Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۲/ شماره ۴/ پیاپی ۳۱/ زمستان ۱۳۹۷ (۱۲۳-۱۳۰)

کاهش عدم‌قطعیت مدل‌های مفهومی بارش- رواناب با استفاده از فیلتر کالمن همادی توأم (مطالعه موردی: حوضهٔ بهشت‌آباد)

محمدعلی قربانی[۱]، یعقوب دین‌پژوه[۲] و محمدمهدی معیری[۳*]

چکیده

تصمیم‌گیری‌های دقیق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی مدرن منابع آب منجر به حصول نتایج واقع‌بینانه‌تری شده که تأکید بر اهمیت برآورد عدم‌قطعیت مدل‌ها در مطالعات مربوطه نیز می‌باشد. در این تحقیق، از فیلتر کالمن همادی توأم (JEnKF) برای برآورد و کاهش عدم‌قطعیت در یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی بارش رواناب جهت مدل‌سازی حوضهٔ بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۰ استفاده شد. مدل مفهومی مورد استفاده، مدل HyMod بوده که با توجه به خصوصیات حوضه، زیرمدل ذوب برف نیز به آن اضافه شد. کارایی این روش در پیش‌بینی جریان، توسط معیار RMSE در مقادیر دبی طبقه‌بندی‌شده در چهار دسته متمایز با نتایج روش جستجوی بهینه سراسری SCE ارزیابی شد. نتایج نشان داد که به‌روزرسانی متغیرهای حالت، خطای پایین‌تری را در هر یک از دسته‌های مختلف جریان و به‌خصوص جریان‌های پایه ارائه می‌دهد. مقدار کاهش خطای روش JEnKF در مقایسه با روش SCE در دورهٔ واسنجی ۱۳۸۳-۱۳۸۰ از حداقل ۱۸ درصد تا حداکثر ۶۳ درصد تغییر کرد؛ این رقم برای دورهٔ صحت‌سنجی بین ۷ تا حداکثر ۷۳ درصد بود. در پایان، عدم‌قطعیتِ پیش‌بینی مدل در دو شرایط مختلف، یکی شرایط عدم‌قطعیت ناشی از (فقط) پارامترها و دیگری، شرایط عدم‌قطعیت ناشی از اجزای مختلف مدل، شامل پارامترها، متغیرهای حالت و خروجی‌ها با هم مقایسه شد. نتایج این بررسی، حاکی از پوشش بهتر داده‌های مشاهداتی در شرایط دوم توسط عدم‌قطعیتِ پیش‌بینی مدل بود.

واژه‌های کلیدی: ذخیره برف، عدم‌قطعیت، فیلتر کالمن همادی توأم، مدل بارش رواناب HyMod.

ارجاع: قربانی م. ع. دین‌پژوه ی. و معیری م. م. ۱۳۹۷. کاهش عدم‌قطعیت مدل‌های مفهومی بارش- رواناب با استفاده از فیلتر کالمن همادی توأم (مطالعه موردی: حوضهٔ آبریز بهشت‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۱۲۳-۱۳۰.

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.
۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.
* نویسنده مسئول: moayeri.mehdi@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۸

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود در حوضه‌ها از مدل‌های هیدرولوژیکی، به‌عنوان ابزار پیش‌بینی جریان رودخانه استفاده می‌شود. از نظر علمی، مدل‌سازی، راهکاری برای آزمون صحت فرضیات تحقیق در مورد پدیده‌های طبیعی به شمار می‌رود. به‌دلیل وجود پیچیدگی و ناهمگونی در طبیعت، تاکنون مدل هیدرولوژیکی که قادر باشد به‌صورت قطعی، پیش‌بینی دقیقی از هر یک از اجزای چرخهٔ آب یک حوضه را انجام دهد، ارائه نشده است و در نتیجه، مدل‌های موجود همراه با فرضیات ساده کنندهٔ زیادی هستند تا بتوانند با در نظرگرفتن نیازها، در مقیاس‌های زمانی و مکانی مورد نظر، پیش‌بینی مناسبی ارائه نمایند؛ به عبارت دیگر، دقت تخمین یک مدل از پدیدهٔ مورد نظر، به نوع کاربرد مدل وابسته است. بنابراین، بدیهی است که با توجه به نقص مدل‌ها، به علت بی‌اطلاعی از ماهیت کامل پدیده و یا دانستن بخشی از آن، امکان پیش‌بینی دقیق و قطعی پدیده‌ها میسر نیست. بخش معلومات محقق، قطعیت و بخش مجهولات وی، عدم‌قطعیت مدل‌ها محسوب می‌شوند. یکی از ابزارهای مرسوم بیان ریاضی عدم‌قطعیت در مدل‌سازی، استفاده از توزیع‌های احتمالاتی است که در مطالعهٔ حاضر نیز از همین ابزار استفاده شده است. برای تعریف یک مدل و اجزای آن، معمولاً بخش مورد مطالعه توسط مرز سیستم از فضای اطراف جدا می‌شود. ورودی‌های مدل به‌صورت شارهایی (جریان عبوری از واحد سطح در واحد زمان) از نوع جرم و یا انرژی از مرز، وارد سیستم می‌شوند و از خصوصیات ثابت در زمان مدل به نام پارامترها متأثر می‌گردند. آنگاه در داخل سیستم به‌صورت متغیرهای غیرثابت در زمان به‌نام متغیرهای حالت[1] (در داخل مدل)، انتشار می‌یابند[2] و در انتها، به‌صورت شارهای خروجی از سیستم خارج می‌شوند. طی فرایند مذکور، در ورودی‌ها، متغیرهای حالت، پارامترها و خروجی‌ها عدم‌قطعیت وجود دارد که لازم است جهت افزایش دقت مدل‌ها این عدم‌قطعیت کاهش یابد.

در برخی روش‌ها، همانند روش برآورد عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته[3] (بِوِن و بینلی، ۱۹۹۲) و محاسبه بیزی تقریبی[4] (وروخت و صادق، ۲۰۱۳) میزان عدم‌قطعیت مدل به‌صورت یکجا برآورد می‌شود. در سایر روش‌ها، قابلیت برآورد عدم‌قطعیت به‌صورت مجزا (در هر یک از بخش‌های مختلف مدل) وجود دارد. روش تحلیل خطای کل بیزی[5] (کاوتسکی و همکاران، ۲۰۰۶) و روش دیفرانسیل تکاملی متروپلیس تطبیقی[6] (وروخت و همکاران، ۲۰۰۸) از جمله روش‌های مذکور هستند. یکی دیگر از روش‌های نوع مجزا که اخیراً مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است، روش فیلتر کالمن همادی است. این روش، ابتدا توسط دانشمندی به نام کالمن برای سامانه‌های پویای خطی معرفی شد. به‌دلیل غیرخطی‌بودن بسیاری از مدل‌ها، معادله کوواریانس خطا با به‌کارگیری تقریب توسط یک عملگر تانژانت، خطی فرض می‌شود که این روش، فیلتر کالمن توسعه‌یافته[7] (EKF) نامیده می‌شود. این روش، به‌سبب تقریب و حذف ممان‌های مرتبه سوم و بالاتر (به‌ویژه در مدل‌هایی که ماهیت غیرخطی بالاتری دارند) مشکل‌ساز است. به‌علاوه، عیب دیگر این روش، حجم محاسبات بسیار زیاد آن است (میلر و همکاران، ۱۹۹۴). فیلتر کالمن همادی[8] (EnKF) برای اولین بار توسط اونسن در اقیانوس‌شناسی برای مدل‌های غیرخطی به کار رفت (اونسن، ۱۹۹۴). این روش به جای ساده‌سازی، از روش زنجیره مارکوف مونت‌کارلو[9] (MCMC) به‌صورت حل عددی استفاده می‌کند. محاسبه خطاها در قالب عبارت‌های احتمالاتی جمع‌شونده در معادلات فضا-حالت در فیلتر کالمن همادی امکان بررسی عدم‌قطعیت را فراهم می‌کند. این روش به‌تنهایی، متغیرهای حالت سیستم را با کمینه‌سازی واریانس خطا محاسبه می‌کند و پارامترها را شامل نمی‌شود. از آنجا که مدل‌های هیدرولوژیکی (از جمله مدل مورد استفاده در این مطالعه)، غالباً پارامتری هستند؛ بنابراین، نیاز به راهکاری جهت برآورد هم‌زمان پارامترها و متغیرهای حالت احساس می‌شود. روش بهینه‌سازی و تلفیق هم‌زمان داده‌ها[10] توسط وروخت و همکاران (۲۰۰۵) ارائه شد و در آن، یک الگوریتم بهینه‌سازی به جستجوی پارامترهای

1- State variables
2- Propagate
3- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)

4- Approximate Bayesian computation (ABC)
5- Bayesian Total Error Analysis
6- Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM)
7- Extended Kalman Filter (EKF)
8- Ensemble Kalman Filter (EnKF)
9- Marcov Chain Monte Carlo (MCMC)
10- Simultaneous Optimization and Data Assimilation (SODA)

www.SID.ir

Archive of SID

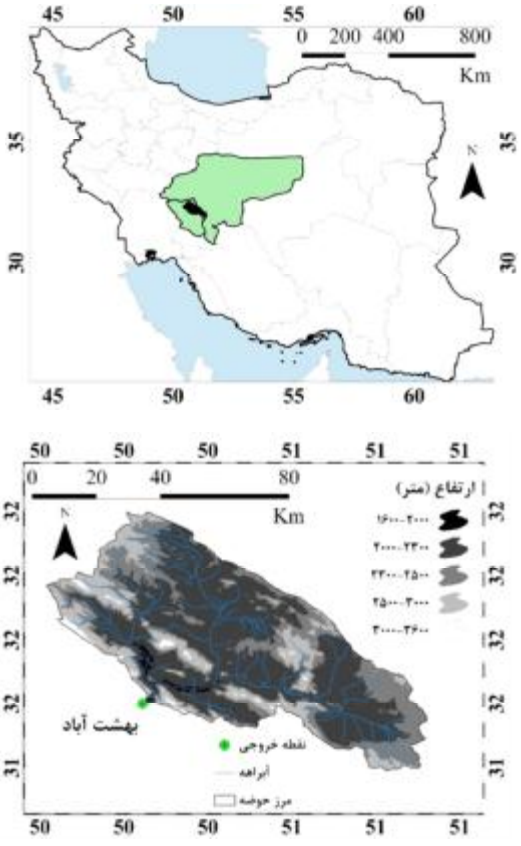
بهینه می‌پردازد و در هر مرحله از ارزیابی تابع هدف، تمام مراحل محاسبهٔ متغیرهای حالت توسط EnKf تا رسیدن به پارامترهای بهینه، تکرار می‌شود. مشکل این روش، حجم محاسبات بسیار زیاد آن است تا حدی که برای کاربرد این روش بر مدل ۱۳ پارامتری ساکرامنتو، به محاسبات موازی نیاز است (وروخت و همکاران، ۲۰۰۶). روش دیگری که کارآمدتر از روش قبل است، در مطالعهٔ مرادخانی و همکاران (۲۰۰۵)، تحت عنوان برآورد دوگان پارامتر حالت[1] ارائه شد و در آن، پارامترهای مدل مانند متغیرهای حالت با الگوریتم EnKf تحلیل و به‌روزرسانی می‌شود. در این تحقیق، از روش EnKf توأم استفاده شده است که شباهت‌های زیادی با روش دوگان پارامتر-حالت دارد (قبلاً توسط غرامتی و حطیط (۲۰۱۴) برای حل مسئله انتقال آلاینده‌های زیرزمینی به کار رفت) و در این مطالعه برای مدل مورد استفاده قرار گرفت و تطبیق داده شد.

با توجه به پیشینهٔ تحقیق، به نظر می‌رسد فیلتر کالمن همادی توأم (JEnKF) برای بهبود عدم‌قطعیت در یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی بارش رواناب تاکنون به کار نرفته است؛ بنابراین؛ در این مطالعه با استفاده از مطالعه موردی حوضهٔ بهشت‌آباد، عملکرد این روش مورد بررسی قرارگرفته است.

مواد و روش‌ها

حوضه بهشت‌آباد به مساحت ۳۸۶۰ کیلومترمربع بوده که بخش اعظم آن در استان چهارمحال و بختیاری و بخش کوچکی از آن در استان اصفهان است. شکل ۱، موقعیت این حوضه را در کشور نشان می‌دهد. ارتفاع حوضه بین ۱۶۸۰ تا ۳۶۰۰ متر با میانگین ارتفاع ۲۳۱۶ متر و از سطح دریاست. نقطهٔ خروجی حوضه در ایستگاه آب‌سنجی بهشت‌آباد (۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ۳۲ درجه و ۱ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۶۸۰ متر از سطح دریا) واقع بر رودخانه بهشت‌آباد (یکی از سرشاخه‌های دائمی رودخانه کارون) است.

داده‌های بارش ۱۷ ایستگاه کلیماتولوژی و سینوپتیک بالادست خروجی که پس از انجام آزمون همگنی داده‌ها و اصلاحات لازم و بازسازی داده‌های گمشده با روش تیسن میانگین‌گیری بر آنها صورت گرفت، با مقادیر میانگین بارش ۳ ساعتهٔ تهیه‌شده از داده‌های ماهواره‌ای[2] TRMM تطابق خوبی داشت. داده‌های تبخیر و تعرق از سیستم تلفیق داده‌های زمینی[3] که با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای هواشناسی و پارامترهای سطح زمین توسط مدل Noah محاسبه‌شده بود، در این تحقیق به کار رفت.



شکل ۱- موقعیت حوضه بهشت آباد در ایران و استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان

فیلتر کالمن همادی توأم

مفهوم کلیدی فیلتر کالمن همادی، این است که با استفاده از روش مونت‌کارلو، گروهی[4] از بردارهای متغیرهای حالت تولید می‌شود که با انتشار هر یک از اعضای تولیدشده در زمان به موازات یکدیگر، توزیعی احتمالی از رفتار مدل در حالت‌های مختلف به‌دست می‌آید. به‌طور کلی، یک فیلتر کالمن، در هر گام زمانی، دارای دو مرحلهٔ پیش‌بینی و تحلیل است. در مرحله پیش‌بینی، تخمین اولیه‌ای از متغیرهای حالت (با درنظرگرفتن خطا) انجام می‌شود. در مرحلهٔ تحلیل، مقادیر

1- Dual state parameter estimation

2- The Tropical Rainfall Measuring Mission
3- Global Land Data Assimilation system
4- Ensemble

www.SID.ir

Archive of SID

متغیرهای حالت تخمین زده‌شده (در مرحله پیش‌بینی) با مجموعهٔ اندازه‌گیری‌هایی تا زمان حال (به‌صورتی که در زیر شرح داده‌شده است)، ترکیب می‌شوند. مراحل پیش‌بینی و تحلیل این الگوریتم، به شرح زیر است:

الف- مرحلهٔ پیش‌بینی: در این مرحله، پارامترها ثابت فرض می‌شود. اعضای بردار حالت تحلیل‌شده گام زمانی قبل یا $\vec{x}_{t+1}^{i.a}$ با استفاده از مدل دینامیکی مطابق معادله زیر در زمان انتشار می‌یابد تا $\vec{x}_{t+1}^{i.f}$ حاصل شود:

$$\vec{x}_{t+1}^{i.f} = M(\vec{x}_{t+1}^{i.a}, \vec{u}_t^i, \vec{\theta}) + \vec{q}_t^i \qquad (۱)$$

که در آن: حرف f، بیانگر مرحله پیش‌بینی؛ a، بیانگر مرحله تحلیل؛ و $i = 1, \ldots, n_e$، شمارهٔ مربوط به عضو گروه و n_e، تعداد کل اعضای گروه است. در معادلهٔ (۳)، $\vec{x}_{t+1}^{i.f}$، iاُمین عضو گروه متغیر حالت در مرحله پیش‌بینی در گام زمانی $t+1$؛ و $\vec{x}_t^{i.a}$، iاُمین عضو گروه متغیر حالت در مرحله تحلیل در گام زمانی t است.

ب- مرحله تحلیل: در این مرحله، پارامترهای مدل توسط معادلهٔ زیر به‌روزرسانی می‌شود (غرامتی و حطیط، ۲۰۱۴):

$$\vec{\theta}_{t+1}^i = \vec{\theta}_t^i + \vec{K}_{t+1}^{\theta}(\vec{y}_{t+1}^i - \vec{y}_{t+1}^{i.f}) \qquad (۲)$$

که در آن، درایه‌های ماتریس $\vec{K}_{t+1}^{\theta}$ از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{K}_{t+1}^{\theta} = \vec{\Sigma}_{t+1}^{\theta y}[\vec{\Sigma}_{t+1}^{yy}]^{-1} \qquad (۳)$$

در این معادله، $\vec{\Sigma}_{t+1}^{\theta y}$، کوواریانس بین گروه پارامترهای θ و گروه خروجی‌های پیش‌بینی‌شدهٔ y؛ عملگر $[]^{-1}$، معکوس‌کنندهٔ ماتریس؛ و $\vec{\Sigma}_{t+1}^{yy}$، ماتریس کوواریانس خطای خروجی پیش‌بینی‌شده است. با استفاده از پارامترهای به‌روزرسانی‌شده، اعضای گروه بردار حالتِ تحلیل‌شده، از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$\vec{x}_{t+1}^{i.a} = \vec{x}_{t+1}^{i.f} + \vec{K}_{t+1}(\vec{y}_{t+1}^i - \vec{y}_{t+1}^{i.f}) \qquad (۴)$$

که در آن، $\vec{y}_{t+1}^i$، خروجی پریشیده[1] است:

$$\vec{y}_{t+1}^i = \vec{y}_{t+1} + \vec{\varepsilon}_{t+1}^i \qquad (۵)$$

که به بردار خروجی اندازه‌گیری‌شده $\vec{y}_{t+1}$، خطایی با توزیع نرمال به‌صورت $\vec{\varepsilon}_{t+1}^i \sim N(\vec{0}, \vec{\Sigma}_{t+1}^y)$ اضافه می‌شود که $\vec{\Sigma}_{t+1}^y$ کواریانس $\vec{y}_{t+1}$ها است. برای اجرای فیلتر کالمن همادی بر روی مدل‌های غیرخطی معادله زیر که توسط ریچل و همکاران (۲۰۰۲) پیشنهاد شده است، از محاسبه بهره کالمن[2] استفاده می‌شود:

$$\vec{K}_{t+1} = \vec{\Sigma}_{t+1}^{xy}[\vec{\Sigma}_{t+1}^{yy} + \vec{\Sigma}_{t+1}^{y}]^{-1} \qquad (۶)$$

در این معادله، $\vec{\Sigma}_{t+1}^{xy}$، کوواریانس متقاطع بین متغیر حالت یا $\vec{x}_{t+1}^{i.f}$ و خروجی پیش‌بینی‌شده یا $\vec{y}_{t+1}^{i.f}$ است. خروجی‌های پیش‌بینی‌شده و همچنین $\vec{K}_{t+1}$، با استفاده از پارامترهای به‌روزرسانی‌شدهٔ $\vec{\theta}_{t+1}^i$ به‌دست می‌آیند. $\vec{K}_{t+1}$ از معادله (۶) با اجرایی کردن شرایط جدید به‌دست می‌آید. تفاوت این روش با روش دوگان به‌صورت شهودی، این است که در روش دوگان، دو بار فیلتر کالمن همادی اجرا می‌شود. در مرحلهٔ اول دقیقاً مانند فیلتر کالمن همادی توأم، پارامترها برآورد می‌شوند. در مرحلهٔ دوم، در مرحلهٔ دوم، بردارهای حالت تولیدشده $\vec{x}_{t+1}^{i.a}$ در مرحله تحلیل، مجدداً این بار با استفاده از پارامتر جدید به‌دست‌آمده، انتشار داده می‌شود. برای اطلاعات بیشتر به (غرامتی و حطیط، ۲۰۱۴) مراجعه شود.

مدل بارش- رواناب

در مطالعهٔ حاضر، از مدل بارش رواناب HyMod (واگنر و همکاران، ۲۰۰۱) پس از اضافه‌کردن مدولی برای درنظرگرفتن سهم برف در رواناب استفاده شده است. در شکل ۲، شِمایی از این مدل مفهومی ارائه شده است. ابتدا مدل HyMod برای داده‌های حوضه بهشت‌آباد واسنجی شد؛ اما به‌دلیل طبیعت برفی حوضه مورد مطالعه و از آنجا که در مدل بارش رواناب HyMod اثرهای برف (شامل ذخیره، ذوب و اضافه‌شدن برف ذوب‌شده به رواناب) لحاظ نشده است، مدولی جهت شبیه‌سازی بیلان برف به HyMod اضافه شد و با واسنجی مجدد، پیشرفت قابل توجهی در پیش‌بینی حاصل شد که در ادامه به شرح مختصر مدول برف به‌کار رفته و سپس مدل HyMod پرداخته می‌شود.

مخزن برف

هنگامی‌که بارش به زمین نازل می‌شود، قبل از ورود به بخش غیراشباع، با درنظرگرفتن دما، ممکن است مقداری از بارش به‌صورت برف (در مخزن) ذخیره شود. از آنجا که حوضهٔ مطالعاتی، حوضه‌ای سرد و کوهستانی است، وجود مخزنی برای مدل‌سازی برف اهمیتی ویژه می‌یابد. برای این مخزن، پارامتری تحت عنوان دمای آستانه T_t در نظر گرفته شده است. اگر متوسط دمای روزانه کمتر از T_t باشد، بارش ورودی در آن روز (گام زمانی) به‌عنوان برف در مخزن ذخیره می‌شود. اگر در مخزن از گام‌های زمانی

1- Perturbed
2- Kalman Gain

www.SID.ir

Archive of SID

قبل برفی موجود باشد و دمای روزانه نیز از T_t بالاتر باشد، تغییرات ذخیره مخزن از معادله بیلان زیر به‌دست می‌آید:

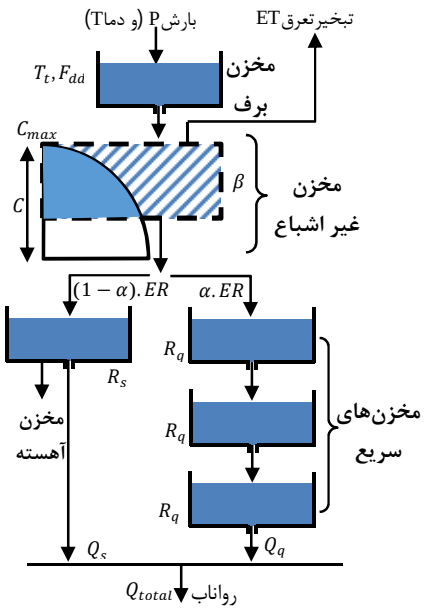
$$\frac{dS_{i,snow}}{dt} = R_{i,snow} + M_i \quad (۷)$$

که در آن: $S_{i,snow}$، برف ذخیره‌شده در این مخزن در روز iام؛ $R_{i,snow}$، برف ورودی؛ و M_i، مقدار برف ذوب‌شده برحسب mm در روز iام؛ و $\frac{d}{dt}$، عملگر مشتق است. برای گسسته‌سازی گام زمانی یک روز فرض شد.

آنگاه مقدار عمق آب معادل برف ذوب‌شده یا M_i از معادله زیر به‌دست آمد:

$$M_i = \begin{cases} F_{dd}(T_i - T_t) & ; T_i > T_t \\ 0 & ; T_i \le T_t \end{cases} \quad (۸)$$

در این معادله، پارامتر F_{dd} فاکتور درجه-روز است که به‌وسیله آن، مقدار آب ناشی از ذوب برف در واحد یک روز، به ازای هر یک درجهٔ سلسیوس بالای دمای آستانه T_t به‌دست می‌آید. این مدل مفهومی برف در مطالعاتی نظیر کاوتسکی (۲۰۰۷) نیز به‌کار رفته است.



شکل ۲- ساختار مدل مفهومی مورداستفاده در مطالعه حاضر

توجه: علایم به‌کار رفته در این شکل، در جدول ۱ شرح داده شده‌اند.

جدول ۱- محدوده پارامترها برای نمونه‌گیری توزیع پیشین پارامترها در مدل بارش رواناب

پارامتر	واحد	حد پایین	حد بالا	توضیحات
C_{max}	mm	۲۵۰	۵۰۰	حداکثر ظرفیت حوضه
β	-	۰/۱	۲	درجه توزیع مکانی رطوبت خاک
α	-	۰/۱	۰/۸	فاکتور سهم دو نوع مخزن
R_s	$\frac{1}{day}$	۰/۰	۰/۱	مقیاس زمانی مخزن آهسته
R_q	$\frac{1}{day}$	۰/۲	۰/۷	مقیاس زمانی مخازن سریع
T_t	$°C$	-۳/۵	۰	دمای آستانه مخزن برف
F_{dd}	$\frac{mm}{day.°C}$	۱	۱/۵	فاکتور درجه روز

مدل بارش- رواناب HyMod

مدل HyMod، از دو بخش غیرخطی و خطی تشکیل‌شده است که بخش غیرخطی آن (مخزن غیراشباع) به‌صورت سری به بخش خطی (مخازن سریع و آهسته) متصل می‌شود. بخش غیرخطی برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک و مخازن خطی جهت روندیابی جریان به‌کار رفته‌اند. بخش خطی، شامل دو نوع مخزن خطی است؛ نوع اول، به‌صورت سری سه مخزن جریان سریع را به هم متصل می‌کند؛ و نوع دوم، شامل یک مخزن جریان آهسته است. این دو نوع مخزن خطی، دارای پارامترهای R_q و R_s به ترتیب، مقیاس زمانی نگهداشت مخزن جریان سریع و آهسته هستند. بخش غیرخطی که مهم‌ترین بخش مدل و بر مبنای مدل بارش رواناب PDM (مور، ۲۰۰۷) است، دارای پارامترهای حداکثر ظرفیت ذخیره حوضه (C_{max})، درجه توزیع مکانی رطوبت خاک (β) و عامل سهم جریان ورودی به دو نوع مخزن خطی (α) است (شکل ۲). مدل بارش رواناب HyMod در مطالعاتی نظیر وروخت و همکاران (۲۰۰۵) و مرادخانی و همکاران (۲۰۰۵) برای حوضه‌های مختلف به‌کار رفته است.

نتایج و بحث

فیلتر کالمن توأم بر روی مدل HyMod با اضافه‌کردن مدول برف برای حوضه بهشت‌آباد برای سال‌های آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ به‌کار رفته است. سه سال اول دورهٔ

www.SID.ir

Archive of SID

مذکور، برای واسنجی و دو سال آخر برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. توزیع پیشین پارامترهای به‌کار رفته در مدل، با توجه به محدوده‌های مشخص‌شده در جدول ۱ به‌کار برده شده است. برای نمونه‌گیری از پارامترها، از توزیع یکنواخت و روش نمونه‌گیری چندوجهی لاتین[1] استفاده گردید. تعداد اعضای گروه‌ها n_e=150 در نظر گرفته شد که روش به‌دست آوردن حداقل آن جهت همگرایی در مطالعه مرادخانی و همکاران (۲۰۰۵) به تفصیل آمده است.

در شکل ۳، شناسایی‌پذیری[2] پارامترهای مدل (واگنر و همکاران، ۲۰۰۱) حاصل از کاربرد JEnKF، با نمایش توزیع پسین حاشیه‌ای پارامترهای مدل در قالب هیستوگرام، مشاهده می‌گردد. با درنظرگرفتن محدودهٔ توزیع پیشین به‌کار رفته در جدول ۱، محدودهٔ پارامترهای به‌دست‌آمده حول بیشینه توزیع پسین[3] هر یک از پارامترها (که در شکل با علامت ضربدر مشخص‌شده) از پراکندگی پایینی برخوردار است. این امر، بیانگر شناسایی‌پذیری مناسب پارامترها و یا خوش تعریف‌بودن آنهاست. هرچه پراکنش توزیع پسین پارامترها کمتر باشد، نشان‌دهندهٔ قطعیت بالاتر پارامترهای به‌دست‌آمده از روش مورد استفاده است. این عدم‌قطعیت، با عدم‌قطعیت در پیش‌بینی ناشی از پارامترها متفاوت است و مورد دوم، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در جدول ۲، نتایج مجموع مربعات خطای دبی‌های محاسباتی بهترین پارامتر به‌دست‌آمده از این تحقیق با نتایج روش‌های بهینه‌سازی SCE (دوان و همکاران، ۱۹۹۲)، به‌عنوان یکی از روش‌های جستجوی بهینه سراسری پرکاربرد در هیدرولوژی، مقایسه شده است. شایان ذکر است در استفاده از روش بهینه‌سازی SCE از به‌روزرسانی متغیرهای حالت استفاده نمی‌شود و تنها به جستجوی پارامترهای منتج به خطای کمتر اکتفا می‌شود. نتایج دبی‌های خروجی از دو روش در چهار دسته طبقه‌بندی‌شده‌اند.

چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود، به‌روزرسانی متغیرهای حالت به‌وسیله فیلتر کالمن توأم (JEnKF) در مقایسه با روش بهینه‌سازی SCE خطای پیش‌بینی دبی را کاهش می‌دهد. چنین بهبودی در جریان‌های پایین مشهودتر است. در جریان‌های بالاتر، اختلاف خطای دو روش کمتر است. در دبی‌های کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه بیشترین بهبود به میزان ۶۳ درصد در دورهٔ واسنجی و ۷۳ درصد در صحت‌سنجی حاصل شد. کمترین بهبود در دبی‌های بیشتر از ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه صورت گرفت که به‌ترتیب، در دوره واسنجی و صحت‌سنجی معادل با ۱۸ و ۷ درصد به‌دست آمد. به‌طورکلی، می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن احتمالاتی متغیرهای حالت با استفاده از فیلتر کالمن همادی، باعث برآورد بهتر پارامترهای مدل به میزان ۲۸ درصد در دوره واسنجی و ۴۵ درصد در دوره صحت‌سنجی شد

در شکل ۴، عدم‌قطعیت ناشی از پارامترهای مدل، با سایه پررنگ و کل عدم‌قطعیت ناشی از پارامترها، متغیرهای حالت و خروجی مدل با سایه کم‌رنگ با درنظرگرفتن باند اطمینان ۹۵ درصد نشان داده‌شده است. مقادیر مشاهداتی نیز با دوایر توپر در شکل آمده است. عدم‌قطعیت پارامترها، ۳۲ درصد و عدم‌قطعیت کل، ۹۵ درصد داده‌های مشاهداتی را پوشش می‌دهد. بر مبنای شکل ۴، می‌توان نتیجه گرفت که اکتفا به عدم‌قطعیت در پارامترها، مانند روش برآورد عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته کافی نیست و درنظرگرفتن منابع دیگر عدم‌قطعیت، پوشش داده‌های خروجی را به نحو کامل‌تری انجام می‌دهد.

نتیجه‌گیری

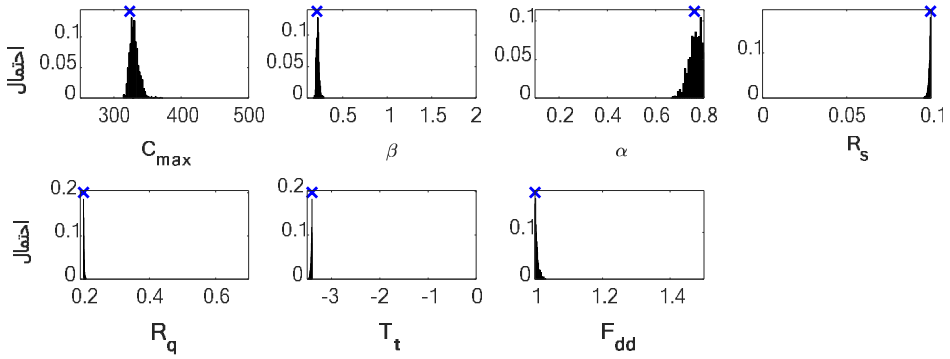
پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی به‌وسیله مدل‌ها، به دلایل مختلفی چون ضعف ابزارهای اندازه‌گیری، عدم شناخت کامل فرایند، فرضیات ساده‌کننده و غیره هنوز با عدم‌قطعیت همراه بوده و به روش‌هایی جهت تحلیل آن نیاز است. روش‌های سنتی بهینه‌سازی، تنها با بررسی پارامترهای مدل به‌عنوان منشأ ایجاد عدم‌قطعیت و صرف‌نظر از دیگر عوامل، باعث نادیده‌گرفتن منابع مهم دیگر و در نتیجه از دست‌رفتن اطلاعات می‌شد؛ اما روش‌های تلفیق داده‌ها، با ایجاد بستری مناسب جهت وارد نمودن منابع مختلف دیگر در قالب توزیع‌های پسین احتمال، برآورد توزیع‌های احتمالاتی پیشین آن منابع، شامل ورودی، خروجی حالت‌ها و از جمله پارامتر را میسر می‌سازند. همان‌طور که در این تحقیق مشاهده شد، با به کار بردن تنها ۱۵۰ عضو گروه، همگرایی حاصل شد که با توجه به اینکه فیلتر کالمن همادی، بر مبنای مونت‌کارلو

1- Latin hypercube sampling (LHS)
2- Identifiability
3- Maximum a posteriori (MAP)

www.SID.ir

Archive of SID

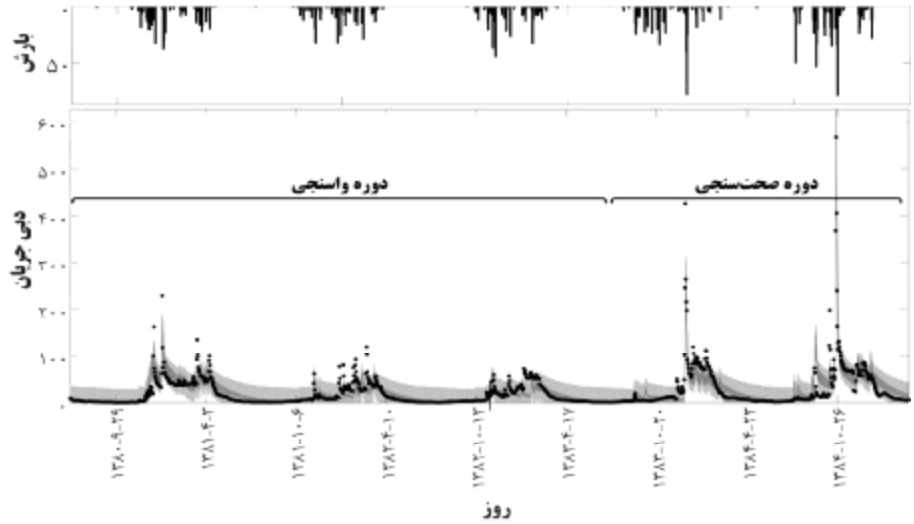
است که به تکرارهای فراوانی جهت همگرایی نیازمند است، رقم ذکرشده کارایی بالای روش به‌کار رفته را نشان می‌دهد. با بهره‌گیری از روش JEnKF که روشی جهت برآورد هم‌زمان پارامترها علاوه بر دیگر قابلیت‌های فیلتر کالمن همادی است، برآورد عدم‌قطعیت یک مدل غیرخطی هیدرولوژیکی به همراه محاسبه پارامترها و حالت‌ها صورت گرفت که چنین کاری با فیلتر کالمن کلاسیک غیرممکن و با فیلتر کالمن توسعه‌یافته، ناکارآمد بود.



شکل ۳- توزیع پسین حاشیه‌ای پارامترهای مدل (الف) حداکثر ظرفیت ذخیره حوضه، (ب) درجه توزیع مکانی رطوبت خاک، (ج) فاکتور سهم مخازن سریع و آهسته، (د) زمان نگهداشت مخزن آهسته، (ه) زمان نگهداشت مخزن سریع، (و) دمای آستانه مخزن برف، (ز) فاکتور درجه روز، پس از به‌کارگیری فیلتر کالمن توأم بر مدل مورد بررسی

جدول ۲- مقدار آماره RMSE به‌دست‌آمده با نتایج روش‌های فیلتر کالمن دسته‌ای توأم و بهینه‌سازی SCE

دبی جریان (m^3/s)	دوره واسنجی (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳)		دوره صحت سنجی (۱۳۸۳-۱۳۸۵)	
	SCE	JEnKF	SCE	JEnKF
۱۰-۰	۱۳/۳۲	۴/۸۸	۲۲/۲۵	۵/۹۵
۲۵-۱۰	۲۸/۶۰	۱۳/۲۴	۴۹/۱۶	۱۱/۸۹
۱۰۰-۲۵	۳۳/۵۵	۲۳/۶۶	۴۲/۰۵	۲۲/۳۷
بیشتر از ۱۰۰	۸۶/۷۱	۷۱/۱۷	۱۱۴/۰۷۵	۱۰۵/۷۱
طبقه‌بندی نشده	۲۲/۵۳	۱۶/۱۴	۳۷/۳۹	۲۰/۴۰



شکل ۴- عدم‌قطعیت در پیش‌بینی دبی‌های خروجی مدل مورداستفاده در مطالعه حاضر در سال‌های آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ برای حوضه بهشت‌آباد

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

1. Beven K. and Binley A. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes. 6(3): 279-298.
2. Duan Q. Sorooshian S. and Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research. 28(4): 1015-1031
3. Evensen G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research. 99(C5): 10143-10162.
4. Gharamti M. E. and Hoteit I. 2014. Complex step-based low rank extended Kalman filtering for state-parameter estimation in subsurface transport models. Journal of Hydrology. 509: 588-600.
5. Kavetski D. and Kuczera G. 2007. Model smoothing strategies to remove microscale discontinuities and spurious secondary optima in objective functions in hydrological calibration. Water Resources Research. 43(3): W03411.
6. Kavetski D. Kuczera G. and Franks S. W. 2006. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 2. Application. Water Resources Research. 42(3): W03408.
7. Miller R. N. Ghil M. and Gauthiez F. 1994. Advanced Data Assimilation in Strongly Nonlinear Dynamical-Systems. Journal of the Atmospheric Sciences. 51(8): 1037-1056.
8. Moore R. J. 2007. The PDM rainfall-runoff model. Hydrology and Earth System Sciences. 11(1): 483-499.
9. Moradkhani H. Sorooshian S. Gupta H. V. and Houser P. R. 2005. Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. Advances in Water Resources. 28(2): 135-147.
10. Reichle R. McLaughlin D. B. and Entekhabi D. 2002. Hydrologic data assimilation with the ensemble Kalman filter. Monthly Weather Review. 130(1): 103-114.
11. Vrugt J. A. Diks C. G. H. Gupta H. V Bouten W. and Verstraten J. M. 2005. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strenghts of global optimization and data assimilation. Water Resources Research. 41: W01017.
12. Vrugt J. A. Gupta H. V. Nualláin B. and Bouten W. 2006. Real-Time Data Assimilation for Operational Ensemble Streamflow Forecasting. Journal of Hydrometeorology. 7(3): 548-565.
13. Vrugt J. A. and Sadegh M. 2013. Toward diagnostic model calibration and evaluation: Approximate Bayesian computation. Water Resources Research. 49(7): 4335-4345.
14. Vrugt J. A. ter Braak C. J. F. Clark M. P. Hyman J. M. and Robinson B. A. 2008. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backwards with Markov chain Monte Carlo simulation. Water Resources Research. 44: W00B09.
15. Wagener T. Boyle D. P. Lees M. J. Wheater H. S. Gupta H. V. and Sorooshian S. 2001. A framework for development and application of hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences. 5(1): 13-26.

www.SID.ir