# مدل‌سازی اطلاعات محورسببی فرآیند پویای بارش – رواناب: مطالعه موردی حوضه کارون علیا

نوید جلال‌کمالی[1] و حسین صدقی[2]

## چکیده

بخش عمده‌ای از مطالعات هیدرولوژی بر مدل‌سازی فرآیند پیچیده و غیرخطی بارش – رواناب متمرکز است. مدل‌های ارایه شده جهت تبیین رفتار این فرآیند شامل دامنه گسترده‌ای از مدل‌های جعبه سیاه تا مدل‌های حجیم مبتنی بر معادلات حاکم بر فیزیک سیستم می‌باشند. نظر به وجود عدم اطمینان حاکم بر فرآیند مذکور در خصوص ورودی‌های مدل و پارامترهای واسنجی‌شده، به نظر می‌رسد که مدل‌سازی استوکاستیک فرآیند نسبت به مدل‌سازی قطعی ارجحیت دارد. در این تحقیق شناسایی و تخمین روابط غیرخطی عملگر در فرآیند مذکور از طریق رهیافت اطلاعات محور سببی (DBM) می‌باشد. روش مذکور یک روش استوکاستیک مدل‌سازی مبتنی بر تخمین برگشتی پارامترها توسط صافی کالمن در سیستم معادلات فضای حالت است که علاوه بر ارایه مدلی جهت تشریح رفتار حوضه در پاسخ به پالس‌های ورودی بارش، قادر به انعکاس تفسیری فیزیکی از نحوه تبدیل بارش به رواناب نیز می‌باشد. جنبه اخیر شاخص‌ترین ویژگی این روش مدل‌سازی است که آن را از سایر روش‌های مدل‌سازی جعبه سیاه متمایز می‌سازد. آزمون رهیافت مذکور بر اطلاعات مشاهداتی حوضه کارون علیا از زیرحوضه‌های اصلی رودخانه کارون بزرگ، آشکارکننده یک طبیعت موازی محتمل در روندیابی بارش ورودی بود. نهایتاً بر اساس روش مونت کارلو، نتایج حاصله تحت تحلیل حساسیت قرار گرفتند و میزان اعتمادپذیری آنها کمی شد.

***واژه‌های کلیدی:*** مدل‌سازی اطلاعات محورسببی، فرآیند بارش، رواناب، تخمین برگشتی، مدل‌مخزن خطی، فرآیند جریان موازی.

---

**تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۳۱**

**۱- دانشجوی دوره دکتری هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات njalalkamali@yahoo.com**

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

## مقدمه و بررسی منابع

پیچیدگی فرآیند بارش – رواناب در حدی است که علی‌رغم انبوه مطالعات صورت گرفته هنوز یک راه‌کار واحد مورد توافق همگان حاصل نشده و حصول به آن در آینده‌ای نزدیک نیز بسیار دور از انتظار است (٤).

نظر به وجود عدم اطمینان‌های ذاتی متناظر با این فرآیند، قطعاً پیش‌بینی دقیق رواناب غیرممکن بوده و نتایج کاربرد هر مدلی را صرف‌نظر از نوع مدل، حجم معادلات به کار رفته، دقت روش‌های محاسباتی و حتی دقت ورودی‌های اندازه‌گیری شده، باید با تردید و همراه با نامطمئنی نگریست (٦). بدون تردید سهولت توسعه و کاربرد مدل‌های قطعی دلیل اصلی مقبولیت آن‌ها نزد مهندسین می‌باشد. به‌علاوه پای‌بندی عمده رویکردهای مدل‌سازی به فلسفه قیاس (کل به جزء[1]) در تبیین ساختار علمی مدل‌ها را نیز باید از نقاط ضعف و عوامل بروز خطا به شمار آورد. در این فلسفه مدل‌سازی، ساختار درنظر گرفته شده برای مدل، ساختاری کامل و بی‌نقص فرض می‌شود به گونه‌ای که تصور می‌گردد تنها با افزودن خصوصیات سیستم به ساختار مذکور (مرحله واسنجی) پاسخ سیستم به شرایط مرزی و اولیه تأثیرگذار قابل دست‌یابی است. در مقابل در راه کار متکی بر قیاس (جزء به کل[2]) تلاش می‌گردد که فرضیات اولیه در مورد سیستم در حداقل ممکن نگه داشته شود و تعاملات حاکم بر سیستم صرفاً بر اساس مشاهدات ثبت شده استخراج گردند.

رویکرد این مطالعه به مسئله مدل‌سازی بارش – رواناب رویکردی متفاوت است. این رویکرد که تحت عنوان روش مدل‌سازی اطلاعات محورسببی[1] شناخته می‌شود، بدون اتکا به ساختاری از پیش تعیین شده، خصوصیات خطی و غیرخطی رابطه بین دو متغیر ورودی و خروجی سیستم را استخراج می‌کند.

1- Deductive
2- Inductive

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی اطلاعات

اطلاعات ثبت شده در حوضه کارون علیا، یکی از سه زیرحوضه اصلی رودخانه کارون بزرگ، در مطالعه حاضر مورد تحلیل قرار گرفته است. این حوضه به وسعت حدود ۱۰ هزار کیلومتر مربع به ارتفاعات زردکوه واقع در شمال و شمال‌غربی و نیز کوهستان‌های کم‌ارتفاع شرقی مشرف به حوضه آبریز مرکزی ایران محدود می‌شود. رودخانه کارون علیا در محل ایستگاه هیدرومتری ارمند واقع در هشتاد کیلومتری بالادست مرغک به رودخانه اصلی کارون وارد می‌گردد (۲).

از آن‌جا که تحلیل سیلاب‌های منفردی که حاصل نزول یک بارش حداکثر چندروزه هستند، به هیچ‌وجه همه جنبه‌های رفتاری مختلف سیستم حوضه‌ای را در پاسخ به سیگنال‌های بارش تحریک نمی‌کنند، به این لحاظ در این مطالعه یک دوره نوزده روزه متشکل از دو واقعه طوفان در اسفند هفتادوشش و فروردین هفتادوهفت انتخاب شد.

توزیع مکانی بارش بر اساس گزارش جامعی که توسط صدقی (۱۳۷۹) ارایه شده، استخراج گردید (۳). در مطالعه مذکور از اطلاعات یکصدوپنجاه ایستگاه باران‌سنجی در محدوده کل حوضه کارون و حوضه‌های مجاور بهره‌گیری شده بود.

1- Data-Based Mechanistic Modelling (DBM)

توزیع زمانی معرف بارش حوضه نیز بر اساس روش عکس مربع فاصله تخمین زده شد (۱۰). نمودار (۱) سری‌های زمانی بارش و رواناب حوضه را در دوره تاریخی تحلیل نشان می‌دهد.

**شناسایی و تخمین مدل**

**شناسایی مدل اولیه تابع انتقال**

رویکرد (DBM) مبتنی بر فلسفه استنتاج جزء به کل و با نگه داشتن فرضیات اولیه در حداقل سطح ممکنه، کم پارامترترین ساختار مدل از نوع مفهومی 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) با یک ورودی و یک خروجی[1] برای نسبت دادن بارش به رواناب بهره‌گیری می‌شود. مرتبه هر تابع انتقال توسط سه گانه $[m,n,\delta]$ شناخته می‌شود که $\delta$ زمان تأخیر ورودی نسبت به خروجی و $m$ و $n$ درجه چندجمله‌ای‌های تأخیرانداز است. تحلیل‌های ریاضی روش (DBM)، برمبنای بهره‌گیری از قدرت روش‌های برگشتی صافی‌کردن[2] نظیر صافی کالمن[3] استوار است که در آن به جای تخمین ایستای پارامترها در طول بازه زمانی مشاهداتی، به پارامترهای مدل اجازه تغییر در زمان داده می‌شود. نحوه تغییرات زمانی پارامترها و نیز تغییرات آن‌ها در مقابل تغییرات سایر متغیرهای حالت سیستم[4] علاوه بر این که آشکارکننده خصوصیات خطی یا غیرخطی رابطه متغیرهای ورودی و خروجی سیستم است، در استخراج رابطه نهایی تبدیل بارش به بارش مؤثر و سپس رواناب قابل استفاده می‌باشد.

در این تحقیق در ابتدا کم پارامترترین مدل تابع انتقال شناسایی گردید. روش کلی در انتخاب بهترین مرتبه مدل (TF)، آزمون ترکیب‌های مختلف از مراتب سه‌گانه و سپس انتخاب مناسب‌ترین ترکیب با اتکا به معیارهای نیکویی برازش است. معیارهای عددی مورد استفاده در این تحقیق عبارت بودند از ضریب تعیین شبیه‌سازی $\left(R_t^2\right)$ و معیار اطلاعات یانگ[1]. ضریب تعیین مبین توانایی مدل در انطباق خروجی‌های محاسباتی و مشاهداتی مدل است، در حالی که معیار یانگ علاوه بر منعکس‌کردن توانایی مذکور، فراهم‌آورنده شاخصی جهت رسیدن به مدلی با حداقل تعداد پارامترهای ممکن می‌باشد. پارامترهای توابع انتقال نیز با استفاده از روش متغیر ابزاری پالایش شده[2] تخمین زده شدند (٦). جدول (۱) حاوی بهترین مدل شناسایی شده از مرتبه یک می‌باشد.

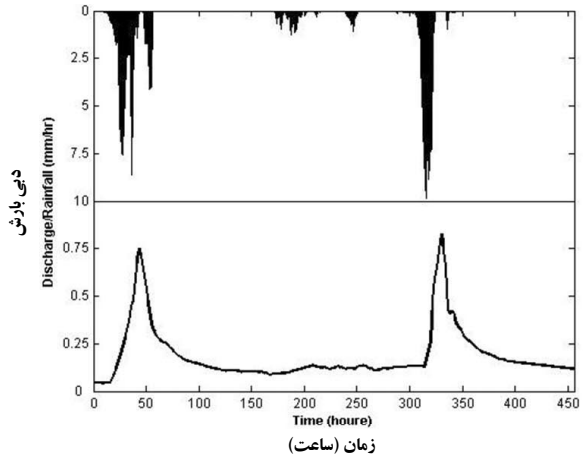
**جدول۱- بهترین مدل (TF) از مرتبه اول**

| $n$ | $m$ | $\delta$ | $YIC$ | $R_t^2$ |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱ | ۳ | -۸/٤٦ | ۰/۷۱۲۲ |

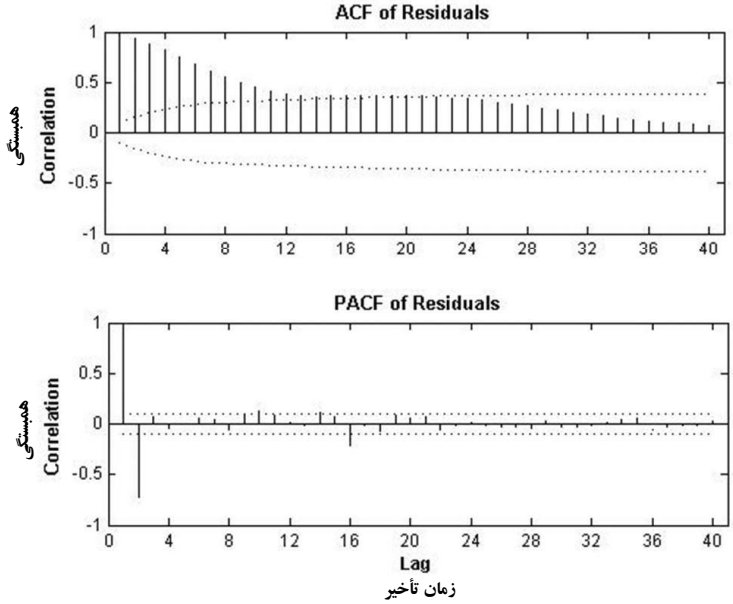
نمودار (۲) توابع همبستگی[3] و خودهمبستگی جزئی[4] سری زمانی مانده‌های پاسخ شبیه‌سازی مدل مرتبه [۳ ۱ ۱] را نشان می‌دهد.

1- Single Input Single Output (SISO)
2- Recursive Filtering Method
3- Kalman Filtering
4- State Variable

1- Young Information Criteria (YIC)
2- Simplified Refined Instrumental Variable (SRIV)
3- Auto Correlation Function (ACF)
4- Partial Auto Correlation Function (PACF)




**نمودار۱- سری‌های زمانی بارش – رواناب – حوضه کارون علیا، ۲۶ اسفند ۱۳۷۶ الی ۱۵ فروردین ۱۳۷۷**




**نمودار۲- الف: تابع خودهمبستگی مانده‌ها – ب: تابع خود همبستگی جزیی مانده‌ها**

مشاهده خود همبستگی‌های معنی‌دار مانده‌ها حاکی از وجود ساختارهای شناسایی نشده در قالب مدل خطی اولیه است. در این مطالعه جهت ردیابی تغییرات زمانی پارامترهای مدل از الگوی گام‌برداری تصادفی جمع بسته شده[1] بهره‌گیری شد.

**تخمین پارامترهای متغیر زمانی و استخراج صافی تبدیل بارش**

با اعمال الگوریتم تخمین (FIS) جهت تخمین وابسته به زمان پارامترهای مدل (TF)، مقادیر نسبت واریانس اغتشاش[1] در آخرین تنظیم برابر [۰/۱۸۵۸، ۳/۹۸e -۳۰] به دست آمد. نسبت واریانس اغتشاش پارامترها که شاخصی از تغییرات زمانی پارامترها است با یکدیگر قابل مقایسه نبوده و حاکی از تغییرات شدید پارامتر $b_{0,t}$ نسبت به پارامتر $a_{1,t}$

1- Integrated Random Walk (IRW)

1- Noise Variance Ratio (NVR)

است. وجود تغییرات شدید زمانی در پارامتر $b_{0,t}$ دلالت بر وجود رابطه غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل دارد. شکل (۳)- الف تغییرات زمانی پارامتر $b_{0,t}$ را با ثابت فرض‌کردن $a_{1,t}$ نشان می‌دهد.

نمودار (۳) – ب خطای استاندارد تخمین در هر گام زمانی را در مقابل بارش مشاهداتی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که بیشترین اطمینان نسبت به تخمین پارامتر $b_{0,t}$ متناظر با گام‌های زمانی است که سیگنال‌های بارش به سیستم اعمال شده است، یعنی جایی که بیشترین اطلاعات برای تخمین $b_{0,t}$ موجود بوده است.

به این ترتیب نظر به تغییرات زمانی شدید $b_{0,t}$، این پارامتر عامل غیرخطی‌کننده رابطه بارش – رواناب است. به این ترتیب به‌نظر می‌رسد که بتوان رابطه تبدیل بارش کل به بارش مؤثر را از تغییرات زمانی $b_{0,t}$ استخراج نمود.

ذخیره رطوبتی خاک در حوضه مهم‌ترین عامل در تبدیل بارش کل به رواناب می‌باشد. بهترین عامل قابل اندازه‌گیری که مستقیماً منعکس‌کننده شرایط رطوبتی حوضه می‌باشد، رواناب مشاهداتی است.

نمودار (٤)، تغییرات پارامتر $b_{0,t}$ را در مقابل رواناب مشاهداتی نشان می‌دهد. وجود رابطه‌ای بین دو پارامتر مذکور و جریان مشاهداتی، کاملاً آشکار است. این شکل بر اساس تخمین‌های $b_{0,t}$ با بالاترین اعتمادپذیری ترسیم شده است.

بازسازی رابطه فوق توسط یک رابطه نمایی، (معادله۱) انجام شد.

$$b_t = \alpha.y_t^B + \xi_t \qquad (۱)$$

بهره‌گیری از یک رابطه نمایی علاوه بر این که با فیزیک مسئله انطباق دارد، در تعدادی از مطالعات دیگر نیز منجر به نتایج بسیار خوبی شده است (۵).

بهینه‌سازی هم زمان روابط (۱) و (۲) جهت رسیدن به حداقل مربعات خطا، ضرایب نهایی $\alpha$ و $\beta$ را نتیجه خواهد داد.

$$\alpha = \sum y_t / \sum y_t^B.r_t \qquad (۲)$$

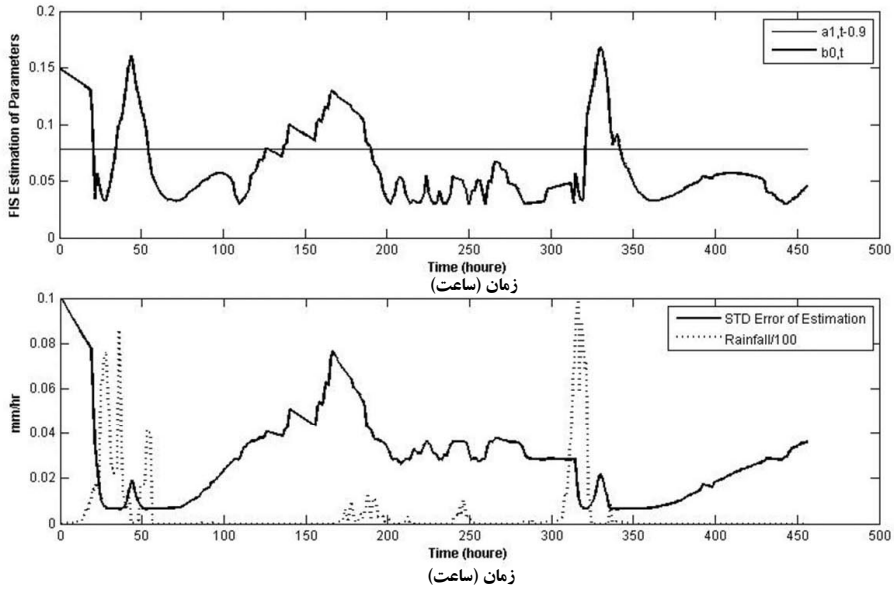
رابطه (۲) برای برقراری توازن جرمی سیستم اعمال شده است. این رابطه به معنای تساوی حجم رواناب رودخانه‌ای و حجم بارش مؤثر در طول بازه زمانی مشاهداتی است. اگرچه اثرات ذوب برف انباشته شده در حوضه در این فرض دیده نشده است، اما به هر حال اعمال فرض مذکور جهت برقراری نوعی بیلان ورودی/خروجی سیستم حوضه‌ای الزامی است. به این ترتیب سری زمانی جدیدی به صورت رابطه (۳) استخراج خواهد شد.

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

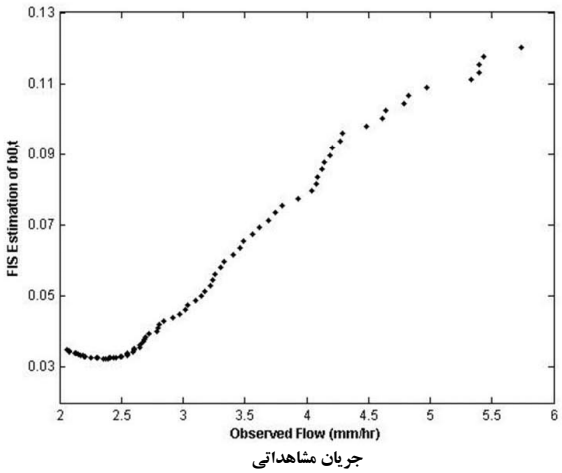
که در آن $r_t$ سری زمانی بارش کل است. $u_t$ سری زمانی صافی‌شده بارش کل است که آن را سری زمانی بارش مؤثر می‌نامیم. در این مطالعه رابطه فوق تخمینی از رابطه غیرخطی تبدیل بارش به رواناب انگاشته شده است. شکل (۵) سری زمانی بارش مؤثر را در مقابل بارش مشاهداتی نشان می‌دهد.

**بهینه‌سازی نهایی**

با استخراج بخشی از رابطه غیرخطی فرآیند بارش – رواناب در این مرحله بهترین تابع انتقال رواناب در مقابل بارش مؤثر شناسایی گردید. مجدداً با آزمون مراتب مختلف از سه‌گانه‌های $[n,m,\delta]$ ، بهترین مدل از مرتبه [٦ ۲ ۲] با معیارهای نیکویی برازش $R_t^2 = ۰/۹۲$ و YIC= -۹/۰۵ به‌دست آمد.




**نمودار۳- الف : تخمین تغییرات زمانی پارامتر $b_{0,t}$ ب: خطای استاندارد تخمین $b_{0,t}$ در مقابل بارش مشاهداتی**



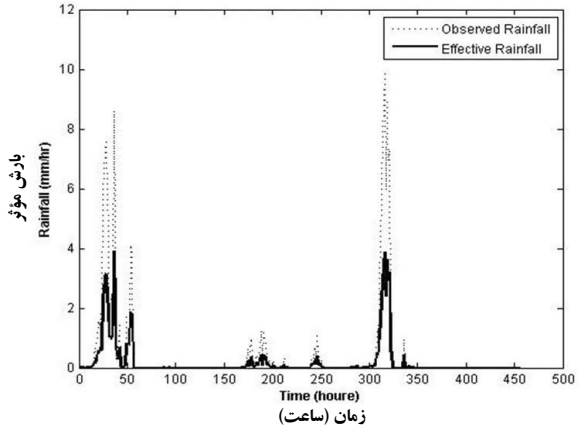

**نمودار٤- تغییرات پارامتر $b_{0,t}$ در مقابل جریان مشاهداتی**

بنابراین ۹۲ درصد از اطلاعات جریان توسط مدل تشریح گردید. معیارهای مذکور حاکی از برازش نسبتاً خوب مدل بر سری اطلاعات مشاهداتی می‌باشد.

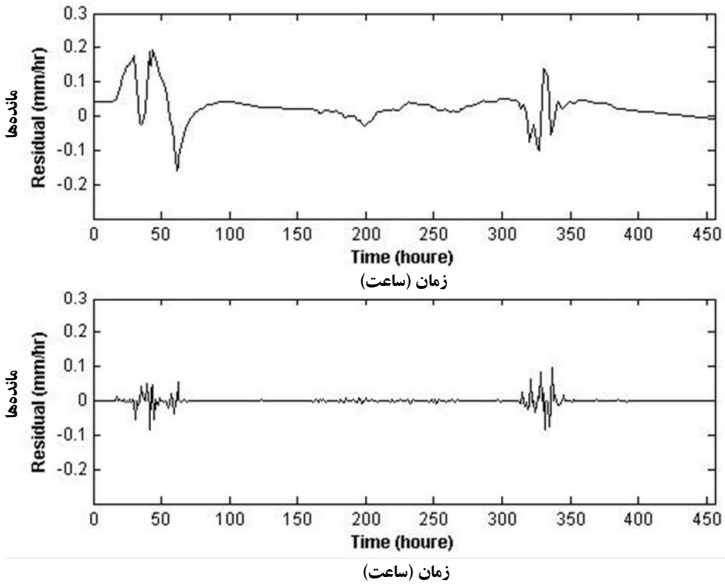
نمودار (٦) مانده‌های مدل رگراسیون (استفاده از سری زمانی بارش مؤثر و جریان مشاهداتی گام‌های زمانی قبل) و مدل شبیه‌سازی (استفاده تنها از سری زمانی بارش مؤثر) را ارایه می‌کند.

**صحت‌سنجی مدل**

اگر سری زمانی مانده‌های یک مدل اغتشاش خالص باشند، می‌توان ادعا نمود که شناسایی سیستم به طور کامل صورت پذیرفته است. درصورتی‌که مانده‌های مدل دارای همبستگی سریال باشند هر کدام از دو مدل سیستم (بخش قطعی) یا مدل اغتشاش (بخش احتمالی) ممکن است نادرست یا ناکامل باشند. اما وجود همبستگی در عرض مانده‌ها با ورودی‌های مدل، مشخصاً به دلیل عدم کفایت مدل

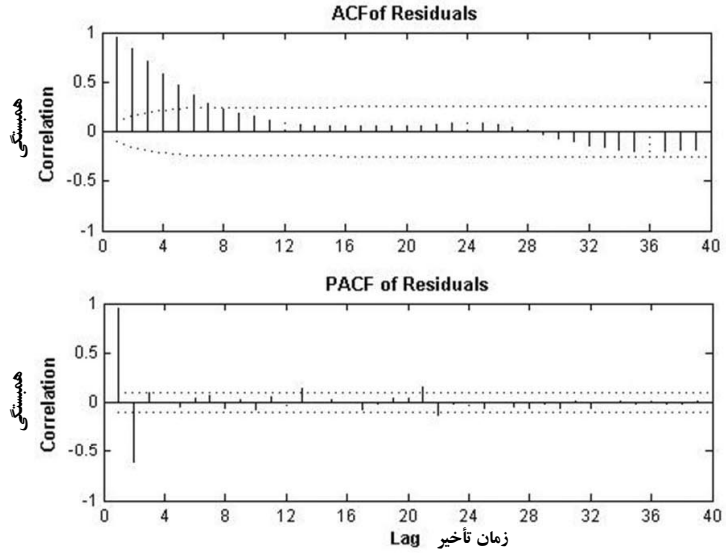



**نمودار۵- سری‌های زمانی بارش مشاهداتی و بارش مؤثر معرف حوضه**



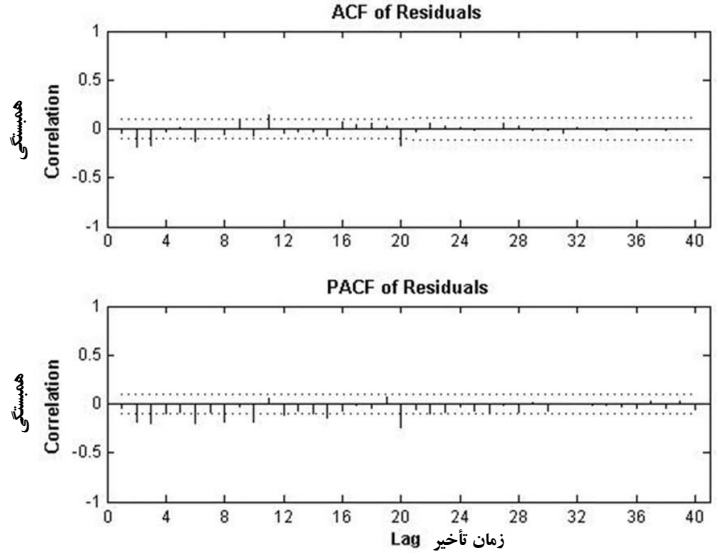

**نمودار٦- الف: مانده‌های پاسخ شبیه‌سازی ب: مانده‌های پاسخ رگراسیون**

سیستم است. نمودارهای (۷ و ۸) خصوصیات خودهم‌بستگی و خود همبستگی جزیی پاسخ‌های شبیه‌سازی و رگراسیون مدل را نشان می‌دهند. علی‌رغم آن که وجود خود همبستگی در سری زمانی مانده‌های پاسخ شبیه‌سازی آشکار است، اما مقایسه این نمودار با نمودار (۲) حاکی از حذف بخش نسبتاً قابل توجهی از ساختار مذکور است. به عبارت دیگر رابطه نمایی ارایه شده جهت بازسازی صافی تبدیل بارش به بارش مؤثر قادر به تشریح بخشی از این فرآیند بوده است. شکی نیست که فرآیند پیچیده‌ی مذکور تنها توسط یک رابطه از این نوع قابل توصیف نیست و برای توصیف کامل آن در نظرگیری سایر متغیرهای دست‌اندرکار که غالباً اندازه‌گیری مطمئنی از آن‌ها در دست نیست، نیاز است. از طرفی بررسی خصوصیات مانده‌های پاسخ رگراسیون مدل دلالت بر خالص‌بودن این اغتشاشات دارد و این نشان‌دهنده توانایی مدل در ارایه پیش‌دیدهای یک گام به جلو می‌باشد.




**نمودار۷- خصوصیات مانده‌های پاسخ شبیه‌سازی**

**الف: تابع خود همبستگی ب: تابع خود همبستگی جزیی**




**نمودار۸- خصوصیات مانده‌های پاسخ رگراسیون**

**الف: تابع خود همبستگی ب: تابع خود همبستگی جزیی**

شکل (۹) نیز همبستگی در عرض مانده‌ها را با ورودی مدل نشان می‌دهد. در حالی که پاسخ رگراسیون دلالت بر کفایت آماری مدل دارد، پاسخ شبیه‌سازی کمی ناکافی ارزیابی می‌گردد.

**تفسیر فیزیکی مدل**

اگرچه توانایی مدل نهایی در توصیف اطلاعات مشاهداتی خصوصاً در پیش‌دیدهای یک گام به جلو ارضاءکننده می‌باشد، اما فرآیند مدل‌سازی از نقطه‌نظر استراتژی (DBM) در این مرحله تکمیل نیست. این استراتژی تنها در صورتی نتایج مدل‌سازی را معتبر می‌شناسد که بتوان مدل حاصله را با استفاده از دانش هیدرولوژی تفسیر نمود.

مدل تابع انتقال نهایی، قابل تجزیه به دو مدل تابع انتقال از مرتبه اول که به‌طور موازی با یکدیگر ارتباط دارند، می‌باشد. با انطباق تابع انتقال مرتبه اول با

عنصر مخزن خطی می‌توان تصور نمود که بارش مؤثر از طریق دو مخزن خطی موازی روندیابی می‌شود (نمودار۱۰). هر یک از مخازن مذکور خصوصیت خاص خود را در شکل‌دهی توزیع زمانی رواناب ناشی از بارش مؤثر وارد به آن، ارایه می‌کند. به این لحاظ هر مخزن، تشکیل یک مسیر جریان[1] را می‌دهد که تشخیص این مسیرها بر اساس پارامتر میانگین زمان نگه‌داشت مخزن[2] انجام می‌شود.

یکی از این مسیرها، مسیر سریع با میانگین زمان نگه داشت مخزن برابر ۱۲/٦ ساعت، توصیفی از بخش طغیان‌کننده هیدروگراف سیلاب تحت اثر اعمال سیگنال‌های بارش مؤثر را ارایه می‌دهد. در حالی که مسیر دیگر، مسیر کند با میانگین زمان نگه داشت مخزن برابر ۷٦۸/۷ ساعت، فراهم‌کننده توصیفی از بخش فروکش‌کننده جریان سیلاب در بازه‌های زمانی بین بارش‌ها است. نمودار (۱۱) هیدروگراف مسیرهای جریان را به تفکیک نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسیر کند جریان نیز در بازه‌های زمانی بارش عکس‌العمل نشان می‌دهد که آن را می‌توان به افزایش ذخیره رطوبتی حوضه و یا احتمالاً تحریک و جابه‌جایی آب ذخیره شده قبلی در حوضه نسبت داد که با توجه به ثابت زمانی بزرگ آن، فروکش جریانی که توسط مسیر فوق‌الذکر کنترل می‌گردد، بسیار بطئی است. بررسی حجم بارش مؤثر روندیابی شده از هر مسیر نشان‌دهنده ی این است که ٤۲/۹٪ از آن توسط مسیر سریع و ۵۷/۱٪ از آن توسط مسیر کند روندیابی می‌گردد.

1- Flow Pathway
2- Mean Residence Time (MRT)

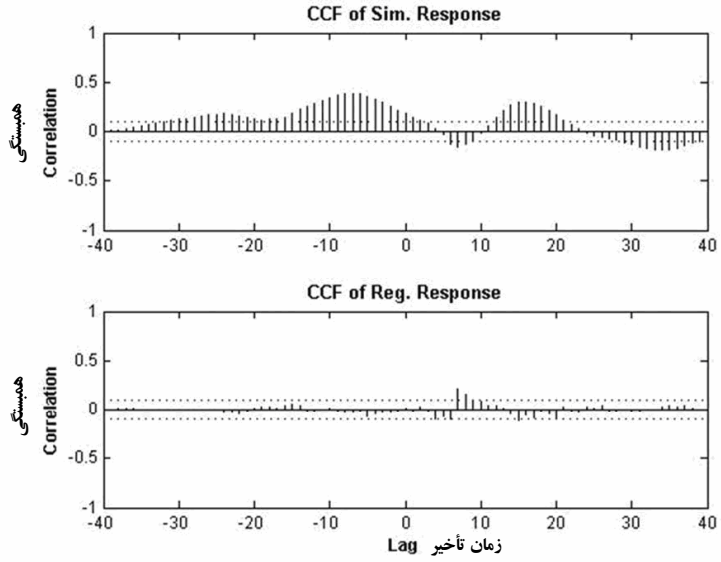
**تحلیل حساسیت مدل**

در این مطالعه، شبیه‌سازی مونت‌کارلو[1] برای ارزیابی حساسیت مدل بارش – رواناب استخراج شده نسبت به عدم اطمینان در تخمین آماری پارامترها به کار گرفته شده است. این روش مبتنی است بر اجرای مکرر مدل توسط مجموعه‌ای از پارامترها که در هر اجرا به‌طور تصادفی از تابع احتمال متناظرشان انتخاب می‌شوند.

نتایجی از شبیه‌سازی که ارضاکننده یک معیار نیکویی برازش از پیش تعیین شده باشند، حفظ شده و بقیه مردود تلقی می‌گردند.

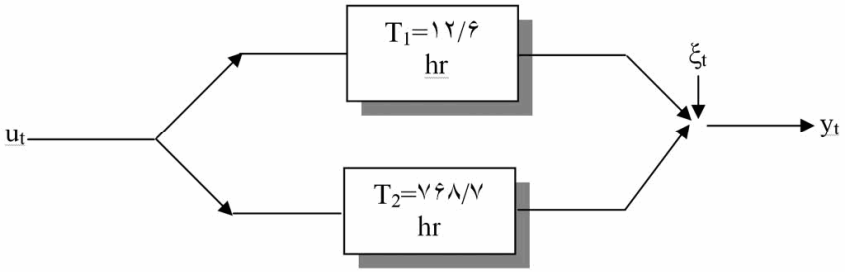
در این مطالعه برای حفظ همبستگی مذکور و نیز در نظرگرفتن طبیعت تصادفی‌بودن پارامترها (عمدتاً به دلیل عدم اطمینان ورودی مدل و سایر اغتشاشات نظیر اغتشاش فرآیند و مقادیر اندازه‌گیری شده) توزیع احتمال حاکم بر پارامترها توزیع نرمال چندمتغیره فرض گردید. نمودارهای (۱۲ و ۱۳) حاصل چندین صدهزار مرتبه اجرای مدل هستند که از آن میان ده‌هزار اجرا، ارضاکننده تشخیص داده شد. نمودار (۱۲) بر تحلیل حساسیت متوسط زمان نگه‌داشت هر یک از مخازن تشکیل‌دهنده مسیرهای تند و کند متمرکز است. بررسی هیستوگرام‌های حاصل جالب توجه است. هیستوگرام مسیر تند، متقارن به دست آمده است. درحالی‌که هیستوگرام نظیر مسیر کند، چولگی به سمت مقادیر بزرگ را نشان می‌دهد. بروز خاصیت مذکور دور از انتظار نیست، زیرا پاسخ فرآیند کند به بارش بسیار بطئی است. لذا محتوای اطلاعات مشاهداتی برای شناسایی خصوصیات این فرایند کافی نبوده و عدم اطمینان متناظر با آن بیشتر است.

1- Monte Carlo Simulation (MCS)

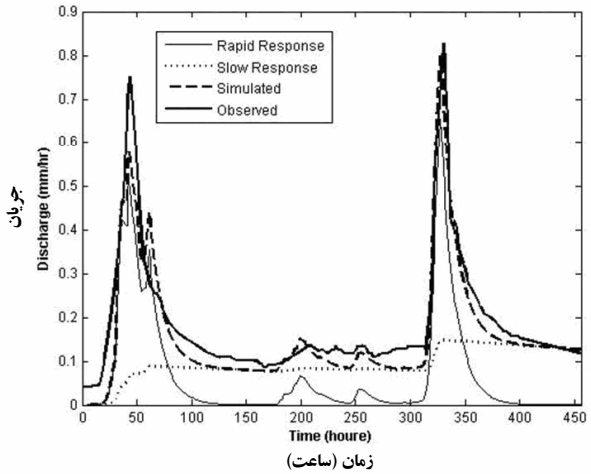



نمودار۹- همبستگی در عرض مانده‌ها

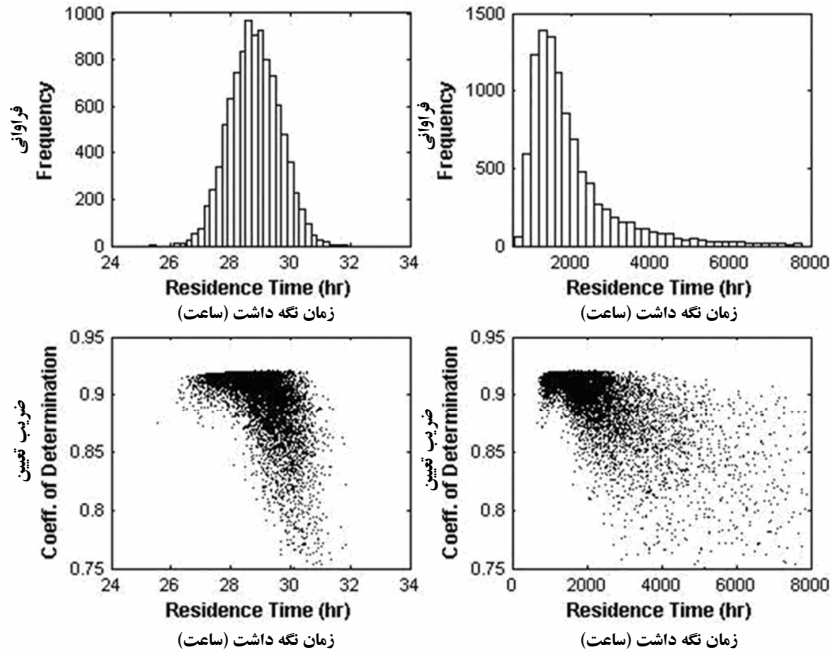
ب: پاسخ رگراسیون الف: پاسخ شبیه‌سازی



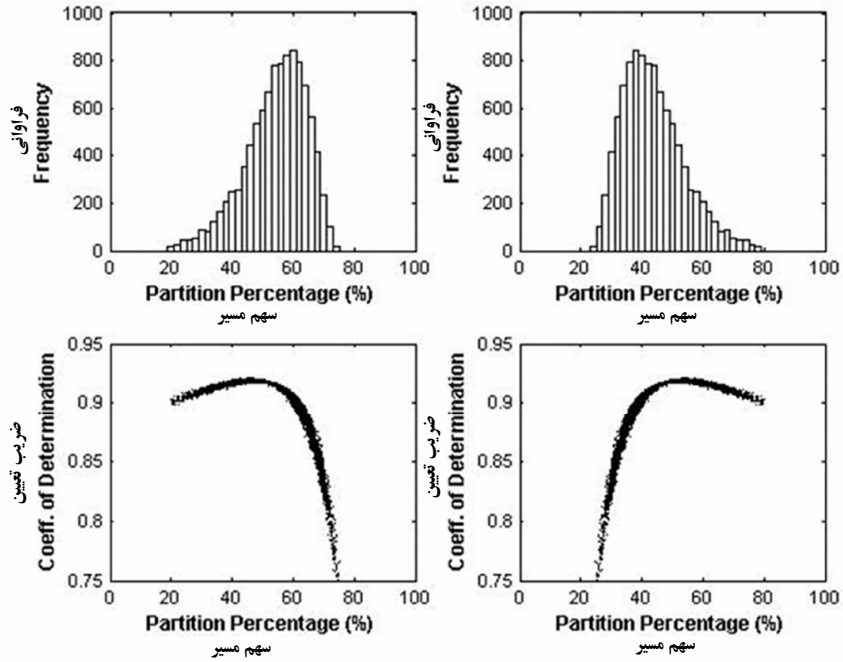

نمودار۱۰- روندیابی بارش مؤثر از طریق مسیرهای موازی




نمودار۱۱- هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده، مشاهداتی و مسیرهای جریان تند و کند




نمودار۱۲- الف: فراوانی زمان نگه‌داشت مخزن مسیر کند ب: فراوانی زمان نگه‌داشت مخزن مسیر تند
ج: زمان نگه‌داشت مخزن مسیر کند و ضریب تعیین د: زمان نگه‌داشت مخزن مسیر تند و ضریب تعیین




نمودار۱۳- الف: فراوانی درصد حجم عبوری جریان از مسیر تند ب: فراوانی درصد حجم عبوری جریان از مسیر کند
ج: حجم عبوری از مخزن مسیر تند و ضریب تعیین مدل د: حجم عبوری از مخزن مسیر تند و ضریب تعیین مدل

در نمودار (۱۳) تحلیل حساسیت درصد جریان عبوری از هر فرآیند منعکس شده است. ملاحظه می‌گردد که در ارتباط با مسیر تند، بیشترین فراوانی نظیر درصد عبور ۳۵ الی ٤٥ درصد بوده و در ارتباط با مسیر کند بیشترین فراوانی نظیر درصد عبور ۵۵ الی ٦۵درصد می‌باشد. درصورتی‌که بتوان عمده عملکرد مسیر کند را به جریان‌های پایه و آب ذخیره‌شده 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.

## نتایج و بحث

در این مطالعه مدل‌سازی فرآیند بارش – رواناب زیرحوضه کارون علیا از حوضه کارون بزرگ مورد بررسی قرار گرفت. به علت وجود عدم اطمینان‌های ذاتی متناظر با فرآیند تحت بررسی، مدل‌های قطعی در این محدوده ناکافی به‌نظر می‌رسند. بنابراین، کمی نمودن عدم اطمینان‌های مذکور و سپس بهره‌گیری از آن‌ها در رویه‌های تحلیل حساسیت، یکی از مزایای رهیافت‌های استوکاستیک به‌شمار می‌آید. در این تحقیق از راه کار مدل‌سازی (DBM) استفاده شد. استراتژی (DBM) راه کاری قدرتمند برای شناسایی ساختار و تخمین مدل‌های دینامیک با حداقل تعداد ممکن از پارامترها را ارایه می‌کند.

بدون تردید عوامل مختلفی نظیر شرایط اولیه، شرایط مرزی، خصوصیات پوششی و ویژگی‌های زیر سطحی حوضه در ساخت و شکل‌دهی رفتار و واکنش حوضه به بارش دست‌اندر کارند و با استناد تنها به بارش نازل شده آن هم به گونه‌ای نامطمئن و در غیاب سایر متغیرها تنها می‌توان انتظار شناسایی شمایی از سیستم تحت بررسی را داشت. جهت پرهیز از خطای ناشی از فرض جداسازی رواناب به جریان پایه و رواناب مستقیم و نیز خطای جداسازی بارش مازاد از بارش کل براساس روش‌هایی که دلیلی بر صحت آن‌ها در پهنه عظیم حوضه تحت بررسی وجود ندارد، بارش کل در مقابل رواناب کل مدل‌سازی شد. تحلیل وابسته به زمان پارامترها دلالت بر وجود رابطه‌ای غیرخطی بین بارش و رواناب داشت. متأسفانه حجم اطلاعات مشاهداتی وقایع 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 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 به‌نظر 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.

علی‌رغم مطالعات متعددی که در ارتباط با مدل‌سازی بارش – رواناب در ایران و خصوصاً حوضه کارون صورت گرفته است، اما تاکنون هیچ یک از محققین از رهیافت ارایه شده در این مطالعه جهت مدل‌سازی بهره نبرده‌اند. در حقیقت در مطالعات خارج از کشور نیز استفاده از چنین روش‌هایی بسیار محدود گزارش شده است و عمده مطالعات نظیر متعلق است به یانگ و همکاران ایشان از دانشگاه لنکستر انگلستان (٦). این رهیافت اگر چه

در محاسبات کمی پیچیده است اما حاصل آن استخراج و شناسایی ساختاری نسبتاً ساده برای روندیابی جریان رواناب در حوضه است. غالباً ساختارهای حاصل از این روش در مقایسه با ساختارهایی که مدل‌های جعبه سیاه ارایه می‌کنند بسیار ساده‌تر است واز پارامترهای کمتری بهره می‌برد.

مطالعه حاضر منجر به شناسایی مسیرهای موازی در سیستم حوضه‌ای گردید که هر یک از این مسیرها خصوصیات یک نوع پاسخ حوضه به بارش مؤثر را نشان می‌دهد. مسیرهای مذکور دارای تفسیر هیدرولوژیکی هستند و این نقطه تمایز این رهیافت مدل‌سازی با رهیافت مدل‌سازی جعبه سیاه است که در آن معادلات واسنجی شده هیچ نسبتی با فیزیک مسئله ندارند. اگر چه بررسی آماری مانده‌های مدل حاکی از عدم کفایت برخی خواص آماری آن‌ها می‌باشد، اما بخش بزرگی از این عدم کفایت به عقیده مؤلف و نیز سایر محققین (٤) در کلیه مدل‌های بارش- رواناب ملاحظه می‌گردد که به علت کاستی در تعریف رابطه غیر خطی بارش مؤثر و نیز سایر متغیرهای تأثیرگذار بر فرایند است که در مدل‌سازی در نظرگرفته نشده‌اند زیرا استفاده از اطلاعات بارش مشاهداتی به‌عنوان تنها ورودی مدل توانایی تولید ساختاری با اغتشاش خالص را نخواهد داشت (۵).

## نتیجه‌گیری کلی

با توجه به قدرت و در عین حال سادگی ساختار مدل ارایه شده در این مقاله، رهیافت حاضر بستر بسیار مناسبی را برای توسعه سیستم‌های هشدار سیلاب فراهم می‌آورد و استفاده از آن برای توسعه بخش نرم‌افزاری این سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود. در عین حال رهیافت حاضر هنوز در مرحله ابتدایی توسعه قرار دارد و نیاز به مطالعات تکمیلی زیادی برای حذف برخی خصوصیات نامطلوب نتایج احساس می‌گردد. از جمله به‌نظر می‌رسد که می‌توان تابع نمایی ساده ارتباط بارش مؤثر و رواناب را با تابع کامل‌تری جایگزین کرد و در مطالعات بعدی امکان استفاده از سایرپارامترهای تأثیرگذار در فرایند نظیر ذخیره رطوبتی حوضه را بررسی نمود.

## منابع


۱- جلال کمالی، ن. ۱۳۸٤. بررسی و بازنگری در شیوه استفاده از اطلاعات منطقه‌ای و ویژگی‌های زمانی و مکانی بارش و تلفات در شبیه‌سازی جریان به کمک مدل‌های بارش – رواناب در حوضه آبریز کارون. رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران. ۱٤۰صفحه.

۲- صدقی، ح. ۱۳۷۱. ارزیابی و برآورد ابعاد حداکثر بارش و سیلاب متحمل حوضه آبریز کارون در پل‌شالو به عنوان معیار طراحی سد کارون ۳. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، تهران،۲۰۰ صفحه.

۳- صدقی، ح. ۱۳۷۹. پروژه به‌روزرسانی و بررسی گزارشات مطالعات هیدرولوژی سیلاب گتوند – گزارش نهایی. شرکت خدمات مهندسی برق مشانیر، تهران، ۱٦۵ صفحه .

4. Beven, K. J. 2001. Rainfall-runoff modelling: the primer. Chichester: J. Willey. 360 .

5. Young, P.C. 2002a. Advances in real-time flood forecasting. CRES report number TR/176, Lancaster University Press, UK.

6. Young, P.C . and K. J. Beven. 1994. Data based mechanistic modeling and rainfall – flow non-linearity. Environmetrics. 5: 335-363.
7. Young, P.C., C. J. Taylor, W. Tych, D.J. Pedregal, and P.G. McKenna. 2004. The Captain Toolbox. Center for research on environmental systems and statistics, Lancaster university. U.K.