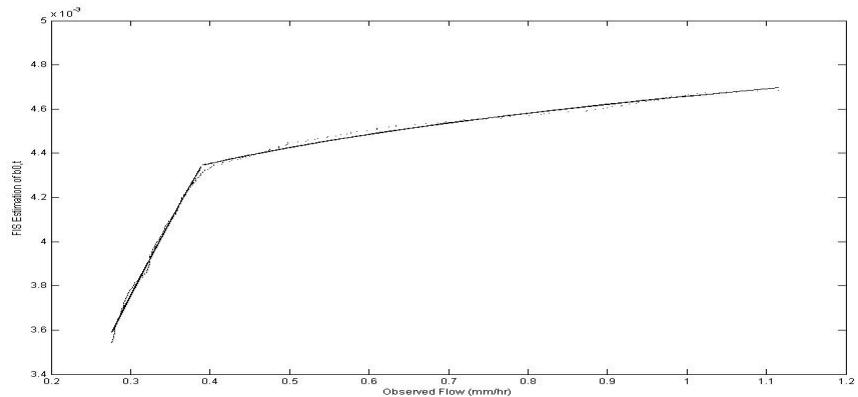
در شکل (۷) سری زمانی مانده ها از جهات مختلف بررسی شده است. خود همبستگی قابل توجه در سری زمانی مانده ها آشکار است. اما همبستگی در عرض مانده ها و ورودی مدل چندان قابل توجه نمی باشد. به این ترتیب به نظر می رسد که رابطه غیرخطی ارایه شده به طور کامل قادر به بازسازی رفتار غیرخطی سیستم در تبدیل بارش به رواناب نبوده است. در شکل (۸) سری زمانی مانده های رگرسیون (پیش دید یک گام به جلو^{۱۵}) نشان داده شده است. اگرچه در برخی زمان های تاخیر ضرایب خود همبستگی معنی دار ارزیابی می گردد اما با توجه به پیچیدگی پدیده و حجم اندک سری زمانی مشاهداتی و نظر به اینکه حذف کامل همبستگی ها عمل ناممکن است (Young 2001)، لذا می توان سری زمانی مانده ها را در این حالت ارضاء کننده توصیف نمود.

نهایتاً تحقیقات اضافی جهت شناسایی روابط غیرخطی کامل تری که منتهی به ارایه مدل های کاراتر از حوضه شود با استفاده از اطلاعات سری های زمانی طولانی تر همچنان بحثی گشوده باقی خواهد ماند.

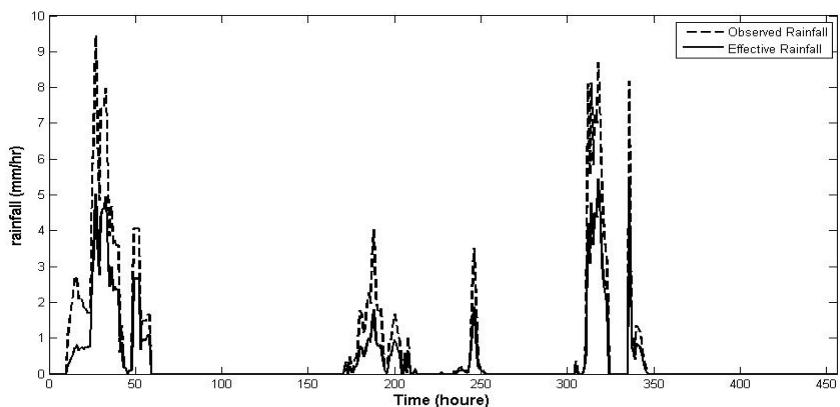
۶- تفسیر فیزیکی مدل

اگرچه توانایی مدل نهایی در توصیف اطلاعات مشاهداتی خصوصاً در پیش دیدهای یک گام به جلو ارضاء کننده ارزیابی می شوند اما مدل مذکور براساس استراتژی (DBM) به شکل فوق کاملاً ارضاء کننده نیست. استراتژی (DBM) تنها در صورتی نتایج مدل سازی را معتبر می شناسد که بتوان مدل حاصله را با استفاده از دانش هیدرولوژی تفسیر نمود، هر چند این استراتژی به طور کامل نیز به تئوری های موجود هیدرولوژی و فادر نبوده و هر جا که نتایج حاصله در تقابل با تئوری های موجود باشند سعی در نقد، تصحیح و تکمیل آنها خواهد نمود.

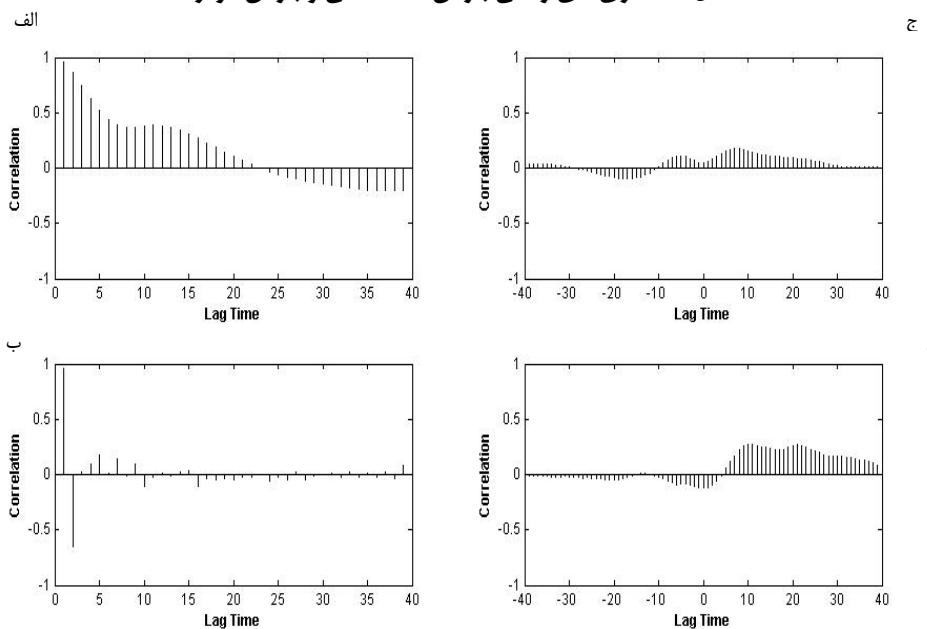
با تجزیه توابع انتقال و اسنجه شده به توابع انتقال مرتبه اولی که به صورت سری یا موازی به هم متصل هستند و انطباق توابع انتقال مرتبه اول با مخازن روندیابی خطی جریان، می توان پارامترهای تابع



شکل ۵- تخمین پارامتریک پارامتر $b_{0,t}$ در مقابل جریان مشاهداتی



شکل ۶- سری های زمانی بارش مشاهداتی و بارش مؤثر

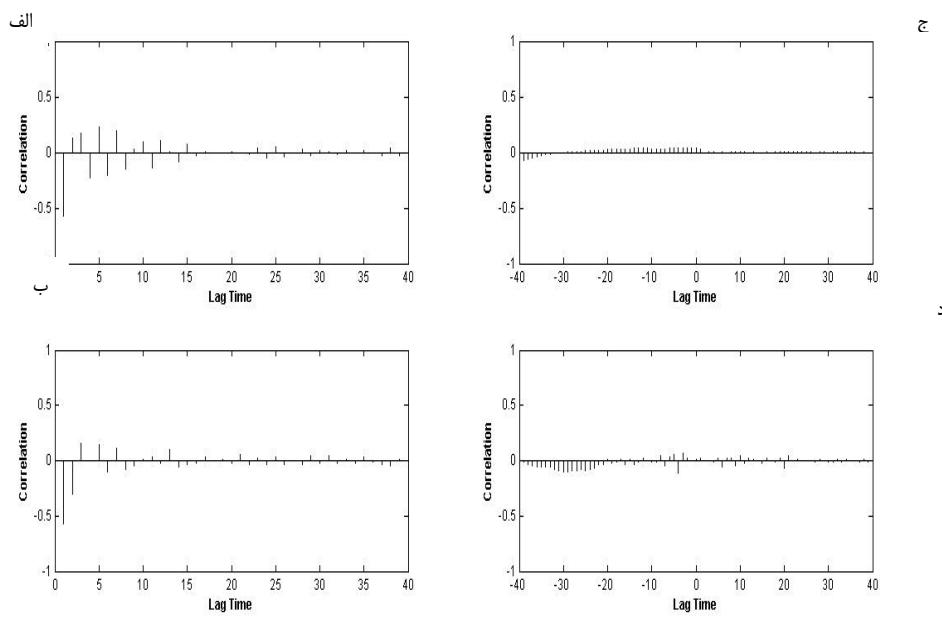


شکل ۷- خصوصیات مانده های مدل شبیه سازی

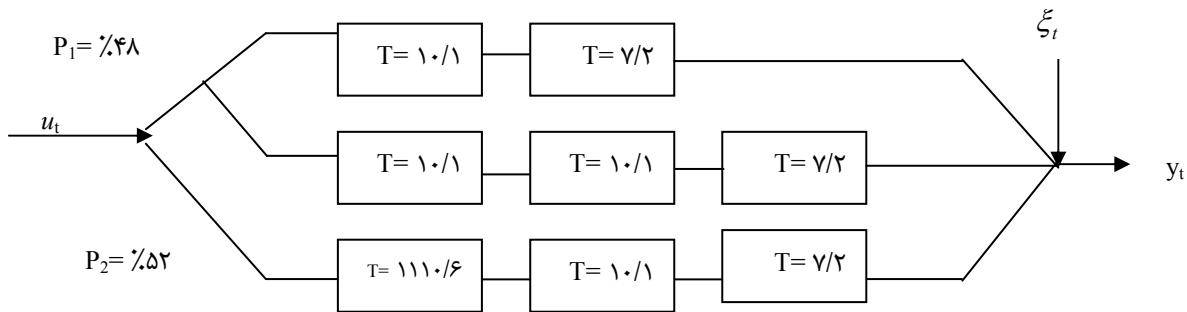
ب) خودهمبستگی جزئی مانده ها

الف) خودهمبستگی مانده ها

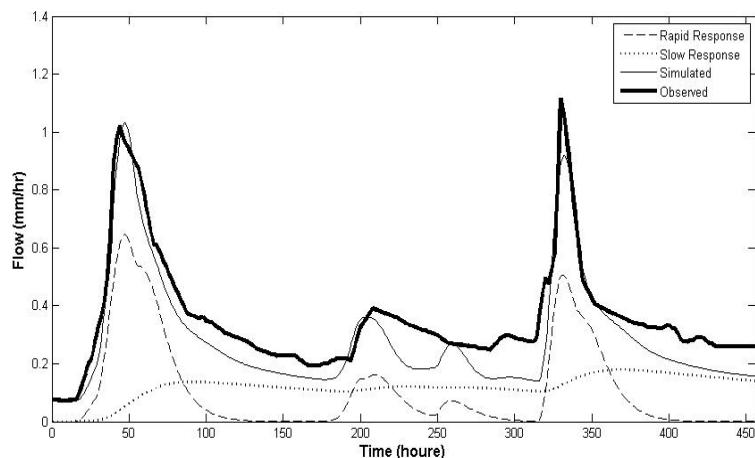
ج) همبستگی در عرض مانده ها و ورودی مدل د) همبستگی در عرض مانده ها و خروجی مدل



شکل ۸- خصوصیات مانده‌های مدل رگرسیون
 (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 موازی



شکل ۱۰- هیدروگراف‌های مسیرهای جريان تند، کند، شبیه‌سازی شده و جريان مشاهداتی

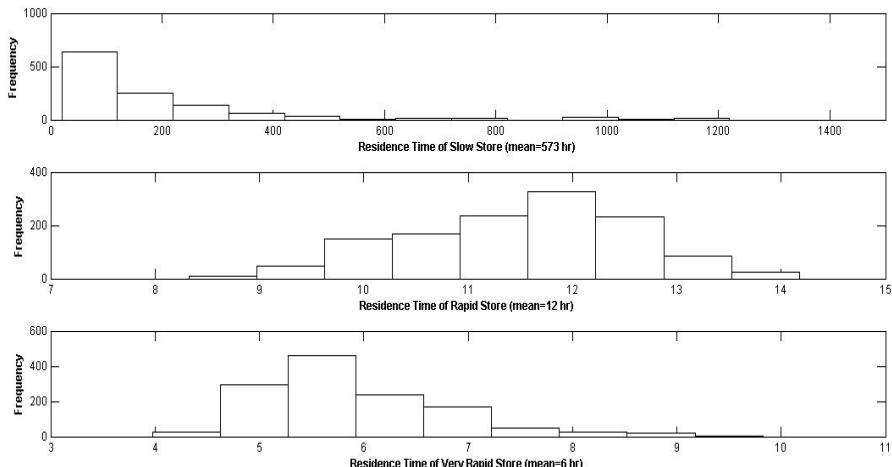
۷- تحلیل حساسیت مدل

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

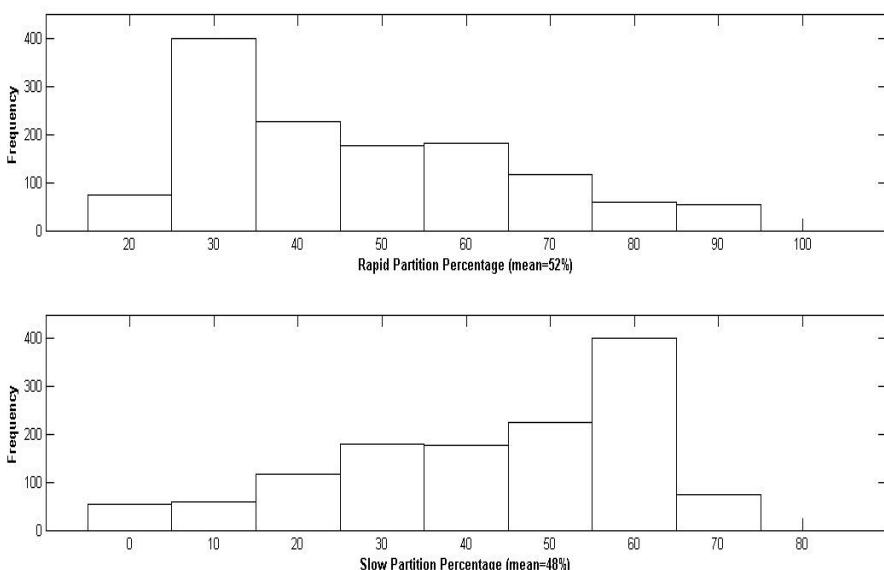
شکل‌های (۱۱) الی (۱۲) حاصل چندین میلیون مرتبه اجرای مدل هستند که از آن میان نزدیک به ۱۳۰۰ اجرا ارضاً‌کننده تشخیص داده شدند.

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

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 (عمدتاً به دلیل عدم اطمینان وروדי مدل و سایر اغتشاشات نظیر اغتشاشات فرآیند و اغتشاش مقادیر اندازه‌گیری شده) توزیع احتمال حاکم بر پارامترها توزیع نرمال چند متغیره فرض گردید.



شکل ۱۱- تحلیل حساسیت متوسط زمان نگهداری مخازن خطی به لحاظ فراوانی و قوع



شکل ۱۲- تحلیل حساسیت درصد جریان عبوری از هر مسیر به لحاظ فراوانی

۸- نتیجه‌گیری

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

نیز احتمالاً تأثیر سایر متغیرها بر تولید رواناب است که در نظر گرفته نشده‌اند. در مقابل مشاهده گردید که مدل، پیش‌دیدهای یک گام به جلوی کاملاً موجهی را ارایه می‌کند. به این لحاظ این مدل‌ها بستر بسیار مناسبی را برای پیش‌بینی و توسعه سیستم‌های هشدار سیلاب فراهم می‌آورند.

۹- تشکر

عمده تحلیل‌های این مطالعه توسط جعبه ابزار Captain قابل نصب در نرم افزار MATLAB اجرا شده است. لذا در اینجا از پروفوسور 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)، "ازیابی و برآورد ابعاد حداقل بارش و سیلاب متحمل حوضه آبریز کارون در پل شالو به عنوان معیار طراحی سد کارون ۳"، تهران، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۵۵ صفحه.

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

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

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

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 ولستگی حالت پارامتر متناظر با متغیر بارش با جریان مشاهداتی استخراج گردید.

نظر به پویایی رفتار سیستم‌های زیست محیطی خصوصاً سیستم‌های حوضه‌ای صحبت‌سنگی مشروط بر پیش‌دیدهای زمانی قبل 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 صحبت سنگی مدل به کار رود. متناسبه حجم اطلاعات مشاهداتی واقعی بارش - 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 صحبت‌سنگی 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 واقعی 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 نسبتاً ساده با تعداد کم پارامتر است که هر یک از پارامترها را می‌توان به خصوصیتی فیزیکی از رفتار حوضه در روندیابی جریان نسبت داد.

نهایتاً 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 - رواناب از هر نوعی که باشند ملاحظه می‌گردد و آن مطمئناً به علت کاستی در تعریف رابطه غیرخطی بارش مؤثر و

- 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.*
- Ungauged 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.