Archive of SID

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و چهارم، شماره اول، ۱۳۹۶
http://jwsc.gau.ac.ir

کاربرد آنالیز بیز و فیلتر ذره‌ای در مدل‌های بارش– رواناب و تحلیل عدم قطعیت

مجتبی احمدی‌زاده[۱] و *صفر معروفی[۲]

[۱]دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا، [۲]استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۹

چکیده

سابقه و هدف: استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و انجام پیش‌بینی در مطالعات مختلف منابع آب یک ضرورت می‌باشد. پیش‌بینی جریان خروجی از حوضه‌های آبریز با توجه به پیچیدگی‌های موجود در چرخه هیدرولوژیکی همواره با انجام فرض‌هایی همراه است. با توجه به ساده‌سازی در روابط توسعه داده شده در ساختار مدل‌های بارش– رواناب و فرضیات به‌کار رفته در آن‌ها، پیش‌بینی‌ها همواره با عدم قطعیت همراه می‌باشند. منابع عدم قطعیت در این مدل‌ها را می‌توان در سه دسته که ناشی از به‌کارگیری پارامترها، ساختار مدل و داده‌های مورد استفاده می‌باشند، دسته‌بندی نمود. لزوم تدقیق پیش‌بینی‌ها و ارائه عدم قطعیت مدل‌ها باید مورد توجه قرار گرفته و برای تحلیل این موضوع روش‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله روش‌های پیشنهادی شیوه بروزرسانی داده‌ها می‌باشد و فیلتر ذره‌ای از روش‌های توسعه داده شده در این خصوص می‌باشد. هدف از این پژوهش استفاده از روش فیلتر ذره‌ای در بروزرسانی و بهبود پیش‌بینی جریان آب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل بارش- رواناب HYMOD با لحاظ جریان مشاهداتی می‌باشد. همچنین با کاربرد این روش کمی‌سازی عدم قطعیت و کاهش آن با توجه به منابع مختلف خطا مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، برای تدقیق پیش‌بینی‌ها از شیوه بروزرسانی داده‌ها استفاده گردید. این روش با به‌کارگیری فیلتر ذره‌ای، تخمین متوالی بیز و تابع توزیع پسین مقدار رطوبت مدل Hymod و پارامترهای آن را در حوضه آبریز کسیلیان با مساحت حدود ٦٧ کیلومترمربع در مقیاس روزانه محاسبه شد. فیلتر ذره‌ای بر پایه معادله بیز و تابع حداکثر درستنمایی خطاها در بازه زمانی موردنظر می‌باشد. در ضمن در به‌کارگیری این شیوه باید از روش ترکیبی بازنمونه‌گیری احتمالاتی نیز استفاده کرد. این روش از واگرایی تحلیل‌ها جلوگیری کرده و همچنین مشکلاتی مانند تبهگنی و پدیده غنی‌سازی دسته ذرات و میل نمودن وزن دسته ذرات به عدد واحد را تصحیح می‌نماید.

یافته‌ها: روش فیلتر ذره‌ای استفاده از پارامترهای مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان با تولید دسته پارامترهای تصادفی و ایجاد توزیع پیشین را امکان‌پذیر می‌نماید. این شیوه در تدقیق پیش‌بینی‌ها و استفاده هم‌زمان از متغیر رطوبت خاک و پارامترها در تحلیل‌ها مؤثر است. همچنین با تعریف تابع درستنمایی خطای اولیه و به‌کار بردن تئوری بیز نسبت به اصلاح پیش‌بینی‌ها کمک می‌نماید. به‌علاوه این روش تابع چگالی احتمال پسین پارامترها را نیز ارائه نموده و تابع چگالی اولیه را اصلاح می‌کند.

* مسئول مکاتبه: smarofi@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که استفاده از روش فیلتر ذره‌ای در ترکیب با شیوه بازنمونه‌گیری آماری در بروزرسانی هیدرولوژیکی سبب تدقیق پیش‌بینی‌ها در حوضه آبریز کسیلیان می‌گردد. همچنین روش فیلتر ذره‌ای سبب می‌گردد که شاخص نش- ساتکلیف در مقایسه با شیوه متداول در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان، ۲۲ درصد افزایش داشته و مقدار آن از ۰/۵۵ به ۰/٦۷ برسد.

واژه‌های کلیدی: مدل HyMod، فیلتر ذره‌ای، بهنگام‌سازی جریان، بازنمونه‌گیری، تبهگنی

مقدمه

مدل‌های مفهومی بارش- رواناب رطوبت خاک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان در گام‌های زمانی مختلف مانند جریان روزانه در سطح حوضه‌های آبریز به‌کار می‌روند. استفاده از این مدل‌ها نیازمند وجود داده‌های بارش و جریان ثبت شده می‌باشد. اما در اکثر حوضه‌های آبریز اطلاعات تاریخی کافی و دسترسی به تمامی اطلاعات مورد نیاز امکان‌پذیر نیست. میزان رطوبت خاک نیز یکی از این متغیرها می‌باشد که اطلاعات آن عموماً در دسترس نبوده و تخمین آن ضروری است. همچنین مقدار پارامترهای تعریف شده در مدل‌ها مشخص نبوده و باید با روش‌های توسعه داده شده و با بهینه‌سازی یا شبیه‌سازی مشخص شوند. بویل و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی خودکار در واسنجی مدل‌ها و با تعریف تابع هدف به دسته پارامترهای برتر دست یافت (۳). اما سروشیان و همکاران (۱۹۹۳) و دوان و همکاران (۱۹۹۲) در مطالعاتی نشان دادند که عدم پیوستگی در مشتقات تابع هدف منتهی به پارامترهای برتر نخواهد شد (۱۸، ۷). در به‌کارگیری مدل‌های بارش- رواناب باید به عدم قطعیت حاکم بر این مدل‌ها توجه نمود. منابع عدم قطعیت در این مدل‌ها را می‌توان در سه دسته قرار داد که شامل استفاده از داده‌های اطلاعاتی، ساختار مدل موردنظر و نیز پارامترهای مدل می‌باشند. در سال‌های اخیر تلاش گسترده‌ای با هدف کاهش عدم قطعیت و ریسک استفاده از مدل‌های بارش- رواناب انجام شده است. دوان و همکاران (۱۹۹۲) محاسبه پارامترهای مدل‌های بارش- رواناب را با استفاده از شیوه‌های تکاملی انجام دادند و بیان داشتند این شیوه‌ها نمی‌توانند نسبت به ارائه عدم قطعیت کمک نمایند (۷). بیلندی و همکاران (۲۰۱۵) نیز به‌منظور بررسی عدم قطعیت پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌های بارش- رواناب از روش‌های DREAM و SCEM-UA استفاده کردند و کارایی این دو مدل را در فرآیندهای بارش- رواناب تک‌واقعه‌ای مورد بررسی قرار دادند. ایشان روش DREAM را با توجه به شاخص‌های مورد استفاده روش بهتری معرفی نمودند (۱۵).

اولین شیوه بروزرسانی متوالی داده‌ها[1] با نام فیلتر کالمن[2] برای کنترل بهینه سیستم‌های خطی توسعه داده شد. برای استفاده در سیستم‌های پویای غیرخطی، می‌توان از فیلتر کالمن بسط داده شده استفاده نمود، در این شیوه معادلات کواریانس خطا با استفاده از اپراتور تانژانت، خطی می‌گردند. اونسون (۱۹۹٤) و مایلر و همکاران (۱۹۹٤) بیان داشتند در صورتی که معادلات سیستم کاملاً غیرخطی باشند، به‌دلیل حذف گشتاورهای مرتبه سوم و بالاتر و خطی‌سازی انجام

1- Data Assimilation
2- Kalman Filter

www.SID.ir

Archive of SID

شده این روش ناپایدار می‌گردد (۸، ۱۳). استفاده از تئوری بیز و فیلتر ذره‌ای[1] در علوم مختلف جهت بهنگام‌سازی پیش‌بینی‌ها گسترش یافته است(۸). فیلتر ذره‌ای در دسته روش‌های بروزرسانی داده‌ها قرار می‌گیرد و از این روش بیزی می‌توان به‌منظور تخمین متغیرهای حالت، پارامترها و نیز ارائه عدم قطعیت حاصل از فرآیندهای مختلف در مدل‌های توسعه داده شده، بهره گرفت. توسعه و کاربرد شیوه‌های بروزرسانی متوالی داده‌ها در مطالعات حرکت ماهواره‌ها و رباتیک پیشرفت قابل‌توجهی داشته‌اند. این شیوه‌ها یک چارچوب کلی برای لحاظ نمودن عدم قطعیت داده‌های ورودی، خروجی‌ها، ساختار مدل و نیز تلفیق پیش‌بینی‌های همراه با عدم قطعیت و داده‌های مشاهداتی ارائه می‌نمایند. در مقایسه با شیوه‌های متداول در واسنجی مدل‌های بارش- رواناب که فقط پارامترها با بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند، شیوه بروزرسانی به‌صورت مستمر و پیوسته متغیرهای حالت مدل را با دریافت مشاهدات جدید از جریان آب، با هدف بهبود پیش‌بینی‌ها، بروزرسانی می‌نماید و همچنین دقت پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌نماید. فیلتر ذره‌ای توسط گوردن و همکاران (۱۹۹۳) توسعه داده شده است و در این شیوه تخمین بیزی بازگشتی با هدف تقریب تصادفی توزیع تابع احتمال پسین پارامترهای مدل با دسته‌ای از ذرات وزن‌دار مورد استفاده قرار می‌گیرد (۹). در روش فیلتر ذره‌ای، تابع چگالی پسین[2] با استفاده از دانش اولیه از متغیر حالت در قالب توزیع اولیه تعریف می‌شود. کلارک و روت (۲۰۰۸) بیان داشتند بروزرسانی داده‌ها می‌تواند در تخمین متغیرهای حالت حوضه آبریز مفید باشد و سبب گردد که پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر شوند (۵). روش فیلتر کالمن دسته‌ای[3] نیز یکی از شیوه‌هایی است که در روش بروزرسانی داده‌ها مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. یکی از مزیت‌های فیلتر کالمن دسته‌ای نسبت به روش فیلتر کالمن بسط داده شده، عدم نیاز آن به بسط به معادلات خطی می‌باشد. اما این شیوه نیاز به استفاده از روش مونت- کارلو جهت تولید مقادیر تصادفی دسته ذرات دارد. یکی از فرضیات فیلتر کالمن دسته‌ای تبعیت خطا از توزیع نرمال می‌باشد که به‌ندرت این موضوع در مدل‌های هیدرولوژیکی امکان‌پذیر است (۵). روت و همکاران (۲۰۰۸) و بولیگینا و گوپتا (۲۰۰۹) با لحاظ منابع مختلف خطا، مطالعاتی در خصوص شناسایی و کمی‌سازی عدم قطعیت انجام دادند (٤، ۱۹). هدف از تحلیل عدم قطعیت در یک مدل بارش- رواناب ارائه پیش‌بینی‌های احتمالاتی برای تصمیم‌گیری مطلوب‌تر می‌باشد. در این خصوص بون و فریر (۲۰۰۱) روش تخمین‌گر عدم قطعیت احتمال تعمیم‌یافته را با هدف کمی‌سازی عدم قطعیت مورد استفاده قرار داد (۲). ایشان در این مطالعه مفهوم هم‌پایانی[4] را در بهنگام‌سازی داده‌ها مورد بررسی قرار داد. در مواردی که استفاده از فیلتر کالمن دسته‌ای با توجه به فرضیات تعریف شده در خصوص کاربرد آن قابلیت استفاده را ندارد، لیزنرینگ و همکاران (۲۰۱۱) فیلتر ذره‌ای را روشی با توانمندی بالا معرفی کرده است (۱۰). در پژوهشی توسط لیو (۲۰۰۱) شیوه فیلتر ذره‌ای بر مبنای روش نمونه‌گیری[5] متوالی مؤثر پایه‌ریزی گردید (۱۲). اگرچه فیلتر ذره‌ای می‌تواند در کاربردهای مختلف بسیار مؤثر باشد اما در صورت وجود چندین ذره با ضریب مشارکت بالا نتایج با واگرایی همراه می‌گردند که این پدیده به تبهگنی وزن‌ها معروف می‌باشد و به‌منظور جلوگیری

1- Particle filter
2- Posterior density function
3- Ensemble Kalman Filter
4- Equifinality
5- Resampling

www.SID.ir

Archive of SID

از واگرایی باید از روش بازنمونه‌گیری احتمالاتی استفاده نمود (۱). مرادخانی و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی روش فیلتر ذره‌ای را در انجام مدل‌سازی هیدرولوژیکی و محاسبه عدم قطعیت استفاده نمودند و همچنین این روش را برای تعیین مقدار رطوبت خاک به‌کار بردند (۱۵). روش فیلتر ذره‌ای با توجه به مفاهیم بسط داده شده آن بدون توجه به خطی یا غیرخطی بودن مدل موردنظر قابل استفاده می‌باشد. دیچنت و مرادخانی (۲۰۱۲) در پژوهشی نشان دادند، استفاده از این شیوه نیازی به فرض ایستایی داده‌ها در محاسبه‌ها ندارد (٦). نتایج پژوهش ایشان نشان داد فیلتر ذره‌ای در تخمین متغیرهای وابسته به مدل‌های بارش- رواناب و بازنگری در پیش‌بینی‌ها به‌منظور تدقیق آن‌ها و کاهش عدم قطعیت خروجی‌ها با توجه به طبیعت مسأله کارایی دارد. بنابراین با هدف بررسی کاربرد فیلتر ذره‌ای در این پژوهش ضمن بهینه‌سازی پارامترهای مدل بارش- رواناب HyMod با استفاده از روش مجموعه‌های تکاملی ترکیبی (۷)، روش فیلتر ذره‌ای در ترکیب با روش‌های بازنمونه‌گیری احتمالاتی و تعدیل نمودن اثرات تبهگنی[1] و غنی‌سازی ذرات[2] مورد استفاده قرار گرفت. با کاربرد این روش میزان رطوبت خاک مدل HyMod در تانک‌های جریان سریع و تأخیری با بروزرسانی جریان پیش‌بینی شده بر پایه جریان مشاهداتی تخمین زده شد و همچنین جریان پیش‌بینی‌شده در گام‌های زمانی روزانه تصحیح گردید. در این پژوهش شیوه بروزرسانی داده‌ها با توجه به چارچوب مفهومی به‌کار رفته در آن با هدف بهبود پیش‌بینی‌های مدل بارش- رواناب HyMod و تلفیق آن‌ها با داده‌های جریان مشاهداتی روزانه استفاده شد. در این مطالعه با استفاده از تئوری بیز و به‌کارگیری متوالی روش مونت‌کارلو در قالب روش فیلتر ذره‌ای بهبود پیش‌بینی‌های روزانه جریان بررسی شد. همچنین کمی‌سازی عدم قطعیت جریان با لحاظ منابع مختلف خطا انجام گردید. این شیوه با توجه به دارا بودن قابلیت‌های لازم می‌تواند در جهت بهبود پیش‌بینی‌های روزانه در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت در سطح حوضه‌های آبریز کشور مفید واقع شود.

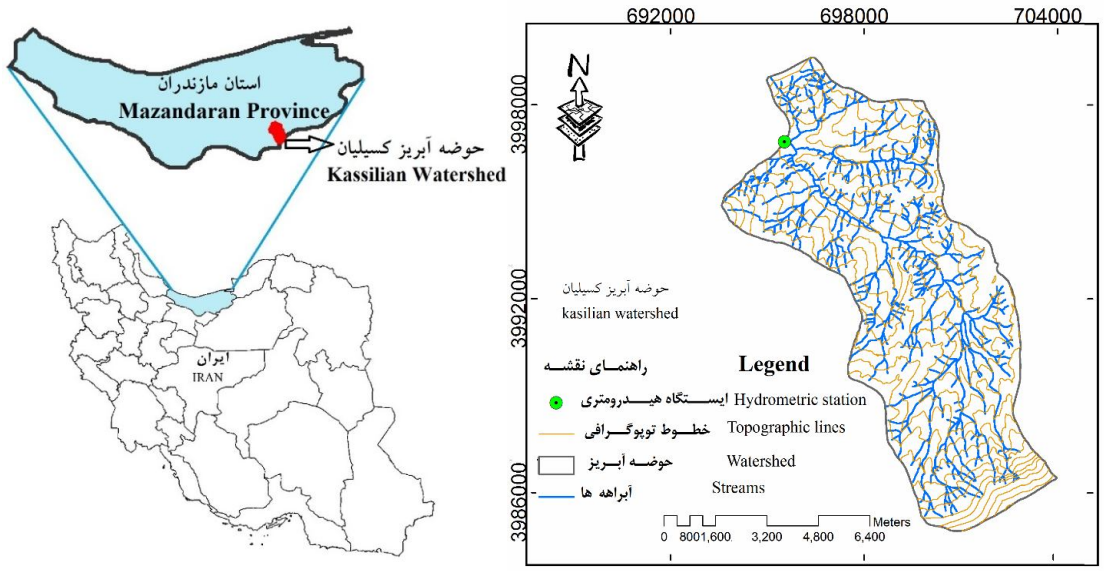
مواد و روش‌ها

حوضه آبریز مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز کسیلیان (شکل ۱) از حوضه‌های معرف کشور و از زیرحوضه‌های رودخانه تالار در استان مازندران می‌باشد که در حوضه آبریز دریای خزر قرار دارد. حوضه کسیلیان در عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه و ٤۵ ثانیه تا ۳٦ درجه و ۷ دقیقه و ٤۵ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی واقع شده است. مساحت این حوضه در حدود ٦۷ کیلومترمربع می‌باشد و ارتفاع آن بین ۱۱۰۰ تا ۲۹۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد متغیر است.

1- Degeneracy
2- Sample impoverishment

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- محدوده مطالعاتی حوضه آبریز معرف کسیلیان در استان مازندران.

Figure 1. Study area of the Kassilian representative basin in Mazandaran province.

بروزرسانی داده‌ها: بروزرسانی داده‌ها فرآیندی است که در آن داده‌های مشاهداتی با داده‌های اطلاعاتی پیش‌بینی‌شده جهت اصلاح و بهبود پیش‌بینی‌ها به‌صورت مستمر و در گام‌های زمانی متوالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چارچوب مدل‌های بارش-رواناب را می‌توان در قالب رابطه‌های ۱ و ۲ تعریف نمود (۱۱). معادله اول معرف فضای حالت و معادله دوم نشان‌دهنده معادله جریان می‌باشد. x_t معرف متغیر حالت مدل می‌باشد.

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, \theta) + \omega_t \qquad \omega_t \sim N(0, \sum_t^m) \quad (۱)$$

$$y_{t+1} = h(x_{t+1}, \theta) + \theta_{t+1} \quad \theta_{t+1} \sim N(0, \sum_{t+1}^y) \quad (۲)$$

در اینجا متغیر حالت، رطوبت خاک می‌باشد. تابع f دربرگیرنده داده‌های ورودی، پارامترهای مدل و نیز متغیر حالت در گام زمانی قبلی می‌باشد. خطای عمومی مدل نیز با ω_t نشان داده شده است که از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس خطا $\sum_t^m$ پیروی می‌کند و شامل عدم قطعیت ساختار مدل و نیز داده‌های ورودی بارش و جریان آب می‌باشد. در معادله دوم، y_{t+1} نشان‌دهنده جریان اندازه‌گیری شده می‌باشد و تابع h نیز خروجی را بر حسب متغیر حالت تخمین زده شده از معادله اول ارائه می‌دهد. منابع خطا $\sum_{t+1}^y$ نیز برای متغیر جریان مشاهداتی به‌وسیله θ_{t+1} نشان داده شده است.

فیلتر ذره‌ای: فیلتر ذره‌ای یک فیلتر بیزی بازگشتی بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد. بخش اصلی این روش ارائه توزیع احتمال پسین با استفاده از نمونه‌های تصادفی به‌نام ذرات و وزن‌های مرتبط با آن‌ها می‌باشد (۱). فیلتر ذره‌ای امکان استفاده در مدل‌هایی با قابلیت تعریف به‌صورت معادلات حالت و مشاهده را با خاصیت غیرخطی و غیرگوسی دارا می‌باشد. فیلتر ذره‌ای عملیات بروزرسانی محاسبات را بر پایه وزن‌های محاسبه شده ذرات انجام می‌دهد. این خاصیت سبب می‌گردد که استفاده از آن در مدل‌های توزیعی نیز ممکن گردد (۱۷). مسأله فیلتر کردن عبارت است از تخمین حالت سیستم در صورتی که مجموعه‌ای از مشاهدات به‌صورت پیوسته و بهنگام موجود باشد. مدل‌های به‌دست آمده معمولاً غیرخطی

www.SID.ir

Archive of SID

هستند و از نظر احتمالاتی امکان دارد دارای توزیع‌های غیرگوسی و چند مُده (دارای چند بیشینه) باشند. فیلتر ذره‌ای قابلیت تخمین در شرایطی که مدل سیستم غیرخطی و غیرگوسی است را دارا می‌باشد. در انجام فیلتر ذره‌ای فرض می‌گردد که حالت‌ها از یک مدل مارکوف مرتبه اول پیروی می‌کنند که در آن بردار حالت کنونی فقط به بردار حالت گام قبلی ارتباط دارد. یکی از مشکلات فیلتر ذره‌ای افزایش وزن‌های متغیرهای مورد بررسی با گذشت زمان در محاسبات می‌باشد که منجر به کاهش دقت شبیه‌سازی می‌گردد. بدین‌صورت که یکی از وزن‌ها به‌سمت یک میل می‌کند و بقیه به‌سمت صفر میل خواهند کرد. در اصطلاح به این موضوع تبهگنی گفته می‌شود که برای اصلاح آن از روش بازنمونه‌گیری استفاده می‌گردد. فیلتر ذره‌ای با روش‌های دیگر رایج در شیوه بهنگام‌سازی داده‌ها مانند فیلتر کالمن متفاوت می‌باشد و متغیرهای حالت به‌صورت مستقیم بهنگام نمی‌شوند و به هر عضو مجموعه متغیرهای حالت تصادفی، وزنی بر مبنای تفاوت بین اعضا و مقادیر مشاهداتی و خطای نسبی بین مشاهدات و مقادیر خروجی مدل تعلق می‌گیرد. توزیع احتمالاتی پیش‌بینی‌های مدل می‌تواند بر مبنای متوسط ترکیب وزنی متغیر محاسبه گردد. یکی از مزایای فیلتر ذره‌ای عدم نیاز به برآورده نمودن فرض گوسی بودن خطاهای مدل مورد استفاده می‌باشد. البته روش فیلتر ذره‌ای در مقایسه با روش فیلتر کالمن دسته‌ای نیاز به اعضای تصادفی بیش‌تری در مجموعه‌های تولیدی برای دست‌یابی به مدل خطای قابل اعتماد دارد (۲۰). همچنین این روش‌ها نیاز به فرض ابتدایی در خصوص شکل تابع توزیع اولیه متغیرهای حالت ندارند و تابع چگالی اولیه به‌صورت کامل در مقایسه با روش فیلتر کالمن دسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تئوری، فیلتر ذره‌ای نسبت به بخش پایینی توزیع حساس‌تر می‌باشد و این پدیده در پیش‌بینی جریان اهمیت پیدا می‌کند و ضرورت تکرار شبیه‌سازی را در تحلیل‌ها الزامی می‌نماید (۲۰). روش‌های بهنگام‌سازی متوالی چارچوبی کلی را برای لحاظ نمودن عدم قطعیت داده‌های ورودی، عدم قطعیت مدل و مقادیر خروجی فراهم می‌نمایند.

تخمین بازگشتی بیز: بخش اصلی در روش فیلتر ذره‌ای و نیز فیلتر کالمن دسته‌ای معرفی تابع چگالی احتمال متغیر حالت به‌عنوان یک نمونه تصادفی می‌باشد. متغیر حالت بر مبنای رابطه ۳ ایجاد می‌گردد.

$$X_n = M\left[X_{n-1}, V_{n-1}\right] \qquad (۳)$$

در معادله بالا M تابع تبدیل سیستم، X_{n-1} متغیر حالت و V_n خطای سیستم می‌باشد. همچنین تبدیل متغیر حالت به خروجی توسط رابطه ٤ تعریف می‌گردد. در این رابطه H تابع اندازه‌گیری و U_n خطای اندازه‌گیری می‌باشد.

$$Y_n = H\left[X_n, U_n\right] \qquad (٤)$$

اطلاعات موجود مربوط به اندازه‌گیری‌ها در مجموعه رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$D_n = \{Y_n; n = 1,\ldots,t\} \qquad (۵)$$

که در آن، D_n مجموعه جریان مشاهداتی می‌باشد. با توجه به معادلات بالا تابع توزیع متغیر حالت فعلی محاسبه گردد. تابع توزیع موردنظر به‌صورت P (Xn | Dn) می‌باشد. این تابع توزیع به‌صورت بازگشتی در دو مرحله پیش‌بینی و بروزرسانی به‌دست می‌آید. فرض می‌گردد که تابع توزیع P (Xn-1 | Dn-1) در این گام زمانی موجود است. با استفاده از مدل سیستم می‌توان تابع اولیه توزیع را در گام زمانی n با رابطه ٦ به‌دست آورد.

(٦)

$$p(X_n|D_n - 1) = \int p(X_n|X_{n-1})\, p(X_{n-1}|D_{n-1}) dX_{n-1}$$

www.SID.ir

Archive of SID

در گام زمانی n از جریان مشاهداتی برای بروزرسانی تابع چگالی توزیع اولیه بر مبنای آنالیز بیز و رابطه ٦ استفاده می‌گردد. همچنین مقدار ثابت نرمال کردن رابطه بیز در رابطه ۷ از رابطه ۸ به‌دست می‌آید.

$$p(X_n|D_n) = \frac{p(Y_n|X_n)p(X_n|D_{n-1})}{p(Y_n|D_{n-1})} \qquad (۷)$$

$$p(Y_n|D_{n-1}) = \int p(Y_n|X_n)p(X_n|D_{n-1})dX_n \qquad (۸)$$

با هدف محاسبه توزیع پسین متغیر حالت و با استفاده از رابطه بیز در بهنگام‌سازی پیش‌بینی‌ها، مقدار مشاهداتی در گام زمانی n برای تابع چگالی پیش‌بینی شده گام قبلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه برگشتی بین رابطه‌های ٦ و ۷ روش متداول برای تخمین متغیر حالت با استفاده از فرمول برگشتی بیز و فیلتر ذره‌ای می‌باشد. برای شرایط اولیه (گام زمانی ابتدایی) نیز برای متغیر حالت، مقدار آن به‌صورت تصادفی و با استفاده از توزیع‌های آماری تعیین می‌گردد.

بازنمونه‌گیری: در شرایط مطلوب بدون تبهگنی تمام ذرات دارای وزن‌های متفاوت می‌باشند و به‌صورت یکسان در محاسبه توزیع چگالی احتمال متغیرهای حالت مشارکت دارند. در این شرایط واریانس وزن‌ها به مقدار صفر میل می‌نماید و نیازی به بازنمونه‌گیری نمی‌باشد. در شرایطی که تعدادی از ذرات دارای وزنی بیش‌تر از ذرات دیگر بوده که تفاوت معنی‌داری با هم پیدا کنند، استفاده از بازنمونه‌گیری نیاز خواهد بود. به‌منظور در نظر داشتن شرایط انجام بازنمونه‌گیری بر مبنای رابطه تعریف شده با نام تعداد نمونه مؤثر[1] (N_{eff})، تعداد ذرات مورد استفاده بررسی می‌گردند. این شاخص بر مبنای رابطه تقریبی ۹ می‌باشد.

$$N_{eff} \approx \left(\sum_{i+1}^{N_P} w_{k+1}^{i}\right)^{-1} \qquad (۹)$$

که در آن، وزن‌ها با w^{i}_{k+1} نشان داده شده است. با استفاده از تعداد نمونه مؤثر تعریف شده مقادیری در هر گام محاسبات به‌منظور انتقال تخمین‌ها بر مبنای آستانه تعریف‌شده به گام بعدی منتقل می‌گردند. شانس تخمین‌هایی که وزن مشارکت بالاتری دارند، در گام‌های بعدی برای عدم حذف آن‌ها بیش‌تر است. مقدار آستانه معمولاً کسری از تعداد دسته ذرات به‌کار برده شده در محاسبات می‌باشد. در بازنمونه‌گیری آماری روش‌های متعددی مانند شیوه‌های ساختار یافته، چندمتغیره، طبقه‌بندی‌شده و باقی‌مانده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این پژوهش از روش ساختار یافته (شکل ۲) استفاده گردید (۱، ۱۱). روش ساختار یافته در هر گام، اطلاعات موردنظر را از مرحله قبل با ارتباط قطعی بین دسته ذرات در زیردسته‌ها دریافت می‌نماید. این مرحله با ایجاد رابطه ۱۰ که رویکردی تصادفی دارد، انجام می‌گیرد.

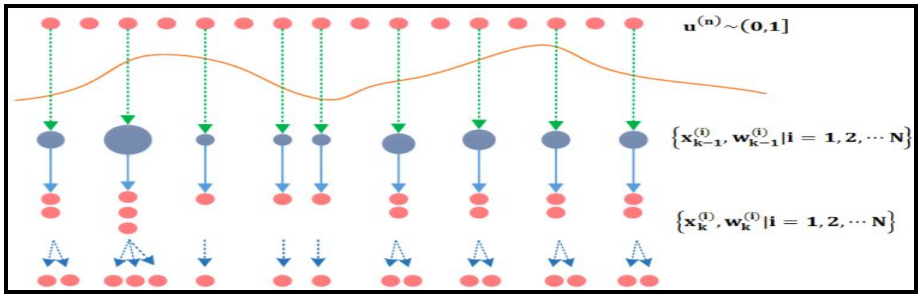
$$i = \frac{i-1}{n} + u \qquad (۱۰)$$

که در آن، i مقدار شمارنده بوده و u عدد تصادفی یکنواخت در بازه صفر و 1/n می‌باشد. با ایجاد داده‌های تصادفی و تصویر نمودن آن‌ها بر تابع تجمعی وزن‌های نرمال‌شده، شمارنده ذره‌ای را که در دسته ذرات گام بعدی شرکت دارد، شناسایی می‌نماییم. ذراتی که وزن بیش‌تری دارند احتمال بیش‌تری برای انتخاب دارند. در هر گام پس از بروزرسانی دسته ذرات باید وزن آن‌ها در ابتدای محاسبه‌ها به‌صورت یکنواخت و نسبتی از تعداد ذرات تعریف گردد. با انجام بازنمونه‌گیری مشکل تبهگنی حل خواهد شد زیرا که وزن ذرات در ابتدای هر مرحله برابر است ولی چون ذرات با وزن‌های بزرگ‌تر امکان انتخاب بیش‌تری دارند، بقیه ذرات معمولاً بعد از چند تکرار حذف می‌گردند و تنوع نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

1- Effective sample size

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- روش بازنمونه‌گیری ساختاریافته (۱۱).

Figure 2. Systematic resampling method (11).

مدل مفهومی بارش- رواناب HyMod: مدل مفهومی هیدرولوژیکی بارش- رواناب HyMod (۱٤، ۱٦) در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. این مدل یکی از مدل‌های معروف رطوبت خاک، بارش- رواناب می‌باشد که می‌تواند جریان را در گام‌های زمانی روزانه شبیه‌سازی نماید. این مدل بارش مازاد را در دو دسته تانک سریع و تأخیری شبیه‌سازی می‌نماید. مدل مذکور بر پایه توزیع احتمالاتی رطوبت خاک تعریف شده و در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (۲۰). در مدل HyMod حوضه موردنظر به چندین زیرحوضه فرض می‌گردد که هر کدام یک ظرفیت مشخص رطوبتی c دارند. معادله تابع توزیع تجمعی رطوبت خاک به‌صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌گردد.

$$F(c) = 1 - \left[1 - \frac{c}{C_{max}}\right]^{B_{exp}} \quad 0 \le c \le C_{max} \qquad (11)$$

که در آن، C_{max} معرف حداکثر ظرفیت رطوبت خاک در حوضه آبریز و B_{exp} مقدار درجه تنوع مکانی رطوبت خاک می‌باشد که تابع توزیع تجمعی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. پارامترهای مدل و حد بالا و پایین آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر بیشینه و کمینه پارامترهای مدل HyMod.

Table 1. Maximum and minimum values of Hymod parameters.

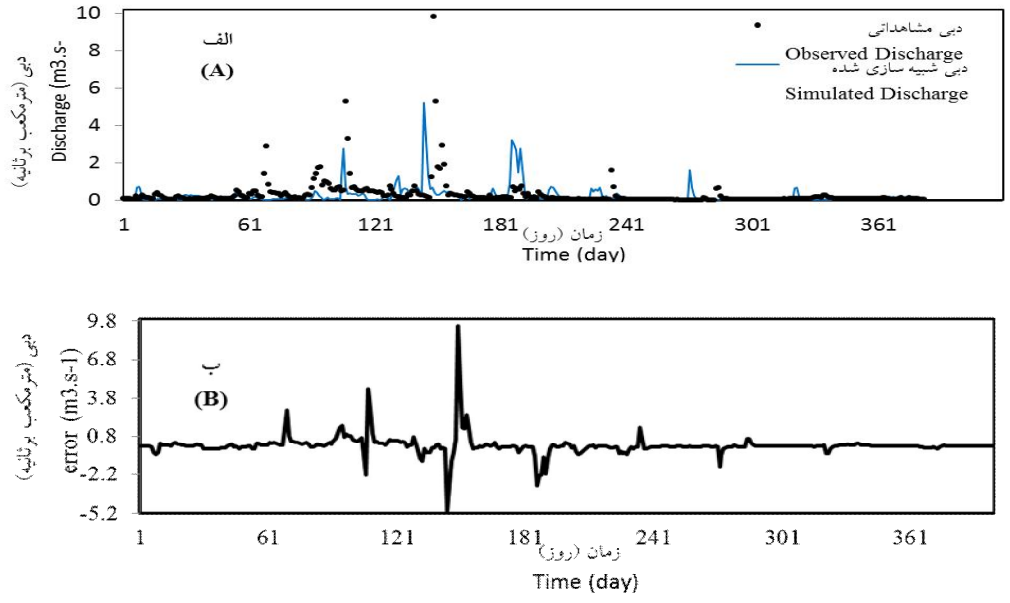
پارامتر parameter	عنوان name	حد پایین minimum	حد بالا maximum
C_{max}	بیشینه ذخیره رطوبت Maximum storage capacity(mm)	200	500
B_{exp}	تنوع مکانی رطوبت Spatial variability of soil moisture(-)	0.1	2
a	فاکتور توزیع بارش مازاد Partitioning factor (-)	0.5	0.99
R_q	زمان ماندگاری در تانک سریع Residence time for quick flow (day)	0	0.1
R_s	زمان ماندگاری در تانک تأخیری Residence time for slow flow (day)	0.3	0.7

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج و بحث

در این بخش نتیجه کاربرد فیلتر ذره‌ای در مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب با مدل HyMod در حوضه آبریز کسیلیان و بهنگام‌سازی جریان‌های پیش‌بینی شده ارائه و تحلیل می‌گردد. به‌منظور اجرای تحلیل‌ها کدهای اجرایی در محیط نرم‌افزار Matlab تهیه گردیدند. همچنین در سری هیدرولوژیکی امکان دارد که واریانس سری با زمان تغییر نماید این حالت را در اصطلاح ناهم واریانسی می‌نامند. بنابراین وجود پدیده ناهم‌واریانسی[1] در سری مورد استفاده بررسی گردید و نتایج نشان داد که ناهم‌واریانسی در سری وجود ندارد و پارامتر واریانس سری ایستا می‌باشد. همچنین به‌منظور مقایسه نتایج کاربرد روش فیلتر ذره‌ای با شیوه متداول در محاسبه پارامترها (بهینه‌سازی)، واسنجی مدل مذکور با استفاده از شیوه بهینه‌سازی "ترکیب مجموعه‌های تکاملی" انجام گردید. جزئیات بیش‌تر این روش در پژوهش دوان و همکاران (۷) ارائه شده است. پارامترهای بهینه به‌دست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ (الف) و ۳ (ب) به‌ترتیب نمودار خطا و مقایسه جریان مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از پارامترهای بهینه برای سال آبی ۵۷-۱۳۵۶ نشان داده شده است. مقادیر جریان شبیه‌سازی‌شده در حالت‌های حدی مانند وقوع سیلاب‌ها تخمین مناسبی ارائه نمی‌دهند. اما خروجی‌ها در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در شرایط نرمال جریان قابل‌قبول می‌باشند. برای ارزیابی عمومی نتایج از شاخص ناش- ساتکلیف استفاده گردید و مقدار ۰/۵۵ برای این شاخص به‌دست آمد. پارامترهای مدل را می‌توان از شیوه شبیه‌سازی، مانند استفاده از الگوریتم نااریب تابع احتمالاتی تعمیم‌یافته نیز محاسبه نمود (۲). به‌منظور اجرای روش فیلتر ذره‌ای در ترکیب با مدل HyMod باید از توزیع یکنواخت برای انتخاب تصادفی پارامترها استفاده نمود. در انجام محاسبات تعداد ۵۰۰ دسته پارامتر برای شروع تحلیل‌ها به‌کار رفت.



شکل ۳- مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (الف)، خطای شبیه‌سازی مدل (ب).

Figure 3. Observation and simulation comparison (A), simulation error (B).

1- Heteroscedasticity

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای مدل HyMod.

Table 2. Optimum parameter values of Hymod model.

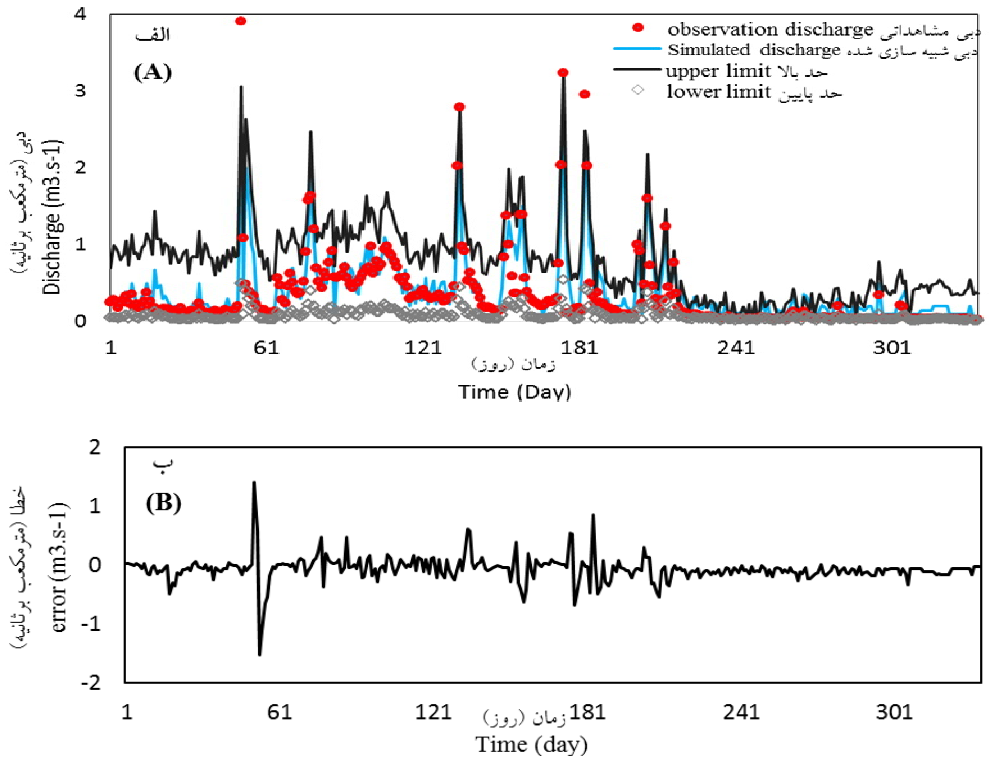
پارامتر parameter	C_{max} (mm)	B_{exp} (-)	a (-)	R_q (day)	R_s (day)
مقدار value	273	0.31	0.72	0.43	0.03

با توجه به تأثیر تعداد دسته پارامترها در مراحل محاسبات و نقش آن‌ها در ایجاد تبهگنی و نیز پدیده غنی‌شدن ذرات، تعداد دسته پارامترها در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و تعداد ۱۰۰۰ دسته پارامتر با توجه به نتایج به‌عنوان تعداد پارامتر برتر مورد استفاده قرار گرفت و محاسبات بر اساس آن انجام شد. در پیاده‌سازی فیلتر ذره‌ای باید به موضوع تبهگنی توجه نمود. چرا که پدیده تبهگنی سبب می‌گردد تعدادی از ذرات وزنی نزدیک به واحد پیدا کرده و نتایج واگرا می‌گردند. آرولام پالام (۲۰۰۲) تعداد نمونه مؤثر پایین را نشانه تبهگنی شدید دانست و برای حل آن نسبت به تعریف یک حد آستانه در محاسبات و رفع تبهگنی اقدام کرد که در مطالعه حاضر نیز از همین روش استفاده شده است (۱). همچنین به‌منظور جلوگیری از ورود به پدیده غنی‌سازی ذرات نیز از روش بازنمونه‌گیری احتمالی ساختاریافته استفاده گردید (۱). از فیلتر ذره‌ای برای بهنگام‌سازی جریان‌های پیش‌بینی شده استفاده شد و در هر گام زمانی با توجه به جریان مشاهداتی نسبت به تخمین متغیر رطوبت خاک در تانک‌های چندگانه و بروزرسانی جریان اقدام شد. این محاسبه‌ها برای سال آبی ۵۷-۱۳۵٦ انجام شد. به‌منظور تعدیل اثرات مقادیر اولیه متغیرهای حالت به‌کار رفته در محاسبات، دوره ۷۰ روزه اول محاسبات حذف شدند. در شکل‌های ٤ (الف) و ٤ (ب) نمودار جریان بهنگام‌سازی شده در مقایسه با جریان مشاهداتی و مقدار خطای محاسبات نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر شبیه‌سازی‌شده در هر گام زمانی و بازه تغییرات این جریان‌ها، عدم قطعیت جریان در فاصله ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد محاسبه گردید. این محدوده عدم قطعیت جریان بهنگام‌سازی شده در شکل ٤ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که این روش در مقادیر ماکزیمم نتیجه مطلوبی ندارد اما در شرایط دبی پایه و نیز جریان‌های پس از فروکش سیلاب تحت تأثیر بارش‌ها مناسب می‌باشد. با توجه به در نظر داشتن رویکرد پویایی در استفاده از پارامترهای مدل، تابع چگالی احتمال در تحلیل‌ها، در گام‌های زمانی مختلف بررسی شده و نمودارهای توزیع حاشیه‌ای پارامترهای پنج‌گانه مدل بر این مبنا قابل ارائه می‌باشد. با توجه به پیشرفت زمانی در انجام محاسبات، مقادیر پارامترها به‌سمت یک مقدار ثابت که تکرار بیش‌تری را در محاسبه‌ها داشته و نیز وزن بالاتری را با استفاده از تابع حداکثر درست‌نمایی به خود اختصاص می‌دهند میل می‌کنند نمودار توزیع حاشیه‌ای این پارامترها در گام زمانی ۱۰۰ به‌عنوان نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر رطوبت خاک در تانک غیرخطی و نیز در تانک اول جریان سریع نشان داده شده است. همچنین مقدار شاخص نش- ساتکلیف با استفاده از فیلتر ذره‌ای ۰/٦۷ محاسبه شد. مقایسه این مقدار با شیوه بدون به‌کارگیری روش بهنگام‌سازی رطوبت خاک و پارامترهای بهبودیافته افزایشی ۲۲ درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین در مجموع با توجه به نتایج حاصل از پژوهش اثربخشی فیلتر ذره‌ای به‌عنوان روشی که در دسته شیوه‌های بهنگام‌سازی داده‌ها قرار می‌گیرد در حوضه آبریز کسیلیان مشخص گردید.

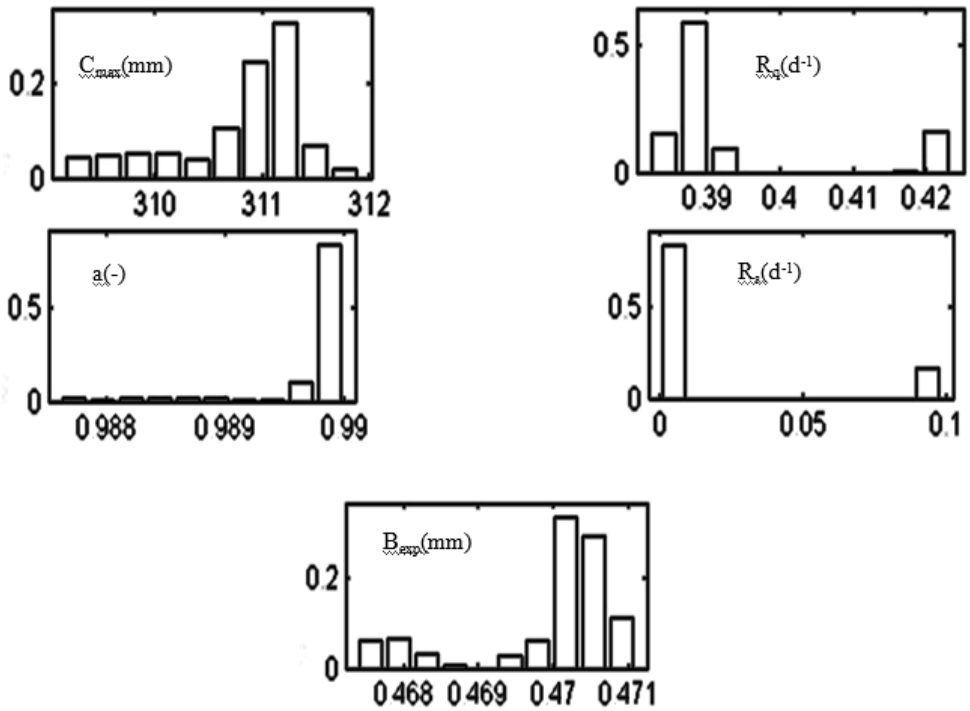
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- دبی مشاهداتی و دبی بهنگام شده توسط فیلتر ذره ای و بازه عدم قطعیت بهنگام‌سازی (الف) و خطای بهنگام‌سازی (ب).

Figure 4. Observed and updated discharge with particle filter and corresponding uncertainty (A) and updating error (B).



شکل ٥- توزیع پسین پارامترهای مدل **Hymod** در گام زمانی ۱۰۰.

Figure 5. Hymod posterior parameter distributions at time step 100.

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف به‌کارگیری روش تئوری بیز و فیلتر ذره‌ای در تخمین متغیر حالت و شناسایی عدم قطعیت خروجی مدل‌های بارش- رواناب رطوبت خاک و استفاده از توابع چگالی احتمال انجام شد. تحلیل‌ها در حوضه آبریز کسیلیان و با استفاده از داده‌های روزانه مشاهداتی انجام گردید. در استفاده از فیلتر ذره‌ای باید به دو موضوع تبهگنی و نیز غنی‌سازی وزن‌های متغیرهای حالت در دسته‌های ایجاد شده توجه نمود (۱۱). پژوهش حاضر نیز با این پدیده‌ها همراه بود و محاسبات با واگرایی روبرو شدند. با استفاده از روش بازنمونه‌گیری و نیز تعداد مؤثر دسته ذرات تصادفی نسبت به اصلاح تبهگنی روش فیلتر ذره‌ای در به‌کارگیری مدل اقدام شد. استفاده از بازنمونه‌گیری سبب عدم واگرایی نتایج می‌گردد، کاربرد آن توسط برخی از پژوهشگران مانند لی (۲۰۱٦) و مرادخانی (۲۰۰۵) مورد تأکید قرار داده است (۱۱، ۱۵). در این مطالعه کاربرد فیلتر ذره‌ای در شناخت عدم قطعیت مدل‌های بارش- رواناب نشان داده شد. در این خصوص پژوهش‌های بیش‌تری برای درک عدم قطعیت ناشی از داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل ضروری می‌باشد. فیلتر ذره‌ای از روش‌های متداول در شیوه بروزرسانی داده‌ها می‌باشد که با استفاده از روش مونت- کارلو توسعه داده شده و می‌تواند مدل‌های پویای غیرخطی بارش- رواناب مفهومی را تحلیل نماید. نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری این شیوه نشان داد که این روش می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌ها کمک کرده و همچنین وضعیت رطوبت خاک را مشخص نماید. نتایج به‌دست آمده با یافته‌های برخی از پژوهشگران دیگر مانند دیچنت و همکاران (۲۰۱۲)، مرادخانی و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد (٦، ۱۵). با توجه به این‌که روش فیلتر ذره‌ای از ذرات متعددی می‌تواند در اجرای محاسبات استفاده نماید، تحلیل‌ها نشان داد که در این مطالعه دسته ذراتی با ۱۰۰۰ عضو در محاسبه‌ها می‌توانند سبب بهبود شاخص‌های ارزیابی شوند و در نتیجه کاربرد این روش، شاخص ارزیابی نش- ساتکلیف به بیش‌ترین مقدار یعنی ۰/٦۷ رسید.

منابع

1.Arulampalam, S., Maskell, S., Gordon, N., and Clapp, T. 2002. A tutorial on particle filters for on-line nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. IEEE Trans. Signal Processess. 50: 2. 174-189.

2.Beven, K.J., and Freer, J. 2001. Equifinality, data assimilation and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. J. Hydrol. 249: 11-29.

3.Boyle, D.P. 2000. Multicriteria calibration of hydrological models. PhD Dissertation, Department of Hydrology and Water Resources. University of Arizona, 145p.

4.Bulygina, N., and Gupta, H. 2009. Estimating the uncertain mathematical structure of a water balance model via Bayesian data assimilation. Water Resour. Res. 45: W00B13.

5.Clark, M.P., and Vrugt, J.A. 2006. Unraveling uncertainties in hydrologic model calibration: Addressing the problem of compensatory parameters. Geophys. Res. Lett. 33 (L06406): 1-5.

6.DeChant, C., and Moradkhani, H. 2012. Examining the effectiveness and robustness of sequential data assimilation methods for quantification of uncertainty in hydrologic forecasting. Water Resour. Res. 48: W04518.

7.Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resour. Res. 28: 4. 1015-1031.

8.Evensen, G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. J. Geophys. Res. 99: 10143-10162.

www.SID.ir

Archive of SID

9.Gordon, N., Salmond, D., and Smith, A.F.M. 1993. Novel approach to nonlinear and non-Gaussian Bayesian state estimation, Proc. Inst. Electr. Eng. 140: 107-113.
10.Leisenring, M., and Moradkhani, H. 2011. Snow water equivalent prediction using Bayesian data assimilation methods. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 25: 2. 253-270.
11.Li, T., Gannan, Y., and Wang, L. 2016. Particle Filter with Novel Nonlinear Error Model for Miniature Gyroscope-Based Measurement While Drilling Navigation. Sensors. 16: 3. 371-394.
12.Liu, J.S., Chen, R., and Logvinenko, T. 2001. A theoretical framework for sequential importance sampling and resampling, in Sequential Monte Carlo Methods in Practice. Springer, New York, Pp: 225-246.
13.Miller, R.N., Ghil, M., and Guathiez, F. 1994. Advanced data assimilation in strongly nonlinear dynamical systems. J. Atmos. Sci. 51: 8. 1037-1056.
14.Moore, R.J. 1985. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. Hydrol. Sci. J. 30: 2. 273-297.
15.Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H., and Sorooshian, S. 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. Water Resour. Res. 41: 5. 1001-1017.
16.Pourreza Bilondi, M., Akhoond Ali, A.M., Gharaman, B., and Telvari, A.R. 2015. Uncertainty analysis of a single event distributed rainfall-runoff model by using two different Markov Chain Monte Carlo methods. J. Water Soil Conservation. 21: 5. 1-26. (In Persian)
17.Salamon, P., and Feyen, L. 2009. Assessing Parameter, Precipitation and Predictive Uncertainty in a Distributed Hydrological Model Using Sequential Data Assimilation with the Particle Filter. J. Hydrol. 376: 428-442.
18.Sorooshian, S., Duan, Q., and Gupta, V.K. 1993. Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the soil moisture accounting model. Water Resour. Res. 29: 4. 1185-1194.
19.Vrugt, J.A.C., Diks, G.H., Gupta, H.V., Bouten, W., and Verstraten, J.M. 2005. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. Water Resour. Res. 41: 1-17.
20.Weerts, A.H., and El Serafy, G.Y.H. 2006. Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models. Water Resour. Res. 42: W09403.

www.SID.ir

Archive of SID

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(1), 2017
http://jwsc.gau.ac.ir

Bayesian analysis and particle filter application in rainfall-runoff models and quantification of uncertainty

M. Ahmadizadeh[1] and *S. Marofi[2]
[1]Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Buali Sina University,
[2]Professor, Dept. of Water Engineering, Buali Sina University
Received: 11/05/2016; Accepted: 04/08/2017

Abstract

Background and Objectives: Applying hydrologic models and forecast is a necessity in different studies in water resources. There should be multiple assumptions in forecasting the outflow of watersheds due to different complex relations in hydrologic cycle. Because of assumptions and simplifications those applied in the structure of models and developed relations, forecasts made by rainfall runoff models are always subject to uncertainties. Different sources of uncertainty are categorized into three parts: first, the uncertainty attributed to the applied data, second, the structure of model and third and the parameters. It is also necessary to address uncertainties and improve the precision of the forecasts. Therefore, there are multiple methods developed to analyze uncertainties. For this aim, data assimilation is a recommended approach and particle filter method is one of the developed models in this regard. The main goal of this research is to apply particle filter to update and improve the HYMOD rainfall runoff model forecasts based on observed stream flow. In addition, by the use of this approach, quantification and decreasing the uncertainty is evaluated based on different sources of error.

Materials and Methods: In this study, improving the forecasts is implemented by data assimilation approach. To this aim, particle filter method, successive Bayesian estimation and posterior probability density function are applied for obtaining the soil moisture and Hymod parameters in daily scale in Kassilian river basin with approximately 67 square kilometers area. Particle filter is based on Bayes equation and maximum likelihood function of errors for the given time period. Moreover, this method should be combined with statistical resampling that prevents divergence of the analysis and corrects degeneracy, sample impoverishment of particles and tendency of the state variables particle weights to unit value (1).

Results: Applying particle filter method makes it possible to use the intended model parameters for simulating and forecasting by random ensemble parameters generation and calculating prior probability density function. This method is also effective for precising forecasts and simultaneous application of parameters and soil moisture variable in analysis. Also this method helps to modify the forecasts using Baysian theory and definition of primary errors maximum likelihood function. In addition, this method also represents the posterior probability density function and corrects the prior density function.

Conclusion: The results show applicability of particle filter method in combination with statistical resampling for hydrological data assimilation and improvement of the precision of forecasts of outflow from Kassilian river basin. It is shown that, the applied method improved the Nash-Sutcliffe statistic in comparison with open loop procedure. As the Nash-Sutcliffe statistic improved by 22%, rising from 0.55 to 0.67.

Keywords: HyMod model, Particle filter, Data assimilation, Resampling, Degeneracy

* Corresponding Author; Email: smarofi@yahoo.com

www.SID.ir