

شبیه‌سازی وقایع بارش - رواناب با اعمال دیاگرام‌های اختلاف فاز و تصحیح مؤلفه‌های بارش مؤثر

فاطمه محمدی^۱، احمد فاخری فرد^۲، محمدعلی قربانی^۳، یعقوب دین پزوه^۳ و صداقت شهمراد^۴

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: 83.mohammadi@gmail.com)

۲ و ۳- استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- استاد گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۵

صفحه: ۹۷ تا ۱۰۸

چکیده

تبدیل بارش به رواناب در حوضه‌های آبخیز شامل روابط غیرخطی پیچیده حاصل از تعامل مجموعه‌ای از فرآیندهای هیدرولوژیکی مختلف می‌باشند. در مطالعه حاضر، بدون اتکاء به ساختاری از پیش تعیین شده، رابطه بین ورودی و خروجی سیستم صرفاً بر اساس طبیعت اطلاعات ثبت شده استخراج گردید. همچنین اختلاف فاز اتفاق افتاده بین سیگنال‌های بارش و رواناب با استفاده از آنالیز موجک متقاطع محاسبه شد. سپس دیاگرام اختلاف فاز در مقیاس‌های مورد مطالعه برای وقایع منفرد و مرکب حوضه آبخیز ليقوان ترسیم گردید. با اعمال این فازها در موقعیت زمانی سیگنال‌های بارش، کلیه خطاهای ناشی از در نظر گرفتن حد متوسط برای تلفات حوضه به حداقل ممکن رسید، که در این تحقیق تحت عنوان موقعیت زمانی مینیمم خطا معرفی گردید (METP). همچنین پیش‌بینی دبی خروجی از حوضه توسط مدل فیلتر کالمن و بهینه‌سازی فضای حالت حاکم بر حوضه آبخیز ليقوان با استفاده از وقایع مرحله واسنجی انجام گرفت. با اعمال این اختلاف فازها در مؤلفه‌های بارش مؤثر، خطای ناشی از در نظر گرفتن متوسط تلفات نفوذ و شاخص Φ به حداقل ممکن کاهش یافت. همچنین با کاربرد روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی، هیدروگراف واحد حوضه آبخیز ليقوان به‌عنوان مدل اندازه‌گیری فیلتر کالمن استفاده گردید. نتایج نشان داد با اعمال اختلاف فازهای اتفاق افتاده بین سیگنال‌های بارش و رواناب و تلفیق آن با روش فیلتر کالمن و برنامه‌ریزی خطی (KF-LP-CW) به‌طور متوسط ضریب نش- ساتکلیف اصلاح شده 0.94 در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی حاصل شد. این مقادیر نسبت به حالتی که اختلاف فاز اعمال نگردید (روش KF-LP) برابر 0.73 و 0.68 در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی حاصل گردید. بنابراین در این مطالعه بهبود قابل توجهی با اعمال اختلاف فازها در مؤلفه‌های بارش مؤثر مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: اختلاف فاز، بارش - رواناب، زمان، ليقوان، موجک متقاطع

مقدمه

بسیاری آنالیز موجک به‌عنوان ابزار مفید برای تحلیل هر دو سری بارش و رواناب معرفی شده است (۸۰۹، ۱۳، ۱۴). اندرو و همکاران (۲) دما، بارش و دبی را در ایستگاه واقع در جنوب شبه‌جزیره پنسلوانیا با استفاده از آنالیز طیفی و همبستگی با تأخیر زمانی و موجک پیوسته برای بررسی خصوصیات هیدرولوژیکی و اقلیمی بررسی نمودند. نتایج نشان داد، روش‌های مورد استفاده در مطالعه تغییر اقلیم مفید هستند. همچنین هیچ روند بلند مدتی در توزیع‌های باران و دما مشاهده نگردید. شعیب و همکاران (۲۱) مطالعه‌ای بر روی مدل شبکه چند لایه موجک (MLPNN) برای پیش‌بینی رواناب با استفاده از داده‌های بارش انجام دادند. در این مطالعه برای تجزیه داده‌های بارندگی ورودی با استفاده از شش تابع موجک استفاده قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که مدل‌های موجک دینامیکی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای مدل‌های MLPNN موجک استاتیک مورد توجه قرار گیرند.

تبدیل موجک مرسوم برای بررسی ارتباط چند متغیر کارایی ندارد. به منظور بررسی ارتباط دو متغیر در بدهای زمان - فرکانس نیاز به استفاده از آنالیز موجک متقاطع می‌باشد. تبدیل موجک متقاطع^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط هادگینز و همکاران (۱۲) معرفی شد و نخستین بار در تحلیل بارش - رواناب توسط لابات و همکاران مورد استفاده قرار گرفت (۱۵).

مدل‌های بارش - رواناب را می‌توان از نظر چگونگی بیان فرایند و یا حل معادلات حاکم طبقه‌بندی نمود. برخی ویژگی‌ها و خواص متغیرهای هیدرولوژیکی در بعد زمان قابل رؤیت نیستند، از این‌رو با انتقال آنها به سایر فضاها (همانند سری فوریه، فرکانس، موجک، تبدیل Z، لاپلاس و ...) این خواص، قابل رؤیت و بررسی می‌شوند. در نتیجه مطالعه آنها در فضاهایی غیر از زمان، امکان بررسی بهتر و شفاف‌تری را خواهد داشت. یکی از این تبدیل‌های ریاضی تبدیل فوریه می‌باشد. تبدیل فوریه یک سیگنال $x(t)$ یک عملگر ریاضی است که منجر به نمایش‌های مختلف یک سیگنال می‌شود. تبدیل فوریه با وجود قابلیت‌های متعدد دارای محدودیت‌هایی همچون تجزیه و تحلیل طیفی سیگنال، عدم قابلیت نمایش سیگنال در قلمرو فرکانس و زمان به‌ویژه در سیگنال‌های غیر پایا^۱، می‌باشد (۲۰). از این‌رو تبدیل موجک ابزاری بسیار کارآمد برای مواجهه با سری‌های زمانی (سیگنال‌ها) است که خواص غیر ماندگار دارند (۳).

ایده اصلی تبدیل موجک این است که سری زمانی را با استفاده از یک گروه توابع موجی شکل به یک سری ضرایب تجزیه می‌کند. این دسته از توابع با استفاده از حرکت دادن یک تابع موجک پایه‌ای که به آن موجک مادر^۲ یا موجک تحلیل‌گر گفته می‌شود، به‌وجود می‌آیند (۱۹، ۲۵). در مطالعات

1- Non-stationary (Fractional Gaussian Noise)

2- Mother wavelet

فیلتر کالمن، مدل‌سازی انجام و پیش‌بینی بارش - رواناب در حوضه صورت گرفت.

مواد و روش‌ها تئوری مسئله موجک متقاطع

تبدیل موجک متقاطع در دو سری زمانی $x(t)$ و $y(t)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$W_{xy}(s, t) = W_x(s, t) W_y^*(s, t) \quad (۱)$$

که در آن $W_x(s, t)$ و $W_y^*(s, t)$ به ترتیب ضرایب تبدیل موجک پیوسته دو سری زمانی $x(t)$ و $y(t)$ هستند. S بیانگر مقیاس و t و زمان تأخیر سری‌های زمانی مذکور می‌باشد و نماد * بیانگر شکل مزدوج یک عدد مختلط است. همچنین $W_{xy}(s, t)$ ضرایب حاصل از تبدیل موجک متقاطع هستند. اختلاف $\Delta\Phi(t, S)$ فاز بین دو سری $x(t)$ و $y(t)$ به ازای یک زمان تأخیر و مقیاس مشخص به صورت ساده شده رابطه (۲) توسط تورنس و کاپو (24) به فرم رابطه (۳) تعریف شده است.

$$\Delta\Phi(t, s) = \tan^{-1} \left(\frac{\int_{S_1}^{S_2} \text{Im}[W_{xy}(S, t)] ds}{\int_{S_1}^{S_2} \text{Re}[W_{xy}(S, t)] ds} \right) \quad (۳)$$

$$\Delta\Phi(t, s) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[W_{xy}(S, t)]}{\text{Re}[W_{xy}(S, t)]} \right)$$

که در آن $\text{Im}[W_{xy}(s, t)]$ و $\text{Re}[W_{xy}(s, t)]$ به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب $W_{xy}(s, t)$ می‌باشند. همچنین S_1 و S_2 حدود انتگرال و به ترتیب نشان‌دهنده حدود پائین و بالای باند مقیاس بوده $S_1 < S_2$ می‌باشد.

فیلتر کالمن^۲

فیلتر کالمن، فیلتری بازگشتی است که از نقطه نظر کمینه‌سازی متوسط مربعات خطا بهینه می‌باشد. در این روش از گشتاور اول (میانگین) و کواریانس توزیع احتمال استفاده می‌گردد. الگوریتم فیلتر کالمن از سه جزء تشکیل شده است: (۱) مدل سیستم. (۲) مدل اندازه‌گیری و (۳) فیلتر کالمن (۱۱، ۲۳).

سیستمی که رفتار دینامیکی گسسته دارد را می‌توان از نظر بردار حالت به صورت زیر تعریف نمود:

$$X(k) = \Phi(k|k-1)X(k-1) + \Gamma(k|k-1)w(k-1) \quad (۴)$$

که در این رابطه: $X(k)$ بردار حالت با ابعاد $(n \times 1)$ ، $\Phi(k|k-1)$ ماتریس گذار (انتقال)^۲ حالت با ابعاد $(n \times n)$ برای گام زمانی k در لحظه $(k-1)$ است. $\Gamma(k|k-1)$ ماتریس گذار حالت خطا با ابعاد $(n \times n)$ و $w(k-1)$ بردار خطای سیستم (بردار نویز یا گوسین سفید) با ابعاد $(n \times 1)$ می‌باشد و k نشان‌دهنده گام زمانی است. سیستمی که رفتار دینامیکی گسسته دارد را می‌توان از نظر بردار حالت به صورت زیر تعریف نمود:

$$X(k) = \Phi(k|k-1)X(k-1) + \Gamma(k|k-1)w(k-1) \quad (۵)$$

گرینستد و همکاران (۱۰) از روش موجک متقاطع و موجک پیوسته در تحلیل سری‌های زمانی ژئوفیزیکی استفاده نمودند. در این مطالعه نشان داده شد که چگونه می‌توان از آمار زاویه فاز برای به دست آوردن اطمینان در روابط علت و معلولی و صحت‌سنجی مدل‌های روابط فیزیکی بین سری‌های زمانی استفاده کرد.

کاربردهای متعدد فیلتر کالمن در هیدرولوژی، هیدرولیک و منابع آب در مطالعه چپو (۵) بحث شده است. یک بحث خوب از تئوری فیلتر کالمن توسط براس و همکاران (۴) ارائه شده است. دونگ و همکاران (۷) مدل غیرخطی Prasad را برای پیش‌بینی و تخمین پارامترهای رواناب، با استفاده از روش کنترل تطبیقی فیلتر کالمن به کار گرفتند.

لی و سینگ (۱۶) با جزئیات کاربردهای مختلف از فیلتر کالمن را در هیدرولوژی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای مدل تانکی را در فرایند بارش - رواناب برای کاربرد فیلتر کالمن استفاده نمودند. بردار حالت، به نمایندگی از پارامترهای مدل تانکی و مقدار اولیه آن، با آزمون و خطا برآورد شد.

چو و وانگ (۶) یک روش چند مدله با استفاده از تبدیل موجک بر اساس فیلتر کالمن (WKF) برای تخمین زمان واقعی سیلاب پیشنهاد دادند، که به طور هم‌زمان متغیرهای حالت تجزیه شده و پارامترهای ناشناخته برای پیش‌بینی سیل در زمان واقعی را تخمین می‌زند. مینگ چو (۱۷) با الهام از تئوری تبدیل موجک و فیلتر کالمن، بر اساس ظرفیت مناسب مدل ولترا، یک مدل هیدرولوژیکی غیرخطی متغیر با زمان ارائه نمودند که به تقریب فرآیندهای بارش رواناب غیرخطی دلخواه می‌پردازد. سان و همکاران (۲۲) فیلتر کالمن توسعه یافته همراه با مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT) را در مورد ادغام جریان رودخانه سنگال در غرب آفریقا مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد عملکرد روش در شاخه صعودی هیدروگراف سیل نسبت به شاخه نزولی بهتر است.

با توجه به بررسی و مروری بر سایر تحقیقات پیشین، مشاهده گردید، تأثیر اعمال اختلاف فاز بین سیگنال‌های بارش و رواناب تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین بر اساس مروری بر مطالعات پیشین، تلفیق روش موجک جهت تجزیه سری‌های هیدرولوژیکی و روش‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی مصنوعی جهت شناخت الگو و پیش‌بینی در سایر مطالعات بررسی شده و توانمندی تلفیق این روش‌ها جهت بهبود پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی توسط محققان زیادی به اثبات رسیده است. لذا در این مطالعه با ارائه یک دیدگاه متفاوت با سایر تحقیقات در این زمینه، روش تلفیقی موجک متقاطع، برنامه‌ریزی خطی و فیلتر کالمن توسعه داده شد. شبه‌سازی مدل برای γ واقعه منفرد و مرکب در حوضه آبخیز ليقوان در استان آذربایجان شرقی با استفاده از ۴ روش تلفیقی و منفرد انجام گرفت. به دلیل وجود دو متغیر بارش و رواناب از موجک متقاطع و موجک پیوسته برای به دست آوردن اختلاف فاز اتفاق افتاده بین دو متغیر و جداسازی نویز استفاده شد که این مرحله در کاهش خطای مدل‌سازی نقش ویژه‌ای را ایفا نمود. سپس با ارتباط سایر پارامترهای مرتبط با پدیده بارش - رواناب، و تلفیق سطوح تجزیه، با مدل

لیقوان انجام گردید. تلفیق روش‌های مذکور در قالب چهار مدل به شرح ذیل به کار گرفته شد:

KF- LP-CW: مدل تلفیقی فیلتر کالمن - برنامه‌ریزی خطی و موجک متقاطع

KF- SP-CW: مدل تلفیقی فیلتر کالمن - معادلات اسپیلاین مکعبی و موجک متقاطع

LP-CW: مدل تلفیقی برنامه‌ریزی خطی و موجک متقاطع

KF- LP: مدل تلفیقی فیلتر کالمن - برنامه‌ریزی خطی لازم به ذکر است در مدل KF- SP-CW، معادلات اسپیلاین مکعبی بر هیدروگراف واحد حاصل از برنامه‌ریزی خطی برآزش داده شد و به‌عنوان مدل اندازه‌گیری روش فیلتر کالمن مورد استفاده قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز لیقوان یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه بوده و با وسعتی معادل ۷۶ کیلومتر مربع در دامنه شمالی سه‌سند قرار دارد. به‌طور کلی حوضه آبخیز لیقوان به‌علت وجود پوشش‌های برفی دائمی در ارتفاعات مختلف آن دارای رژیم برفی است. ذوب برف در جریان دائمی آن مؤثر و قابل ملاحظه می‌باشد. ریزش باران در ماه‌های بهار و تابستان شدید بوده و این امر اثر قابل توجهی در بالا بردن مقدار دبی رودخانه دارد. این حوضه از سال ۱۳۵۰ به‌عنوان حوضه معرف انتخاب و تجهیزات هیدروکلیماتولوژی در آن نصب گردید. در شکل (۱) موقعیت قرارگیری حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. در این مطالعه وقایع مورد استفاده پس از بررسی اولیه به دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم شدند. سپس جریان پایه از هیدروگراف سیلاب کسر گردید و شاخص ϕ محاسبه شد و با کسر آن از بارش کل، هیتوگراف بارش مؤثر محاسبه گردید و به‌عنوان ورودی مدل فیلتر کالمن مورد استفاده قرار گرفت.

که در این رابطه: $X(k)$ بردار حالت با ابعاد $(n \times 1)$ ، $\Phi(k|k-1)$ ماتریس گذار (انتقال) حالت با ابعاد $(n \times n)$ برای گام زمانی k در لحظه $(k-1)$ است. $\Gamma(k|k-1)$ ماتریس گذار خطا با ابعاد $(n \times n)$ و $w(k-1)$ بردار خطای سیستم (بردار نویز یا گوسین سفید) با ابعاد $(n \times 1)$ می‌باشد و k نشان‌دهنده گام زمانی است.

به‌وسیله معادله (۶) سیستم برای مقادیر حالت پیش‌بینی $\bar{x}(k|k-1)$ در زمان k مقدار در گام زمانی قبل یعنی $k-1$ را محاسبه می‌کند (۱۸، ۲۶).

$$\bar{X}(k|k-1) = \Phi(k|k-1)\bar{X}(k-1|k-1) \quad (6)$$

با دانستن مقدار پیش‌بینی حالت $\bar{X}(k|k-1)$ و بردار اندازه‌گیری $Z(k)$ در مدل اندازه‌گیری، مقدار تخمین حالت $\hat{X}(k|k)$ به وسیله فیلتر خطای اندازه‌گیری با استفاده از هسته کالمن $k(k)$ به‌صورت روابط زیر حاصل می‌شود.

$$\hat{X}(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + k(k)Z(k) - H(k)\bar{X}(k|k-1) \quad (7)$$

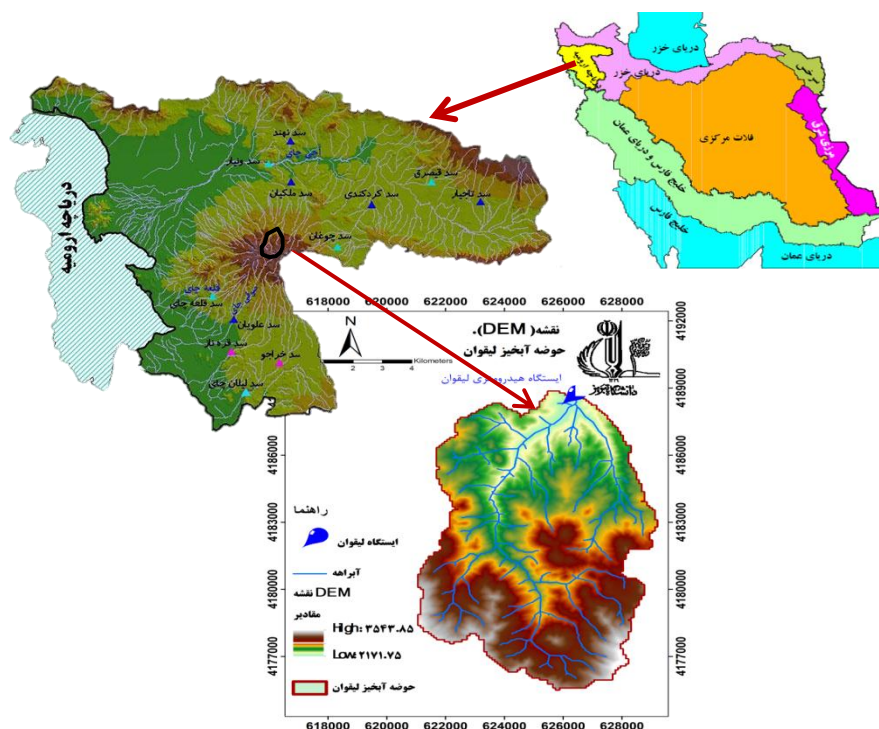
(۸)

$$k(k) = P(k|k-1).H(k)^T[H(k)P(k|k-1).H(k)^T + R(k)]^{-1}$$

همچنین عبارت $[Z(k) - H(k)\bar{X}(k|k-1)]$ خطای اندازه‌گیری می‌باشد. $R(k)$: ماتریس کواریانس خطای اندازه‌گیری و $P(k|k)$: کواریانس در تخمین خطای حالت به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P(k|k) = [I - k(k)H(k)].P(k|k-1) \quad (9)$$

در این مطالعه با استفاده از تلفیق روش‌های موجک گسسته، موجک پیوسته، موجک متقاطع، فیلتر کالمن و روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و معادلات درون‌یاب مکعبی اسپیلاین، شبیه‌سازی وقایع بارش و رواناب در حوضه آبخیز



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز لیقوان در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه
Figure 1. The position of Lighvan basin in Orumieh lake watershed

مرحله ۶: ورود هیدروگراف واحد محاسبه شده به‌عنوان فضای حالت و اعمال فیلتر کالمن.

مرحله ۷: محاسبه هیدروگراف سیلاب و ارزیابی معیارهای خطا.

در جدول (۱) نتایج پردازش اولیه وقایع بارش و رواناب حوضه آبخیز لیقوان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است.

نتایج به‌دست آمده از پردازش اولیه بر سیگنال‌های بارش و رواناب نشان می‌دهد در مرحله واسنجی جهت تعیین فضای حالت پس از بهینه‌سازی تعداد متغیرهای حالت با پروسه سعی و خطا و تعیین مدل اندازه‌گیری سیستم فیلتر کالمن، با استفاده از هیدروگراف واحد حاصله از روش برنامه‌ریزی خطی، همچنین با اعمال نویز حاصل از تجزیه موجک گسسته به مدل فیلتر کالمن، سیستم بهینه با تعداد متغیر حالت ۵ برای حوضه آبخیز لیقوان بهینه گردید. لذا با استفاده از این سیستم فضای حالت بهینه، با اعمال ورودی (بارش مؤثر) به سیستم خروجی برای وقایع صحت‌سنجی محاسبه گردید. همچنین جهت اصلاح مؤلفه‌های بارش مؤثر به‌عنوان مهمترین و حساس‌ترین ورودی به سیستم، از تبدیل موجک متقاطع استفاده شد. در جدول (۲) نتایج حاصل از تحلیل دیاگرام‌های اختلاف فاز در وقایع مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است.

نتایج و بحث

ترسیم دیاگرام‌های اختلاف فاز و اعمال آن بر پالس‌های بارش مؤثر در حوضه آبخیز لیقوان

پس از تعیین اختلاف فاز در مقیاس بهینه در هر واقعه و رسم دیاگرام‌های اختلاف فاز، این مقادیر به پالس‌های بارش مؤثر اعمال گردید و شبه‌سازی بر مبنای این اختلاف فازها و بدون اعمال اختلاف فاز انجام گردید. نتایج این تحلیل در شکل (۲) برای مرحله واسنجی و در شکل (۳) برای دوره صحت‌سنجی در حوضه لیقوان ارائه شده است.

مراحل کلی شبه‌سازی به‌صورت زیر معرفی می‌گردد:

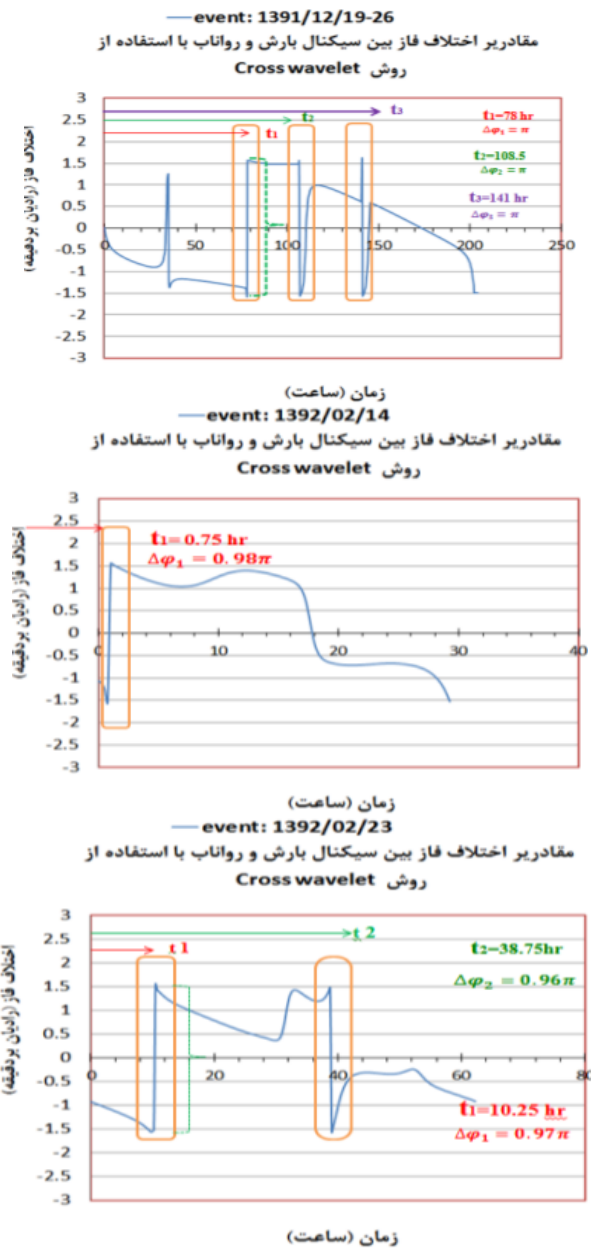
مرحله ۱: جداسازی دبی پایه هیدروگراف سیلاب و کسر متوسط شاخص نفوذ ϕ از بارش کل متوسط اتفاق افتاده در حوضه.

مرحله ۲: اعمال تبدیل موجک گسسته به‌منظور حذف نویز موجود در وقایع و انتخاب موجک مناسب جهت تجزیه.

مرحله ۳: اعمال موجک متقاطع جهت تشخیص فاز و تأخیر زمانی بین سیگنال بارش و رواناب.

مرحله ۴: اعمال تأخیرهای زمانی محاسبه شده جهت انتقال مؤلفه‌های بارش مؤثر.

مرحله ۵: اعمال معکوس انتگرال پیچش و محاسبه هیدروگراف واحد هر رویداد با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی.



شکل ۲- دیاگرام اختلاف فاز مقیاس بهینه مرحله واسنجی
Figure 2. Phase difference diagrams for optimal Scale in calibration step

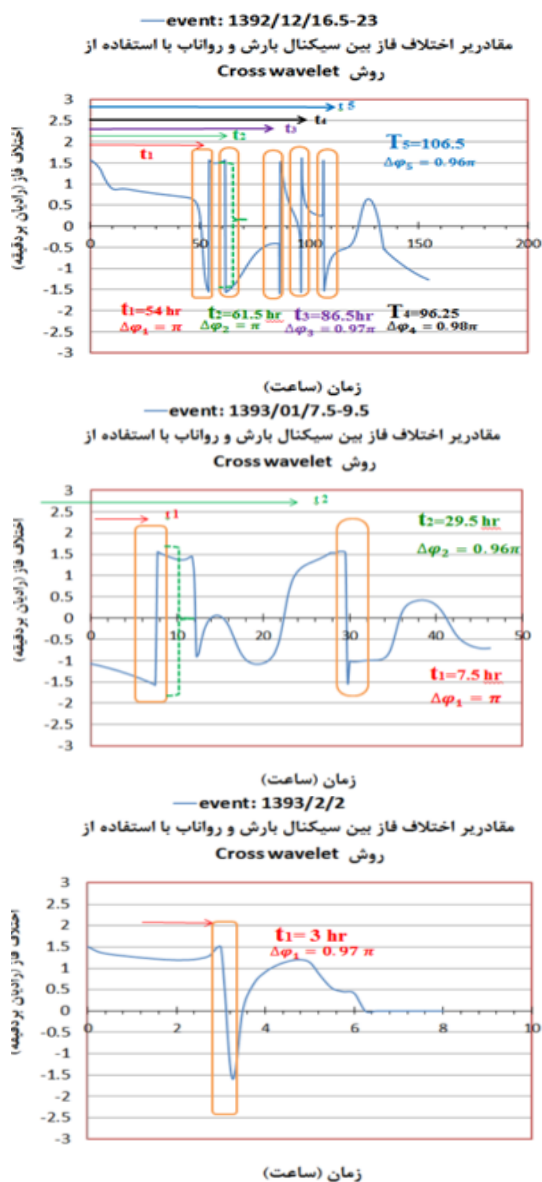
این تأخیر را حوضه و خصوصیات بارش اتفاق افتاده بر روی خروجی حوضه ایجاد نموده اما با اعمال اختلاف فاز محاسبه شده از طریق موجک متقاطع اولین تأخیر برابر ۷۸ ساعت محاسبه و اعمال گردید. همچنین با توجه به اینکه این رخداد در اواخر اسفند ماه اتفاق افتاده این تأخیر ممکن است به دلیل ذوب برف نیز باشد. با بررسی معیارهای ارزیابی خطا در مورد این واقعه می‌توان دریافت فیلتر کالمن در تشخیص الگوی ایجاد جریان به‌خوبی عمل نموده و روند تغییرات رواناب مستقیم را به‌خوبی دنبال می‌کند. این امر به‌دلیل خاصیت بازگشت‌پذیری فیلتر کالمن و تصحیح مقادیر محاسباتی و هسته فیلتر بر اساس مقادیر مشاهداتی است. معیارهای ارزیابی خطا در مورد این واقعه در جدول (۳) ارائه شده است.

ارزیابی معیارهای خطای شبیه‌سازی در روش‌های مورد مطالعه در حوضه ليقوان

با توجه به کاربرد ۴ روش مورد مطالعه پس از جداسازی وقایع مربوط به واسنجی و صحت‌سنجی و اعمال اختلاف فاز بهینه‌شده در مقیاس، هیدروگراف ورودی، نویز حاصل از تحلیل موجک گسسته و هیتوگراف بارش مؤثر با اعمال اختلاف فاز به مدل وارد شد. نتایج شبیه‌سازی در اشکال (۴) تا (۵) و جدول (۳) ارائه شده است.

در واقعه مورخ ۲۶-۱۳۹۱/۱۲/۱۹ پس از حصول هیتوگراف بارش مؤثر و کسر شاخص Φ ، قبل از اعمال اختلاف فاز توسط موجک متقاطع، سیگنال رواناب اولین تأخیر به‌میزان ۶۴/۲۵ ساعت نسبت به بارش اتفاق افتاده تأخیر داشته که

همچنین می‌توان به نزدیک بودن نتایج دو روش (KF- LP-CW) و (KF- SP-CW) اشاره نمود که دلیل آن ماهیت استفاده از معادلات اسپیلاین مکعبی و برازش آن بر هیدروگراف واحد حاصل از روش برنامه‌ریزی خطی (LP) می‌باشد.



شکل ۳- دیاگرام اختلاف فاز مقیاس بهینه مرحله صحت‌سنجی
Figure 3. Phase difference diagrams for optimal Scale in verification step

جدول ۱- نتایج پردازش اولیه وقایع بارش و رواناب حوضه آبخیز لیقوان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی
Table 1. Primary processing results of rainfall and runoff events in calibration and verification steps for Lighvan basin

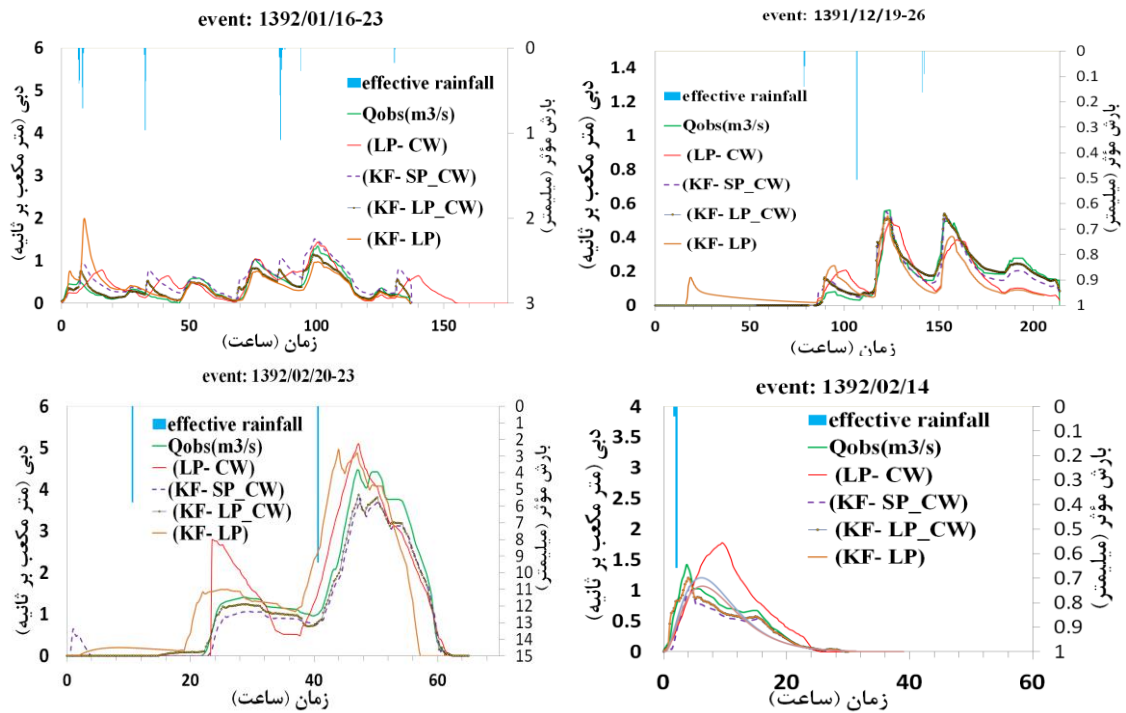
مرحله صحت‌سنجی			مرحله واسنجی				وقایع انتخابی جهت مرحله	
۹۳/۲/۲	۹۳/۱/۷	۹۲/۱۲/۱۶	۹۲/۲/۲۰	۹۲/۲/۱۴	۹۲/۱/۱۶	۹۱/۱۲/۱۹		
۶/۸	۱/۶	۱۰/۴۶	۲/۸	۰/۷۵	۰/۱۲	۲	تاریخ رویداد	
۱/۷	۰/۴	۲/۶	۰/۷	۰/۱۸۷	۰/۰۳۱	۰/۵	متوسط Φ (میلیمتر در ۱۵ دقیقه)	
۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	متوسط Φ مرحله صحت‌سنجی	
۱/۴۸	۳/۹۸	۰/۰۷	۴/۴۳	۱/۴۴	۱/۳۴	۰/۵۶۳	دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه)	
۵	۱۴/۷۵	۷۶	۴۹/۵	۳/۷۵	۱۰۰/۵	۱۲۴	زمان اوج (ساعت)	
۷/۷۵	۴/۱۵	۱۴۲/۷۵	۶۱/۵	۳۰	۱۳۶/۷۵	۲۱۴	زمان پایه (ساعت)	
۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۶۶	زمان تمرکز متوسط	
Sym2	Sym2	mor	**sym2	*mor	mor	mor	موجک برآزش یافته	
۲	۲	۲	۳	۲	۳	۴	درجه تجزیه	
۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۰/۰۹۶	۰/۰۵۱	۰/۰۱۶	۰/۰۸۶	۰/۳۱۴	RMSE تجزیه با موجک	
۴	۵	۵	۶	۵	۷	۵	تعداد متغیر حالت واقعی	
۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	متغیر حالت بهینه	

*mor: Morlet wavelet ** sym: Symlets wavelet

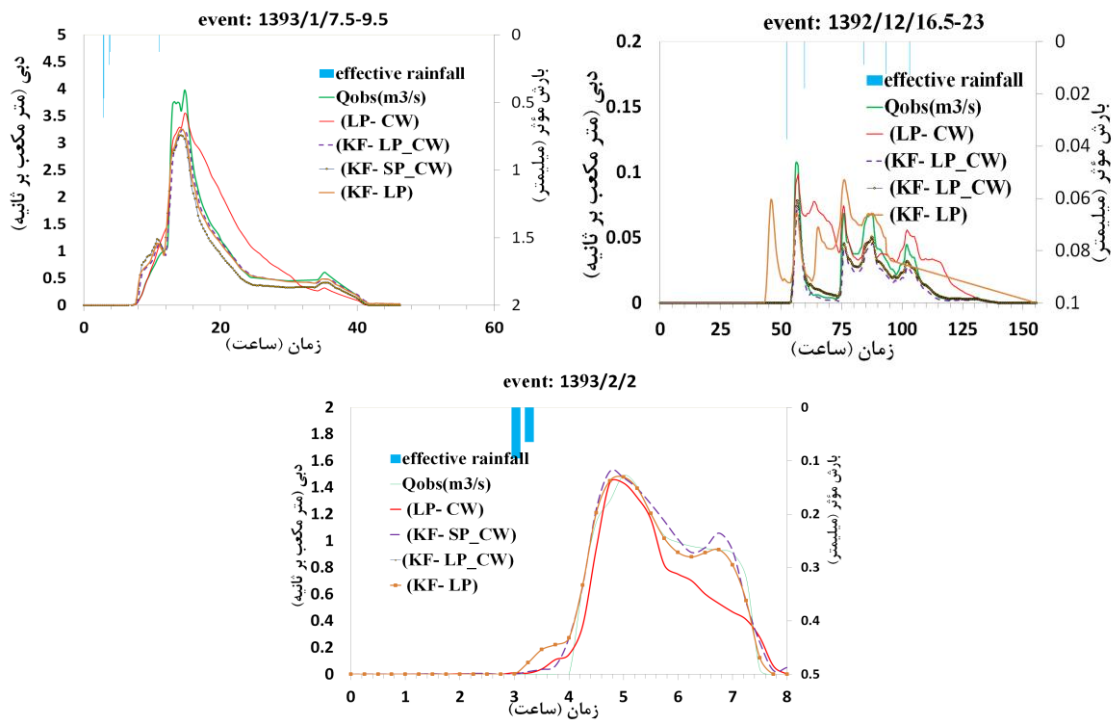
جدول ۲- اختلاف فاز وقایع بارش و رواناب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در حوضه آبخیز لیقوان
Table 2. The phase difference of rainfall and runoff events in calibration and verification steps for Lighvan basin

مرحله صحت‌سنجی			واسنجی (آموزش)				مرحله	
۹۳/۲/۲	۹۳/۱/۷	۹۲/۱۲/۱۶	۹۲/۲/۲۰	۹۲/۲/۱۴	۹۲/۱/۱۶	۹۱/۱۲/۱۹	ماه	
۳	۷/۵	۵۴	۱۰/۲۵	۰/۷۵	۶/۵	۷۸	ساعت	t_1
0.97π	π	π	0.97π	0.98π	0.95π	π	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_1$
.	۲۹/۵	۶۱/۵	۳۸/۷۵	.	۳۲/۵	۱۰۸/۵	ساعت	t_2
.	0.96π	π	0.96π	.	0.97π	π	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_2$
.	.	۸۶/۵	.	.	۶۸/۵	۱۴۱	ساعت	t_3
.	.	0.97π	.	.	0.98π	π	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_3$
.	.	۹۶/۲۵	.	.	۸۴/۵	.	ساعت	t_4
.	.	0.98π	.	.	0.97π	.	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_4$
.	.	۱۰۶/۵	.	.	۹۴	.	ساعت	t_5
.	.	0.96π	.	.	π	.	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_5$
.	.	.	.	.	۱۳۰/۷	.	ساعت	t_6
.	.	.	.	.	0.97π	.	رادیان بر دقیقه	$\Delta\phi_6$

* t: موقعیت‌های زمانی مینیمم‌کننده خطا^{۱۱} (METP)



شکل ۴- شبیه‌سازی روش‌های مورد مطالعه در حوضه لیتقوان و مرحله واسنجی
 Figure 4. The simulation of studied methods in Lighvan basin for calibration step



شکل ۵- شبیه‌سازی روش‌های مورد مطالعه در حوضه لیتقوان در مرحله صحت‌سنجی
 Figure 5. The simulation of studied methods in Lighvan basin for test step

است، جابجایی را در زمان وقوع قله‌ها داریم ولی مقادیر اوج و روند کلی به مقادیر مشاهداتی نزدیک می‌باشد. مطابق ارزیابی نتایج معیارهای ارزیابی، تلفیق این دو روش با هم دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد.

با توجه به منفرد بودن واقعه مورخ ۱۳۹۳/۳/۷-۹ نیز مشاهده می‌شود اعمال موجک متقاطع در مقیاس بهینه هیچگونه جابجایی را پالس‌های بارش مؤثر ایجاد نکرده و نتایج روش‌های (KF-LP-CW) و روش (KF-LP) مشابه می‌باشد. در این واقعه سایر روش‌ها از عملکرد خوبی برخوردار هستند. که نشان‌دهنده انتخاب مناسب شاخص Φ می‌باشد. در مورد رخداد مورخ ۱۳۹۳/۲/۲ هم تأخیر اولیه معادل ۳ ساعت مربوط به خصوصیات بارش و حوضه می‌باشد و اعمال تبدیل موجک نیز هیچ تأخیر فازی را در مورد این واقعه ایجاد نکرده است.

در شکل (۶) و (۷) مقادیر متوسط معیارهای ارزیابی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است. از بین روش‌های مورد مطالعه روش LP-CW در مرحله واسنجی (۰/۳۳) و صحت‌سنجی (۰/۲۶) نسبت به ۳ روش دیگر از نظر معیار جذر میانگین مربع خطا عملکرد ضعیف‌تری را دارا بود. همچنین تحلیل نتایج مربوط به ضریب تعیین R^2 عملکرد بهتر روش KF-LP-CW را تأیید می‌کند (۰/۹۶ و ۰/۹۸ در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی).

نتایج تحلیل معیار ارزیابی فرم اصلاح‌شده ضریب نش-ساتکلیف ارزیابی مشابه با نتایج دو معیار پیشین بوده و مقدار این معیار به‌طور متوسط برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ۰/۹۴ می‌باشد.

تحلیل در مورد ضریب نابربری تایل مقادیر متوسط برای این معیار در روش KF-LP-CW در مرحله واسنجی ۰/۱۱ و در مرحله صحت‌سنجی به‌طور متوسط برابر ۰/۰۹ است.

به‌نظر می‌رسد در واقعه مرکب مورخ ۱۳۹۱/۱۲/۱۶-۲۳ ذوب برف یا عاملی که باعث ایجاد تأخیر در رواناب شود، مشاهده نشده است. اختلاف فازی در ابتدای شروع بارش مؤثر و رواناب مستقیم ایجاد نشده و تنها اختلاف فازهای اعمال شده توسط موجک متقاطع، به‌منظور کاهش خطا ناشی از متوسط در نظر گرفتن شاخص Φ می‌باشد.

در واقعه مورخ ۱۳۹۲/۲/۱۴ ملاحظه می‌شود با توجه به منفرد بودن واقعه، در شروع پالس‌های بارش مؤثر حوضه واکنش نشان‌دهنده و هیدروگراف رواناب مستقیم بلافاصله پس از وقوع بارش اتفاق افتاده است. در اکثریت وقایع منفرد در حوضه چنین حالتی مشاهده می‌شود. همچنین به‌دلیل عدم جابجایی پالس‌های هیدروگراف بارش مؤثر نتایج دو روش (KF-LP-CW) و روش (KF-LP) مشابه می‌باشد.

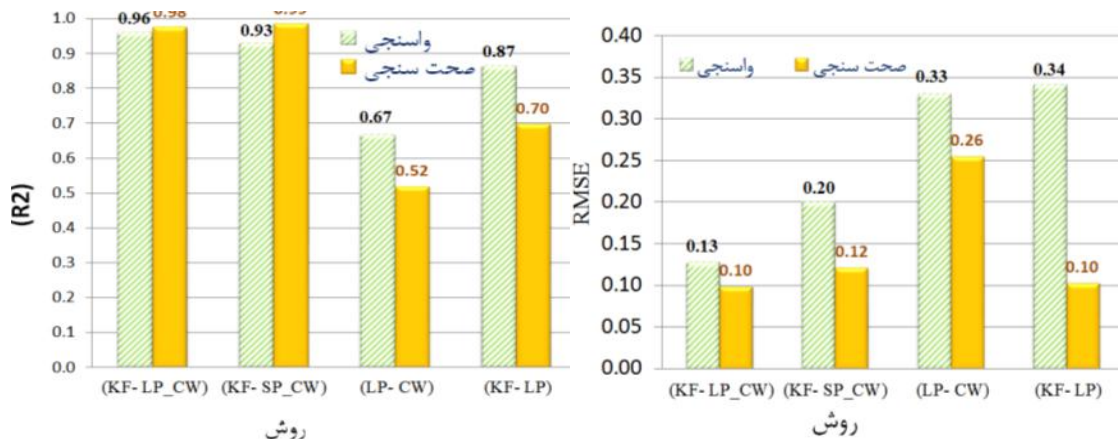
بررسی نتایج شبیه‌سازی رخداد ۱۳۹۲/۲/۲۰ نشان می‌دهد فاز اولیه اتفاق افتاده در پالس بارش مؤثر حدود ۱۰/۲۵ ساعت از شروع بارش است که این تأخیر نشان می‌دهد حدود ۱۰ ساعت پس از شروع بارش، جریان مربوط به بارش ایجاد شده است و پس از اعمال موجک متقاطع محل قرارگیری پالس اول بارش مؤثر اصلاح شده با پالس اولیه بارش مؤثر یکسان است.

در مورد پالس دوم که جایگاه آن پس از اعمال تبدیل موجک متقاطع از ۳۳/۷۵ به ۳۷/۷۵ مربوط به کاهش خطا می‌باشد. با توجه به حساس بودن فیلتر کالمن به ورودی تعیین دقیق پالس‌های بارش مؤثر نقش به‌سزایی در تابع خروجی دارد. در رخداد مورخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۶-۲۳ مشاهده می‌شود فیلتر کالمن نقش بسیار مهمی در شبیه‌سازی دارد چرا که در روش LP-CW که از فیلتر کالمن استفاده نشده شکل کلی هیدروگراف خروجی با خروجی حوضه متفاوت می‌باشد و در روش KF-LP که از روش موجک متقاطع استفاده نشده

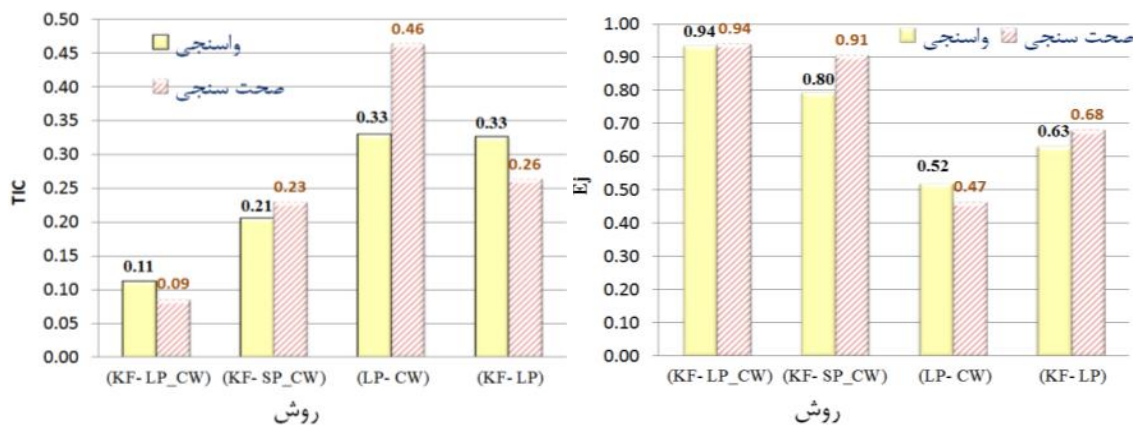
جدول ۳- نتایج کاربرد معیارهای ارزیابی در وقایع انتخابی مرحله واسنجی در حوضه آبخیز لیقوان

Table 3. The results of application of evaluation criteria in selected events of calibration step in Lighvan basin

معیار ارزیابی	مرحله رخداد		واسنجی				صحت‌سنجی	
	روش	معیار	۱۳۹۱/۱۲/۱۶-۲۳	۱۳۹۲/۲/۱۴	۱۳۹۲/۲/۲۰	۱۳۹۳/۳/۷-۹	۱۳۹۳/۲/۲	۱۳۹۳/۳/۷-۹
جذر میانگین مربع خطا (RMSE)	(KF-LP-CW)	۰/۰۲۹	۰/۱۱۹	۰/۰۸۴	۰/۲۸۵	۰/۰۰۷	۰/۲۰۴	۰/۰۸۷
	(KF-SP-CW)	۰/۰۳۷	۰/۲۴۵	۰/۱۶۷	۰/۳۵۷	۰/۰۰۹	۰/۲۶۹	۰/۰۸۸
	(LP-CW)	۰/۰۸	۰/۲۴۸	۰/۴۲۹	۰/۵۶۴	۰/۰۲۱	۰/۳۸۹	۰/۳۵۶
	(KF-LP)	۰/۰۸۶	۰/۲۷	۰/۰۸۴	۰/۹۲۶	۰/۰۲	۰/۲۰۴	۰/۰۸۷
ضریب تعیین (R^2)	(KF-LP-CW)	۰/۹۸	۰/۸۹۷	۰/۹۸۱	۰/۹۸۱	۰/۹۷۷	۰/۹۷۷	۰/۹۷۴
	(KF-SP-CW)	۰/۹۷	۰/۷۸۳	۰/۹۷۹	۰/۹۷۹	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۷
	(LP-CW)	۰/۶۸	۰/۶۱۴	۰/۶۸۷	۰/۶۸۷	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۵۸
	(KF-LP)	۰/۹۸	۰/۵۱۷	۰/۹۸۱	۰/۹۸۱	۰/۵۶۱	۰/۵۶۱	۰/۹۷۴
ضریب نابربری تایل (TIC)	(KF-LP-CW)	۰/۰۶۸	۰/۱۳۸	۰/۰۹	۰/۱۵۷	۰/۰۴۲	۰/۱۳۵	۰/۰۸۱
	(KF-SP-CW)	۰/۱۸۸	۰/۲۵۲	۰/۱۸	۰/۲۰۲	۰/۳۸۴	۰/۱۸۱	۰/۱۲۴
	(LP-CW)	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۵۶	۰/۲۲	۰/۶۱
	(KF-LP)	۰/۵	۰/۳۰۶	۰/۰۹	۰/۳۹۹	۰/۵۲۶	۰/۱۳۵	۰/۱۲۸
ضریب نش ساتکلیف اصلاح شده (E_i)	(KF-LP-CW)	۰/۹۶	۰/۸۶۶	۰/۹۵۸	۰/۹۶	۰/۸۹۵	۰/۹۵۳	۰/۹۷۳
	(KF-SP-CW)	۰/۹۳	۰/۴۳۲	۰/۸۷۶	۰/۹۳۷	۰/۸۳	۰/۹۱۸	۰/۹۷۳
	(LP-CW)	۰/۷۰۷	۰/۳۴	۰/۱۹۳	۰/۸۴۲	۰/۱۱	۰/۸۳	۰/۵۵۶
	(KF-LP)	۰/۶۶۱	۰/۳۱	۰/۹۵۸	۰/۶۰۸	۰/۱۲۳	۰/۹۵۳	۰/۹۷۳



شکل ۶- نمودار متوسط معیار ارزیابی RMSE و R² در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی
Figure 6. The average value of RMSE and R² for calibration and test step



شکل ۷- نمودار متوسط معیار ارزیابی Eij و TIC در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی
Figure 7. The average value of Eij and TIC for calibration and test step

بهبود عملکرد مدل‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی با تلفیق تبدیل موجک جهت تجزیه در قلمرو فرکانس و زمان، همچنین استفاده از فیلتر کالمن و تلفیق آن با موجک پیوسته و گسسته و روش‌های هوش مصنوعی در مطالعات سایر محققان از جمله چو و وانگ (۶)، لی و سینگ (۱۶)، مینگ چو (۱۷)، شعبی و همکاران (۲۱) و سان و همکاران (۲۲) به‌وضوح مشاهده می‌شود.

نتایج حاصله نشان داد انتخاب شاخص متوسط Φ باعث بروز خطا در سیستم می‌گردد. لذا استفاده از دیاگرام‌های فاز برای اعمال به مؤلفه‌های بارش مؤثر در کاهش خطا نقش مهمی را ایفا می‌کند. همچنین با توجه به کاربرد روش موجک متقاطع برای اعمال اختلاف فاز و تلفیق با روش فیلتر کالمن به‌منظور پیش‌بینی جریان خروجی از حوضه بهبود قابل ملاحظه‌ای در شبه‌سازی حاصل گردید. بنابراین جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد، تلفات نفوذ در حوضه توسط منحنی‌های نفوذ اندازه‌گیری شده و کاربرد این شاخص در مقایسه شاخص Φ ارزیابی گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد از روش‌های دیگر پیش‌بینی که بر تئوری سیستم‌های غیر خطی استوار هستند، نظیر فیلتر ذره، فیلتر کالمن توسعه‌یافته و برای مدل‌سازی استفاده گردد.

بنابراین مشاهده می‌شود چنانچه از روش موجک متقاطع برای اعمال اختلاف فاز استفاده گردد (روش KF-LP-CW)، نسبت به حالتی که این اختلاف فازها اعمال نگردد (روش KF-LP): در مورد معیار جذر میانگین مربع خطا مقدار این معیار ارزیابی از ۰/۳۴ به ۰/۱۳ در مرحله واسنجی کاهش یافته و در مرحله صحت‌سنجی این معیار تغییری نکرده است (۰/۱). در مورد سایر معیارهای ارزیابی نیز به‌ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، در ضریب تعیین (از ۰/۸۷ به ۰/۹۶ و ۰/۷ به ۰/۹۸ افزایش)، فرم اصلاح‌شده ضریب نش-ساتکلیف (از ۰/۶۳ به ۰/۹۴ و ۰/۶۸ به ۰/۹۴ افزایش) و ضریب نابرابری تایل (از ۰/۳۳ به ۰/۱۱ و ۰/۲۶ به ۰/۰۹۹۸ کاهش) را نتیجه داده است. لازم به ذکر است ضریب نابرابری تایل بین صفر و یک متغیر بوده و مقادیر کمتر حاکی از عملکرد بهتر مدل می‌باشد. در مورد کاربرد فیلتر کالمن به‌عنوان مدل پیش‌بینی (روش KF-LP-CW) نیز می‌توان دریافت با توجه به بازگشتی بودن این فیلتر و امکان تعیین فضای حالت بهینه حاکم بر سیستم عملکرد مطلوبی را نسبت به حالتی که از فیلتر کالمن استفاده نشده (روش LP-CW) می‌توان مشاهده نمود. این امر به‌وضوح در نمودارهای شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده است.

منابع

1. Ambrus, S., A. Szöllösi and Nagy. 1982. Operational real-time river flow forecasting using stochastic prediction algorithms. Real-time operation of hydrosystems, 467-486.
2. Andreo, B., P. Jimenez, J.J. Durán-Carrasco, F.I. Vardillo and A. Mangin. 2006. Climatic and hydrological variations during the last 117–166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses, Journal of hydrology, 324: 24-39.
3. Antonios, A. and E.V. Constantine. 2003. Wavelet exploratory analysis of the FTSE ALL SHARE. Index. Economics Letters University of Durham UK, 1-22.
4. Bras, R.L. and I. Rodriguez-Iturbe. 1985. Random function and hydrology. Chapters 8 and 9, Addison-Wesley, Reading, Mass, 425-520.
5. Chiu, C.L., ed. 1978. Applications of Kalman filter to hydrology, hydraulics, and water resources. University of Pittsburgh, 341-352.
6. Chou, C.M., R.Y. Wang. 2004. Application of wavelet-based multi model Kalman filters to real-time flood forecasting. Hydrology Process, 18: 987-1008.
7. Duong, N., C.B. Winn and G.R. Johnson. 1975. Modern control concepts in hydrology, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 5(1): 46-53.
8. Fargé, M., E. Goirand, Y. Meyer, F. Pascal and M.V. Wickerhauser. 1992. Improved predictability of two-dimensional turbulent flows using wavelet packet compression, Fluid Dynamics Research, 104(6): 229-250.
9. Fargé, M., N. Kevlahan, V. Perrier and E. Goir. 1996. Wavelets and turbulence, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 84: 639-669.
10. Grinsted, A., J.C. Moore and S. Jevrejeva. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. Nonlinear Processes in Geophysics, 11: 561-566.
11. Guasti Lima, F. and A. Assaf Neto. 2012. Combining wavelet and kalman filters for financial time series forecasting. Journal of International Finance & Economics, 12(3): 47.
12. Hudgins, L.H., C.A. Friehe and M.E. Mayer. 1993. Wavelet transforms and atmospheric turbulence. Physical. Review. Letters, 71(2): 3279-3283.
13. Kumar, P. and E. Foufoula-Georgiou. 1993. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields, 1, Segregation of large and small-scale features using wavelet transforms. Water Resource Research, 29: 2515-2532.
14. Kumar, P. 1996. Role of coherent structures in the stochastic-dynamic variability of precipitation, Journal of Geophysical Research, (26): 26-393.
15. Labat, D., R. Ababou and A. Mangin. 2000. Wavelet analysis in Karstic hydrology. 2nd Part: Rainfall-runoff cross-wavelet analysis. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science, 329: 881-887.
16. Lee, Y.H. and V.P. Singh. 1999. Tank model using kalman filter, Journal of hydrologic engineering, 4: 344-349.
17. Ming Chou, C. 2007. Efficient nonlinear modeling of rainfall runoff process using wavelet compression, Journal of Hydrology, 332: 442-455.
18. Mizumura, K. 1984. Application of kalman filter to oceanic data, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 110: 334-343.
19. Moradkhani, H. and S. Sorooshian. 2008. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis, in Hydrological Modeling and Water Cycle, Coupling of the Atmospheric and Hydrological Models, Springer, Water Science and Technology Library, 63: 1-23.
20. Nakken, M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. Environmental Modelling and Software, 14: 283-295.
21. Shoaib, A., A.Y. Shamseldin, B.W. Melville and M. Mudasser Muneer Khan. 2016. A comparison between wavelet based static and dynamic neural network approaches for runoff prediction. Journal of hydrology, 535: 211-225.
22. Sun, L., I. Nistor and O. Seidou. 2015. Streamflow data assimilation in SWAT model using Extended Kalman Filter. Journal of hydrology, 531: 671-684.
23. Todini, E. 1978. Mutually interactive state parameter (MISP) estimation. Application of Kalman Filter, Proc., AGU Chapman Conference, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 135-151.
24. Torrence, C. and G.P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society. Bulletin of the American Meteorological Society, 79(1): 61-78.
25. Vrugt, J., H. Gupta and B. Nuallain. 2006. Real time data assimilation for operational ensemble streamflow forecasting. Journal of Hydrometeorol, 7(3): 548-565.
26. Wu, C.M. and W.C. Huang. 1990. Effect of observability in Kalman filtering on rainfall-runoff modeling. Taiwan Water Conservancy Quarterly, Taiwan, 38: 37-47.

Simulation of Rainfall - Runoff Events by Applying Phase Differences Diagrams and Correcting Effective Rainfall Components

Fatemeh Mohammadi¹, Ahmad Fakherifard², Mohammad Ali Ghorbani³,
Yaghob Dinpazhoh³ and Sedaghat Shahmorad⁴

1- PhD Candidate of Water Resources Engr., Water Engr. Dept. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran
(Corresponding Author: 83.mohammadi@gmail.com)

2 and 3- Full Professor and Associate Professor of Water Engr. Dept. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

4- Full Professor of Mathematical Dept. Faculty of Mathematical Sciences. University of Tabriz, Iran

Received: December 24, 2017 Accepted: February 24, 2018

Abstract

The conversion of rainfall to runoff in basins includes nonlinear relations between the complex interactions of various hydrological processes. In this study, without considering of predetermined structure, relationship between input and output system was derived individually from the nature of the data recorded. Also, the phase difference occurred between rainfall and runoff signals using cross-wavelet transform analysis. Then phase difference diagram was plotted for the single and compound events of Lighvan basin. By applying these phases at the time of the rainfall signals, all errors resulting from considering average losses in basin was minimized that in this study was introduced as "minimum error time position" (*METP*). Also, discharge forecasting for basin was carried out by Kalman filter model and optimization in Lighvan basin state space, using calibration step events. By applying this phase difference to effective rainfall components, the error resulting from the considering of average infiltration losses and ϕ index decreases to the minimum. Also, using the linear programming optimization method, the unit hydrograph for Lighvan basin was used as Kalman filter measurement model. The results showed that by applying the phases difference between rainfall and runoff signals and integration with Kalman filtering and linear programming (KF-LP-CW), the corrected Nash-Sutcliffe coefficient were obtained 0.94 in both Calibration and verification steps. These values were obtained 0.63 and 0.68 in calibration and validation steps respectively, as compared to the state that phase difference was not applied (KF-LP method). Therefore, in this study, significant improvement was observed with the application of phase differences in effective precipitation components.

Keywords: Cross-wavelet, Lighvan, Phase difference, Rainfall-runoff, Time