



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

صفحه‌های ۳۹-۵۳

### توسعه مدل موجک متقاطع - فیلتر کالمن خطوط ایزوکرون برای تحلیل وقایع مرکب بارش - رواناب

فاطمه محمدی<sup>۱\*</sup>، احمد فاخری فرد<sup>۲</sup>، محمدعلی قربانی<sup>۳</sup>، یعقوب دین‌پژوه<sup>۴</sup>، صداقت شهراده<sup>۵</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۴. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۵. استاد گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱

#### چکیده

مدل‌سازی هیدرولوژیکی نقشی ارزشمند در مدیریت حوضه آبخیز ایفا می‌کند. در این مطالعه از تلفیق روش‌های برنامه‌ریزی خطی، تبدیل موجک متقاطع و فیلتر کالمن (LP-CW-KF) به‌عنوان یک مدل کنترل‌کننده خطا، جهت تجزیه و تحلیل نه رخداد مرکب (چندقله‌ای) و منفرد بارش و رواناب حوضه آبخیز صوفی‌چای استفاده شد و نتایج با روش‌های هیدروگراف واحد زمان-مساحت اصلاح‌شده و هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مقایسه گردید. عملکرد نهایی روش‌های مذکور با استفاده از معیارهای ارزیابی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد روش زمان-مساحت اصلاح‌شده عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد که ناشی از فرضیات مورد استفاده در ترسیم خطوط ایزوکرون می‌باشد. روش LP-CW-KF بهترین عملکرد را بین روش‌های مورد مطالعه نشان داد به‌طوری‌که رخداد‌های مرکب مورد مطالعه را به‌ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۴۷ و ۳/۲ شبیه‌سازی نمود. به‌طور متوسط در کل وقایع و سه روش مورد مطالعه، میانگین مطلق خطای نسبی به‌ترتیب در زمان تا اوج برابر ۰/۰۶۹، در مورد دبی اوج ۰/۱۳۱ و زمان پایه برابر ۰/۱۲۵ می‌باشد. لذا به‌طور متوسط کلیه روش‌ها در برآورد زمان تا اوج عملکرد مناسب‌تری را از خود نشان دادند.

**کلیدواژه‌ها:** برنامه‌ریزی خطی، زمان-مساحت، صوفی‌چای، مدل کنترل‌کننده خطا.

## مقدمه

مطالعه فرایند بارش- رواناب همواره یکی از موضوعات مهم در مطالعات منابع آب و پیشبرد علم هیدرولوژی بوده و یک اقدام ضروری در توسعه، برنامه ریزی و مدیریت منابع آب به شمار می رود (۱۳). تبدیل بارش به رواناب در حوضه های آبریز شامل روابط پیچیده ای است که به مجموعه ای وسیع از فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط می باشد. همین امر باعث ایجاد عدم قطعیت بالا و ناشناخته ماندن این پدیده پیچیده شده است. برخی ویژگی ها و خواص سیگنال های بارش و رواناب در بعد زمان قابل رؤیت نیستند، از این رو با انتقال به سایر فضاها (همانند سری فوریه، فرکانس، موجک، تبدیل Z، لاپلاس و ...) این خواص، قابل رؤیت و بررسی می شوند (۱). به طور کلی، تبدیل موجک می تواند برای جستجو، حذف نویز<sup>۱</sup> و صاف نمودن<sup>۲</sup> سری زمانی، کمک به پیش بینی و برای سایر تجزیه و تحلیل های تجربی مورد استفاده قرار گیرد (۳). ایده اصلی تبدیل موجک این است که سری زمانی را با استفاده از یک گروه توابع موجی شکل به یک سری از ضرایب تجزیه می کند. این دسته از توابع با استفاده از حرکت دادن یک تابع موجک پایه ای که به آن موجک مادر یا موجک تحلیل گر گفته می شود، به وجود می آیند. به منظور بررسی ارتباط دو متغیر در بعدهای زمان- فرکانس نیاز به استفاده از آنالیز موجک متقاطع می باشد. تبدیل موجک متقاطع برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط هادگینز و همکاران معرفی شد و نخستین بار در تحلیل بارش- رواناب توسط لابات و همکاران مورد استفاده قرار گرفت (۱۰). یک راه برای کاهش میزان عدم قطعیت استفاده از ترکیب داده ها برای به روز رسانی منظم مدل با استفاده از مجموعه داده های موجود می باشد.

تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد فیلتر کالمن در پیش بینی فرایند بارش- رواناب نشان می دهد استفاده از این فیلتر و تلفیق آن با روش های دیگر نظیر تبدیل موجک، می تواند عدم قطعیت مذکور را به طرز چشم گیری کاهش دهد (۱۲ و ۱۷). بنابراین ترکیب موجک متقاطع و فیلتر کالمن می تواند سیگنال های غیر ایستای بارش و رواناب را تحلیل کند (۵، ۶ و ۸).

در مطالعه ای به پیش بینی جریان رودخانه های فاقد آمار در حوضه رودخانه Koel با استفاده از روش هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیکی حوضه GIUH پرداخته شد. نتایج با هیدروگراف واحد مصنوعی SUH استخراج شده توسط روش کمسیون ملی آب مقایسه گردید (۱۶). در مطالعه ای مقایسه مدل شبکه عصبی بر اساس موجک برای مدل سازی بارش- رواناب مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از ۲۳ تابع موجک مادر بر اساس عملکرد هیبرید شبکه عصبی مصنوعی و موجک برای مدل سازی بارش- رواناب استفاده شد. با استفاده از هیبرید شبکه عصبی (MLPNN) و تابع شعاعی (RBFNN) و تبدیل موجک پیوسته و گسسته، مدل سازی انجام گرفت نتایج حاکی از آن بود تبدیل موجک گسسته هیبرید با شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (DWTMLPNN) با سطح تجزیه ۹ بهترین عملکرد را داشته است (۱۵). مدل ترکیبی موجک و هوش مصنوعی (AI) در تجزیه و تحلیل چندتفکیکی، حذف نویز و تشخیص اثر لبه ۳ روی یک سیگنال، و همچنین به عنوان قابلیت قوی روش AI در بهینه سازی و پیش بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی کارآمد بوده و چند ایده نیز برای مطالعات آتی ارائه شده است (۱۴). همچنین استفاده از تبدیل موجک و خوشه بندی به روش SOM به

1. Noise
2. Smoothing

3. Edge effect

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 استفاده شد که این مرحله در کاهش خطای مدل سازی نقش ویژه ای را ایفا نمود. سپس با ارتباط سایر پارامترهای مرتبط با پدیده بارش- رواناب و تلفیق سطوح تجزیه، مدل سازی انجام و پیش بینی بارش- رواناب در حوضه صورت گرفت. با توجه به بررسی و مرور تحقیقات پیشین، در مطالعه حاضر با تجزیه وقایع جریان خروجی از حوضه با استفاده از تبدیل موجک متقاطع و ارتباط آن با سایر پارامترهای مرتبط با پدیده بارش- رواناب و تلفیق این سطوح تجزیه با فیلتر کالمن، به مدل سازی و پیش بینی وقایع بارش- رواناب در حوضه آبخیز صوفی چای پرداخته شد. سپس جهت مقایسه عملکرد روش مذکور، نتایج حاصله با روش های هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی و هیدروگراف واحد اصلاح شده بر پایه معادله منحنی فروکش هیدروگراف مقایسه گردید.

## مواد و روش ها

### تئوری مسئله

### موجک متقاطع

تحلیل موجک متقاطع توسط هادگینز در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. از تبدیل موجک متقاطع برای اولین بار در سال ۲۰۰۰، در فرایند بارش- رواناب استفاده شد (۹). تجزیه و تحلیل طیفی موجک متقاطع در دو سری زمانی  $x(t)$  و  $y(t)$  به صورت زیر تعریف می گردد (۱۰).

$$W_{xy}(s, b) = W_x(s, b) W_y^*(s, b) \quad (1)$$

که در آن:  $W_x(s, b)$  و  $W_y^*(s, b)$  به ترتیب ضریب های تبدیل موجک پیوسته دو سری زمانی  $x(t)$  و  $y(t)$  هستند. همان گونه که قبلاً ذکر گردید  $s$  و  $b$  به ترتیب بیانگر مقیاس و زمان تأخیر سری های زمانی مذکور می باشد و

تعیین مناطق همگن برای مدل سازی مکانی و زمانی بارش- رواناب با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی (FFNN) و تبدیل موجک مورد مطالعه قرار گرفت و مدل ترکیبی حاصله (SOM-WT-FFNN) با شبکه عصبی و مدل خود همبستگی جزئی میانگین متحرک مقایسه گردید (۱۴). مدل تلفیقی تبدیل موجک متقاطع و روش های شبکه های عصبی، به منظور تخمین جریان با تأخیر یک سه روز چند رودخانه غیردائمی واقع در حوضه های آبریز نیمه خشک کشور قبرس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، که روش تلفیقی مذکور یک روش مؤثر در تخمین جریان رودخانه ها در حوضه های مورد مطالعه می باشد (۲). در مطالعه ای از دو روش مبتنی بر آنالیز موجک متقاطع و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به منظور پیش بینی دبی جریان رودخانه بهشت آباد استفاده شد. نتایج نشان داد پیش بینی های مدل WNN در مقایسه با مدل های ANN و CW از دقت بالاتری برخوردار می باشد (۱). در مطالعه (۴) به مدل سازی آبخوان دشت نجف آباد به منظور پیش بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش فیلتر کالمن توسعه داده شده قطعی (DEnKF) پرداخته شد. این فیلتر با و بدون محلی سازی کواریانس با کاربرد سه پارامتر طول- مقیاس اجرا گردید. نتایج نشان داد این مدل حتی با مقادیر غیر دقیق پارامترها توانست عمده تاً در چند مرحله اول پیش بینی را بهبود بخشد. همچنین مقدار بهبود به دلیل محلی سازی بر اساس پارامترهای طول- مقیاس، متغیر بود و هیچ ارتباط آشکاری با دقت پارامترهای مدل نشان نداد.

تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه شبیه سازی فرایند بارش- رواناب با روش های گوناگون انجام شده است. در این مطالعه با رویکرد اصلی تحلیل بر اساس وقایع بارش و رواناب، شامل وقایع منفرد و مرکب در حوضه آبخیز صوفی چای در استان آذربایجان شرقی انجام گرفت.

نماد \* بیانگر شکل مزدوج یک عدد مختلط است. همچنین  $W_{xy}(s, b)$  ضرایب حاصل از تبدیل موجک متقاطع هستند. اختلاف فاز  $\Delta \Phi(b, s)$  بین دو سری  $x(t)$  و  $y(t)$  به ازای یک زمان تأخیر و مقیاس مشخص به صورت ساده شده رابطه (۱۱) توسط تورنس و کاپو در سال ۱۹۹۸ به فرم رابطه (۲) تعریف شده است.

بردار حالت  $X(k)$  در سیستم از طریق سیستم اندازه گیری که ذاتاً دارای خطا می باشد، مشاهده می شود. بنابراین بردار اندازه گیری  $Z(k)$  را می توان به عنوان یک ترکیب خطی از بردار حالت  $X(k)$  و یک بردار خطای اندازه گیری  $v(k)$  توصیف نمود.

$$\Delta \Phi(b, s) = \tan^{-1} \left( \frac{\int_{s_1}^{s_2} \text{Im}[W_{xy}(s, b)] ds}{\int_{s_1}^{s_2} \text{Re}[W_{xy}(s, b)] ds} \right) \quad (2)$$

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

بردار حالت  $Z(k) = H(k).X(k) + v(k)$  (۴) که در این رابطه: بردار اندازه گیری با ابعاد  $(m \times 1)$ ، ماتریس انتقال اندازه گیری با ابعاد  $(m \times n)$  و بردار اندازه گیری خطا با ابعاد  $(m \times 1)$  می باشد. فرض می شود  $w(k)$  و  $v(k)$  از فرایند مستقل گوسین پیروی کنند (۱۱).

که در آن  $\text{Im}[W_{xy}(s, b)]$  و  $\text{Re}[W_{xy}(s, b)]$  به ترتیب بخش های حقیقی و موهومی ضریب  $W_{xy}(s, b)$  می باشند. همچنین  $s_1$  و  $s_2$  حدود انتگرال و به ترتیب نشان دهنده حدود پائین و بالای باند مقیاس بوده و  $s_1 < s_2$  می باشد.

فیلتر کالمن<sup>۱</sup> فیلتر کالمن، فیلتری بازگشتی است که از نقطه نظر کمینه سازی متوسط مربعات خطا بهینه می باشد که در آن از گشتاور اول (میانگین) و گشتاور دوم (کواریانس) توزیع احتمال استفاده می گردد. الگوریتم فیلتر کالمن از سه جزء تشکیل شده است: ۱- مدل سیستم، ۲- مدل اندازه گیری و ۳- فیلتر کالمن (۷).

$$\bar{X}(k|k-1) = \Phi(k|k-1)\bar{X}(k-1|k-1) \quad (5)$$

با دانستن مقدار پیش بینی حالت  $\bar{X}(k|k-1)$  و بردار اندازه گیری  $Z(k)$  در مدل اندازه گیری.

$$\hat{X}(k|k) = \quad (6)$$

$$\bar{X}(k|k-1) + k(k)Z(k) - H(k)\bar{X}(k|k-1)$$

$$k(k) = \quad (7)$$

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

سیستمی که رفتار دینامیکی گسسته دارد را می توان از نظر بردار حالت به صورت زیر تعریف نمود (۱۹):

$$X(k) = \Phi(k|k-1)X(k-1) + \Gamma(k|k-1)w(k-1) \quad (3)$$

که در این رابطه: بردار حالت با ابعاد  $(n \times 1)$ ، ماتریس گذار (انتقال<sup>۲</sup>) حالت با ابعاد

### هیدروگراف واحد زمان - مساحت

ایزوکرون ها خطوطی هستند که تمامی نقاط واقع بر آنها زمان پیمایش یکسانی دارند. این خطوط نمی توانند همدیگر را قطع کنند، هرگز خطوط بسته نخواهند بود و از مرزهای حوضه شروع و با مرزهای حوضه هم خاتمه می یابند (۱۶). خطوط مشخص کننده هر ناحیه،

1. Kalman Filter
2. Transition

$\varphi_{i(N+2)}(t)$ : تغییر حالت از موقعیت  $i$  به  $N+2$  است و به صورت احتمال این که فرایند بارش از موقعیت  $i$  در گام زمانی  $t$  آغاز شود، تعریف می گردد.

$$GIUH = f\{R_A, R_B, R_L, v, L_R\} \quad (14)$$

$$q_p = 1.31 \cdot L_R^{-1} \cdot R_L^{0.43} \cdot v \quad (15)$$

$$t_p = 0.44 \cdot L_R \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{-0.38} \cdot v^{-1} \quad (16)$$

$$IR = q_p \cdot t_p = 0.58 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.55} \cdot R_L^{0.05} \quad (17)$$

که در آن:  $q_p$ : دبی پیک هیدروگراف لحظه ای (1/hr) و  $t_p$ : زمان تا پیک (hr) می باشد.  $L_R$  طول رودخانه با درجه  $\Omega$  (بزرگترین رده آبراهه) و  $v$  میانگین سرعت در مقطع عرض جریان در خروجی در هنگام دبی پیک برای یک گراف سیل مشخص، بر حسب متر بر ثانیه می باشد. در مطالعه حاضر در مرحله آموزش مدل مقدار سرعت کالیبره شده در حوضه در دبی اوج هیدروگراف معادل 1/8 متر در ثانیه محاسبه گردید و برای رخدادهای مرحله صحت سنجی از این سرعت استفاده شد. در جدول (1) به معرفی پارامترهای مورفولوژی مورد استفاده در این روش پرداخته شده است.

#### معیار ارزیابی خطا

در این بخش، تعدادی از معیارهای ارزیابی به شرح جدول (2) معرفی می گردد. O: مقادیر مشاهداتی، M: مقادیر محاسبه شده توسط مدل، N: تعداد داده های واسنجی یا صحت سنجی.

ایزوکرون های با زمان پیمایش  $t = i\Delta t$  را مشخص می کنند و مساحت کل سلول های داخل این ناحیه  $A_i$  خواهد بود. که  $A(i\Delta t)$  مساحت در گام  $i$  ام است و به طور معکوس، رابطه (8) را خواهیم داشت:

$$A(i\Delta t) = \sum_{k=1}^i A_k \quad (8)$$

$$A(i\Delta t) = A_1 + A_2 + \dots + A_{(i-1)} + A_i \quad (9)$$

$$A_i = A[i\Delta t] - A[(i-1)\Delta t] \quad (10)$$

سپس ابعاد هیدروگراف واحد از تقسیم مساحت در هر گام بر فواصل زمانی حاصل می شود.

$$U_i = U[i\Delta t] = A_i/\Delta t \quad (11)$$

اگر بارش مازاد را که در تولید رواناب خروجی حوزه تأثیر دارد  $P_1, P_2, \dots, P_j, \dots$  و رواناب خروجی از حوزه متناظر با آن  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \dots$  باشد، برای هیتوگراف بارش و هیدروگراف واحد حوضه خواهیم داشت:

$$Q_n = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ij} - A_i}{\Delta t}, \quad j = n - i + 1 \quad (12)$$

#### هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی حوضه GIUH

معادله عمومی GIUH برای رودخانه رده N ارائه گردید.

$$\frac{d\theta_{N+2}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N \theta_i(0) \frac{d\varphi_{i(N+2)}(t)}{dt} \quad (13)$$

که در آن:  $\theta_{N+2}(t)$ : احتمال موقعیت، احتمال اینکه یک قطره باران در موقعیت مکانی با درجه  $N+2$  در گام زمانی  $t$  روی دهد.

$\theta_i(0)$ : احتمال موقعیت اولیه، به صورت احتمال اینکه فرایند از موقعیت  $i$  آغاز شود تعریف می شود.

جدول 1. معرفی پارامترهای مورفولوژی حوضه (هورتون 1971)

عنوان	تعریف	رابطه
نسبت انشعاب (RB)	نسبت تعداد رودخانه با رده u-1 به تعداد رودخانه رده u	$R_B = N_{u-1}/N_u$
نسبت طول (RL)	نسبت متوسط طول رودخانه با رده u به متوسط طول رودخانه رده u-1	$R_L = \bar{L}_u/\bar{L}_{u-1}$
نسبت مساحت (RA)	نسبت مساحت رودخانه با رده u به مساحت رودخانه رده u-1	$R_A = \bar{A}_u/\bar{A}_{u-1}$

جدول ۲. معیارهای ارزیابی جهت تحلیل شبیه سازی

معیار ارزیابی	رابطه
جذر میانگین مربع خطا (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M - O)^2}$
ضریب تعیین ( $R^2$ )	$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O - \bar{O})(M - \bar{M})}{\left( \sum_{i=1}^N (O - \bar{O})^2 \right)^{0.5} \left( \sum_{i=1}^N (M - \bar{M})^2 \right)^{0.5}} \right)^2, 0 \leq R^2 \leq 1$
ضریب نابرابری تايل (TIC)	$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (M - O)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum M^2 + \frac{1}{N} \sum O^2}} \quad 0 \leq TIC \leq 1$
فرم اصلاح شده نش- ساتکلیف ( $E_j$ )	$E_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J  O - M }{\sum_{i=1}^J  O - \bar{O} }, J \in N \quad 0 \leq E_j \leq 1$
خطای نسبی (RE)	$RE = \frac{M - O}{O}$
میانگین مطلق خطای نسبی (MARE)	$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n  RE }{n}$

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

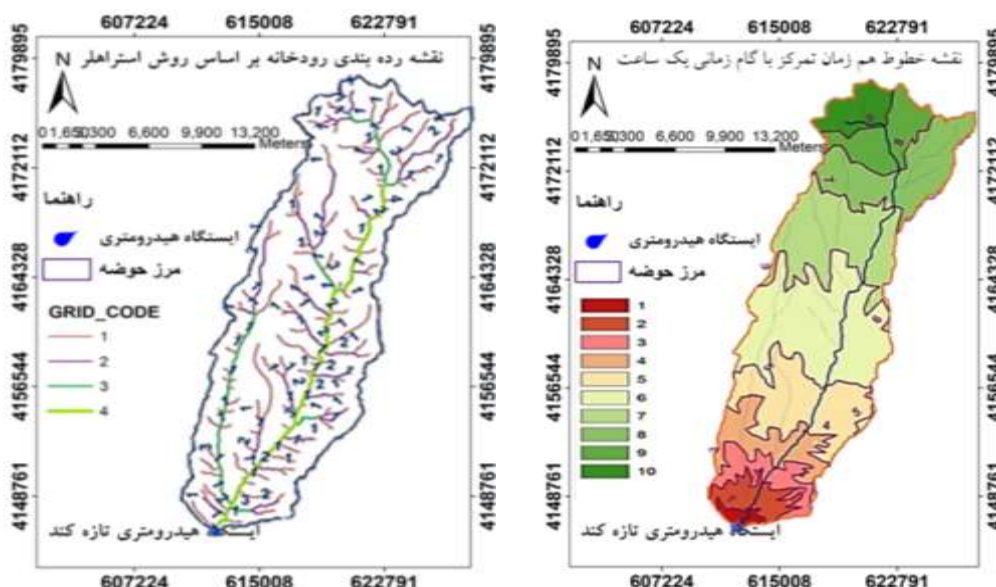
رودخانه صوفی‌چای از رودخانه‌های بزرگ حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. مساحت حوضه آبریز صوفی‌چای در بالادست ایستگاه تازه‌کند ۲۵۰/۶۵ کیلومتر مربع می‌باشد که شامل مناطق کوهستانی و جلگه‌ای می‌شود و در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. این رودخانه در رده چهار رودخانه‌ای از نظر روش استراهلر قرار دارد. طول رودخانه صوفی‌چای حدود ۵۵ کیلومتر است. نزدیک‌ترین ایستگاه‌های آبسنجی و سینوپتیک به حوضه صوفی‌چای به ترتیب ایستگاه‌های تازه‌کند سد علویان و سینوپتیک مراغه می‌باشد. در شکل (۱) موقعیت قرارگیری حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. در این مطالعه از نه رخداد بارش و رواناب در حوضه آبخیز صوفی‌چای جهت مدل‌سازی فرایند استفاده شد. وقایع مورد استفاده پس از بررسی اولیه انتخاب شدند. پس از کسر جریان پایه و محاسبه بارش مؤثر با استفاده از شاخص  $\varphi$ ، به دو مرحله

واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم و جهت مدل‌سازی فرایند آماده شدند. همچنین در این مطالعه پس از تهیه نقشه‌های پایه حوضه آبخیز صوفی‌چای نظیر نقشه‌های DEM، شیب، جهت شیب، جریان تجمعی، رده‌بندی آبراهه، زمان پیمایش تجمعی تا نقطه خروجی حوضه در هر سلول شبکه‌بندی محاسبه گردید. در این نوع مدل‌سازی شبکه‌ای می‌توان تفاوت‌های موجود در سرعت جریان سطحی، سرعت جریان درون آبراهه‌ای و همچنین شیب و کاربری اراضی گوناگون و بارش‌های نقطه‌ای در حوضه را در هر سلول شبکه منظور نمود. بنابراین سرعت جریان در مناطقی که جریان روی سطح داریم از معادلات موج سینماتیکی و در مورد جریان آبراهه‌ای با استفاده از رابطه مانینگ با ضریب زبری متوسط ۰/۰۱۷ بر اساس سعی و خطا برای وقایع مرحله واسنجی در نظر گرفته شد. در شکل (۲) نقشه رده‌بندی آبراهه‌ها و نقشه خطوط ایزوکرون برای حوضه آبخیز صوفی‌چای بالادست ایستگاه تازه‌کند ارائه شده است.

توسعه مدل موجک متقاطع- فیلتر کالمن خطوط ایزوکرون برای تحلیل وقایع مرکب بارش- رواناب



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز صوفی چای



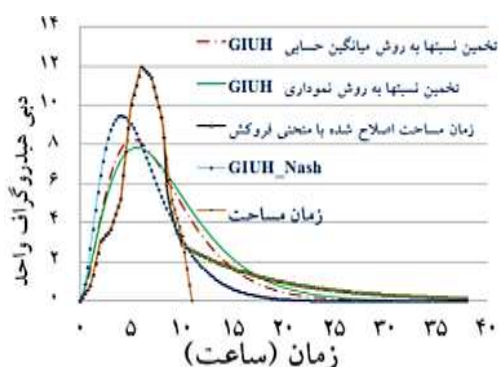
شکل ۲. نقشه رده بندی آبراهه ها و نقشه خطوط ایزوکرون برای حوضه آبخیز صوفی چای بالادست ایستگاه تازه کند

مرحله ۱: جداسازی جریان پایه هیدروگراف سیلاب و کسر متوسط شاخص نفوذ  $\phi$  از بارش کل متوسط اتفاق افتاده در حوضه (بارش متوسط در حوضه با استفاده از میانگین گیری تبسن محاسبه گردید).  
 مرحله ۲: اعمال تبدیل موجک گسسته به منظور حذف نویز موجود در وقایع و انتخاب موجک مناسب جهت تجزیه (شکل ۳)  
 مرحله ۳: اعمال موجک متقاطع جهت تشخیص فاز و تأخیر زمانی بین سیگنال بارش و رواناب

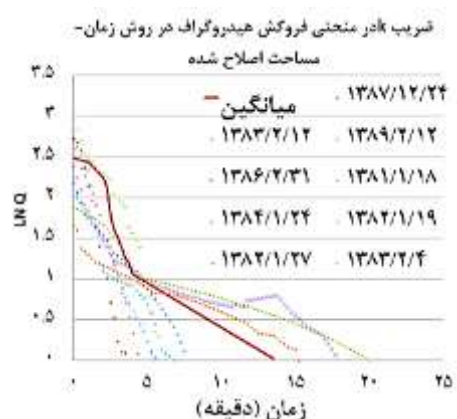
**مدل سازی کنترلی برنامه ریزی خطی - موجک متقاطع - فیلتر کالمن<sup>۱</sup> (LP-CW-KF)**  
 جهت مدل سازی در ابتدای امر پس از جداسازی جریان پایه و کسر متوسط شاخص  $\phi$  از بارش کل، هیتوگراف بارش مازاد اولیه حاصل گردید. از هیدروگراف واحد محاسبه شده به روش برنامه ریزی خطی جهت ادامه فرایند مدل سازی کنترلی فیلتر کالمن- موجک متقاطع به عنوان فضای حالت ورودی سیستم استفاده گردید.

1. Kalman filter-Linear programming- Cross wavelet

هیدروگراف برابر واحد باشد. با استفاده از رابطه نمایی شاخه نزولی هیدروگراف  $Q = Q_0 e^{-kt}$  برای کل وقایع مورد مطالعه، مقدار ضریب  $k$  کالیبره گردید که به عنوان شیب منحنی لگاریتم  $\ln Q$  در تمام وقایع در نظر گرفته شد و سپس از مقادیر حاصله میانگین گرفته شد این مقدار برای نه رخداد مورد مطالعه در حوضه به طور متوسط برابر  $0/118$  در نظر گرفته شد. و از نقطه عطف تا زمان پایه هیدروگراف از رابطه شاخه فروکش استفاده گردید. در شکل های (۳) و (۴) به ترتیب نمودار میانگین شاخه نزولی بعد از نقطه عطف هیدروگراف اصلاح شده زمان مساحت و هیدروگراف های واحد حوضه آبخیز صوفی چای به روش زمان-مساحت و زمان-مساحت اصلاح شده ارائه شده است.



شکل ۳. هیدروگراف واحد در روش های مورد مطالعه



شکل ۴. مقدار متوسط ضریب  $K$  در شاخه فروکش

مرحله ۴: اعمال تأخیرهای زمانی محاسبه شده جهت انتقال مؤلفه های بارش مؤثر  
 مرحله ۵: اعمال معکوس انتگرال پیچش و محاسبه هیدروگراف واحد هر رویداد با استفاده از روش برنامه ریزی خطی  
 مرحله ۶: ورود هیدروگراف واحد محاسبه شده به عنوان فضای حالت و اعمال فیلتر کالمن  
 مرحله ۷: محاسبه هیدروگراف سیلاب و ارزیابی معیارهای خطا.

### مدل سازی هیدروگراف واحد زمان مساحت و زمان مساحت اصلاح شده

با توجه به در نظر گرفتن مقادیر به دست آمده از روابط تجربی مختلف جهت محاسبه زمان تمرکز حوضه متوسط ۱۰ ساعت برای حوضه آبخیز صوفی چای (بالادست ایستگاه هیدرومتری تازه کند) در نظر گرفته شد. در روش زمان مساحت در شاخه فروکش هیدروگراف یک نزول با شیب تند مشاهده می شود. حال آن که خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه به گونه ای است که جریان با یک شیب ملایم تخلیه می گردد. بنابراین هیدروگراف واحد زمان-مساحت تنها تا زمان تمرکز حوضه می تواند مورد استفاده قرار گیرد و از نقطه عطف هیدروگراف واحد باید اصلاح گردد. لذا این تصحیح با استفاده از معادله شاخه خشکیدگی ۱ (فروکش) هیدروگراف واحد اعمال گردید. معادله مختلفی برای شاخه خشکیدگی هیدروگراف ارائه شده است. در این مطالعه با توجه به در نظر گرفتن نه رخداد مرکب (چندقله ای) و منفرد (تک قلّه ای) ضرایب معادله شاخه فروکش هیدروگراف واحد بعد از زمان عطف هیدروگراف با توجه به بهینه سازی با استفاده از برنامه ریزی خطی به گونه ای انجام گرفت که در نهایت سطح زیر منحنی

#### 1. Depletion curve

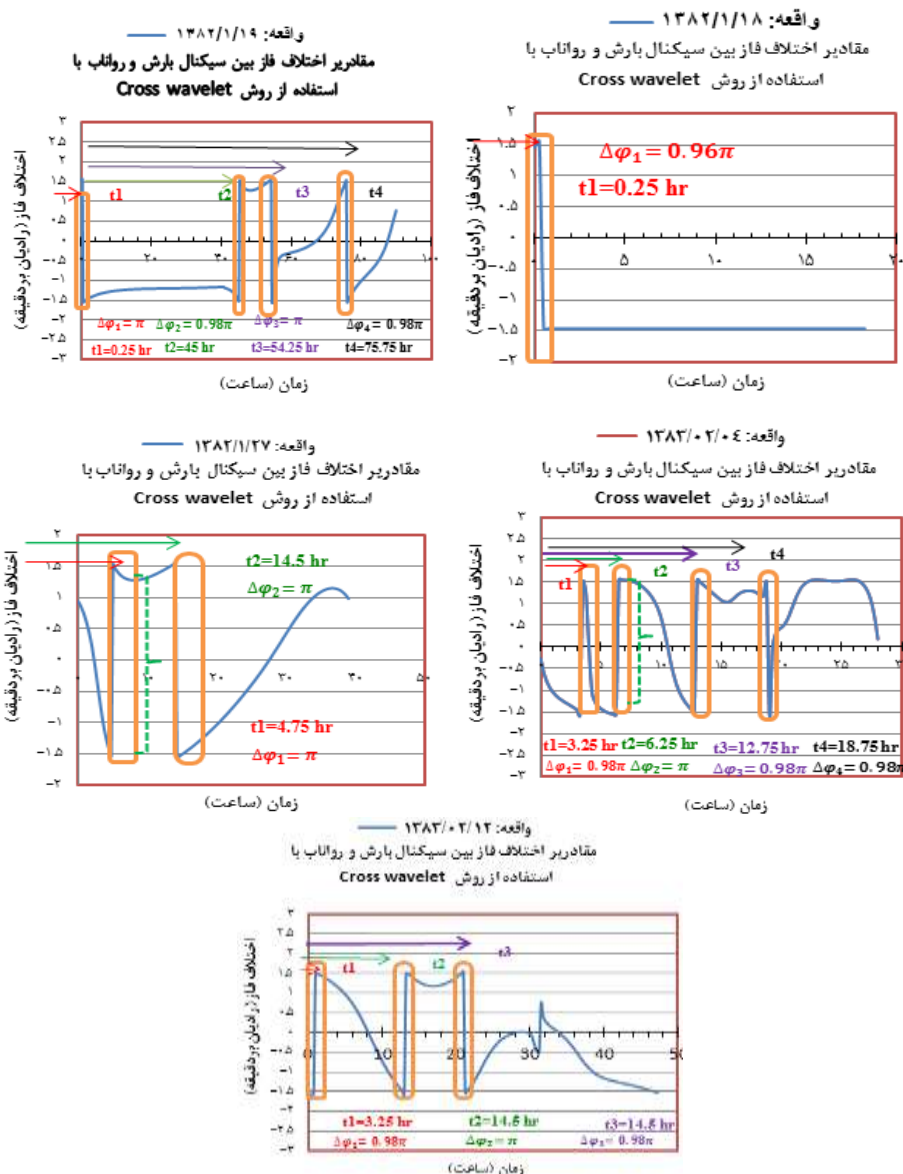


## نتایج و بحث

### تعیین فاز سیستم در وقایع بارش- رواناب مورد مطالعه

در این مرحله از مدل سازی، برای تشخیص واکنش حوضه در ایجاد تأخیر پالس های بارش و ایجاد رواناب، از روش موجک متقاطع استفاده شد. فازهای ایجاد شده در مقیاس های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و منحنی های تغییر فاز در بهترین مقیاس ارائه شد. نتایج این تحلیل در

شکل (۵) برای مرحله واسنجی ارائه شده است. نتیجه جالبی که از بررسی چشمی منحنی های تغییر فاز دیده می شود، واکنش تقریباً مشابه حوضه در مواجهه شدن با این وقایع می باشد. با توجه به این امر با استفاده از پنج منحنی فاز به دست آمده در مرحله واسنجی، منحنی فاز برای ۴ رخداد مرحله صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفت.



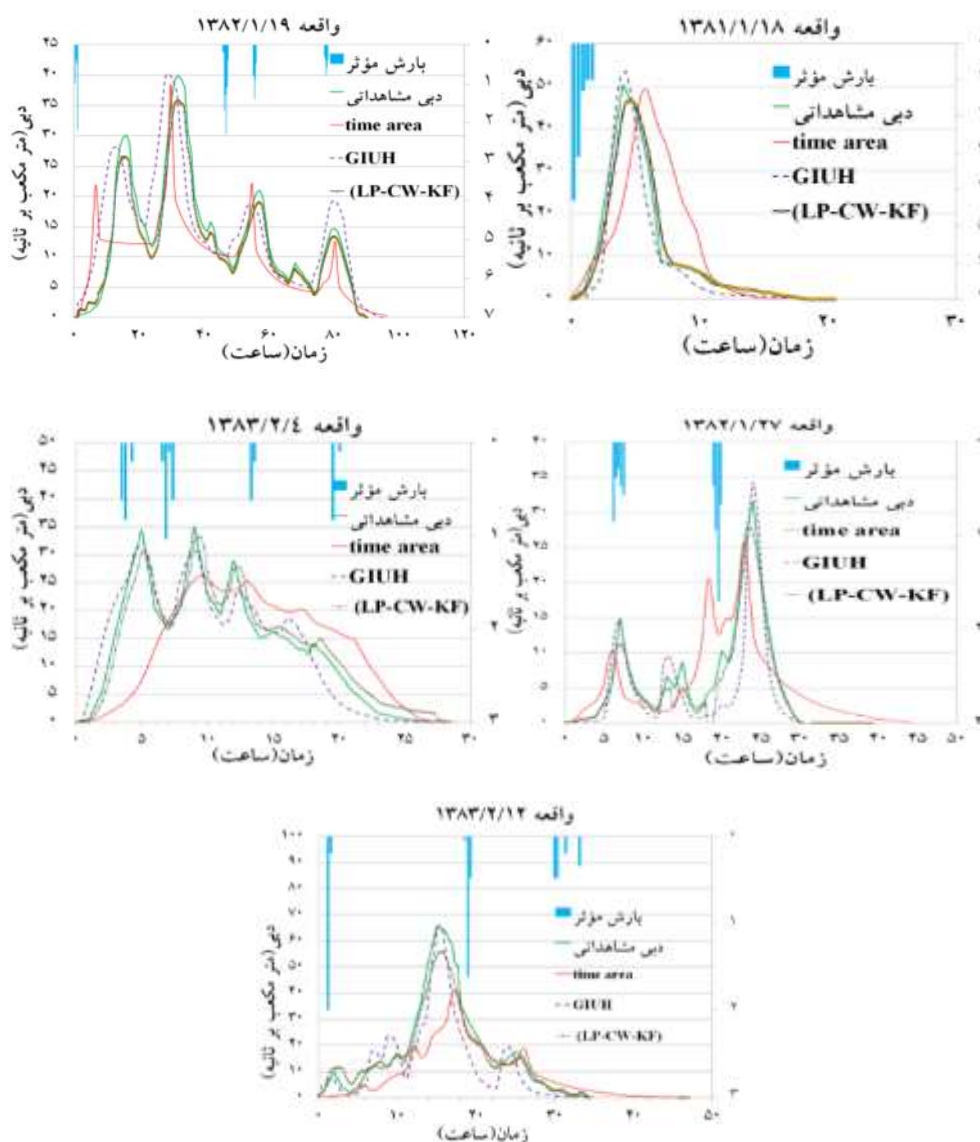
شکل ۵. منحنی های اختلاف فاز برای رخدادهای مرحله واسنجی

## مدیریت آب و آبیاری

## نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل کنترلی بارش- رواناب روش‌های مورد مطالعه

با توجه به کاربرد سه روش مذکور در شبیه‌سازی مدل کنترلی بارش- رواناب در حوضه آبخیز صوفی چای، نتایج در شکل‌های (۶) و (۷) و جدول (۳) ارائه شده است. سپس با استفاده از چهار معیار ارزیابی، کارائی روش‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد در صورتی‌که از منظر معیار ارزیابی مجذور

میانگین مربع خطاها ارزیابی را مورد توجه قرار دهیم، روش (KF- LP\_CW) نسبت به دو روش دیگر در دو مرحله واسنجی (۲/۴۴) و صحت‌سنجی (۲/۳۳) از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج مربوط به ضریب تعیین R2 عملکرد بهتر این روش را تأیید می‌کند. به طوری‌که مقادیر متوسط برای این معیار در روش مذکور در مرحله واسنجی ۰/۹۸ و در مرحله صحت‌سنجی به طور متوسط برابر ۰/۹۳ است.

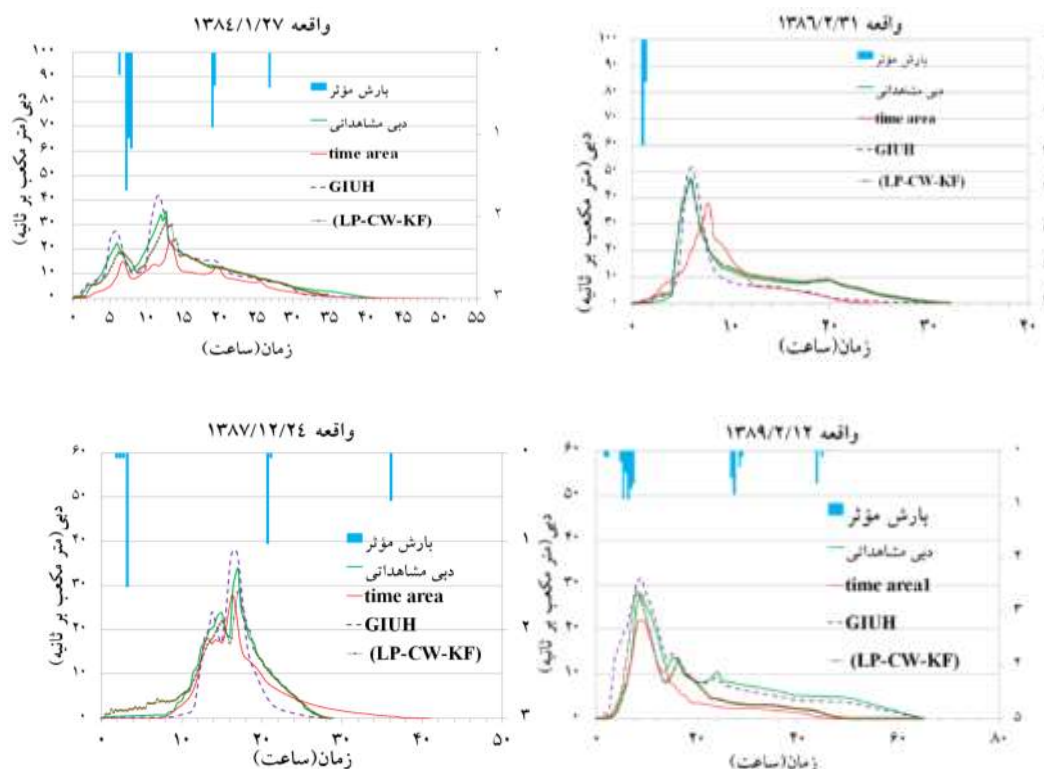


شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی روش‌های مورد مطالعه در واقعه مرحله واسنجی

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

توسعه مدل موجک متقاطع- فیلتر کالمن خطوط ایزوکرون برای تحلیل وقایع مرکب بارش- رواناب



شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی روش‌های مورد مطالعه در واقعه مرحله صحت سنجی

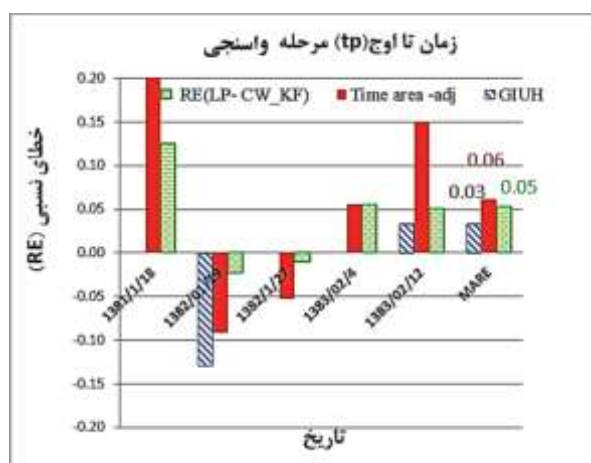
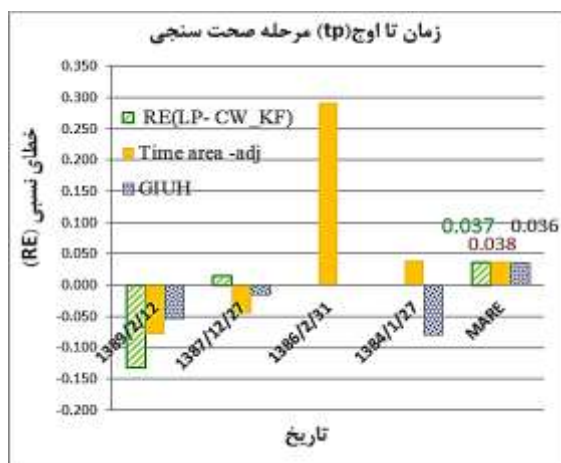
جدول ۳. نتایج کاربرد معیارهای ارزیابی مورد مطالعه در وقایع انتخابی مراحل واسنجی و صحت سنجی

صحت‌سنجی		واسنجی		وقایع مرکب انتخابی مرحله ...						
۱۳۸۹/۰۲/۱۲	۱۳۸۷/۱۲/۲۴	۱۳۸۰/۰۲/۳۱	۱۳۸۴/۱۰/۲۱	۱۳۸۲/۰۲/۱۲	۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۱۳۸۲/۱۰/۲۷	۱۳۸۲/۱۰/۱۹	۱۳۸۱/۱۰/۱۷	روش	رخداد معیار ارزیابی
۳/۵	۵/۹	۱/۰۹	۲/۴۵	۴/۲۲	۲/۱۶	۱/۴۸	۱/۹۶	۲/۵۱	(LP-CW-KF)	مجذور میانگین مربع
۴/۹۸	۳/۴۵	۷/۹۲	۵/۲۲	۱۲/۳۱	۸/۲۱	۴/۹	۷/۴۲	۱۲/۷	(Time area-adj)	خطا (RMSE)
۳/۴۷	۴/۹۲	۳/۹۴	۲/۸	۷/۸۸	۳/۸۱	۳/۸۳	۶/۲۵	۴/۹	(GIUH)	
۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۷	(LP-CW-KF)	ضریب تعیین ( $R^2$ )
۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۴۳	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۳۷	۰/۴	۰/۴۷	۰/۴	(Time area-adj)	
۰/۸	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹	۰/۸۶	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۹۲	(GIUH)	
۰/۴	۰/۵	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۴	(LP-CW-KF)	ضریب نابرابری
۰/۶۲	۰/۳۳	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۷۸	۰/۴۹	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۷۹	(Time area-adj)	تایل (TIC)
۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۴۱	۰/۳۶	۰/۲۷	(GIUH)	
۰/۶۶	۰/۷۵	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	(LP-CW-KF)	ضریب نش ساتکلیف
۰/۴۹	۰/۸۵	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۷۵	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۳	(Time area-adj)	اصلاح‌شده ( $E_j$ )
۰/۶۶	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۹۵	۰/۷	۰/۵۶	۰/۸۹	(GIUH)	

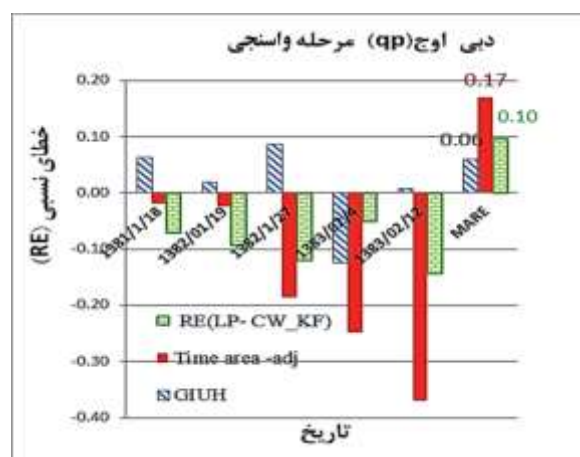
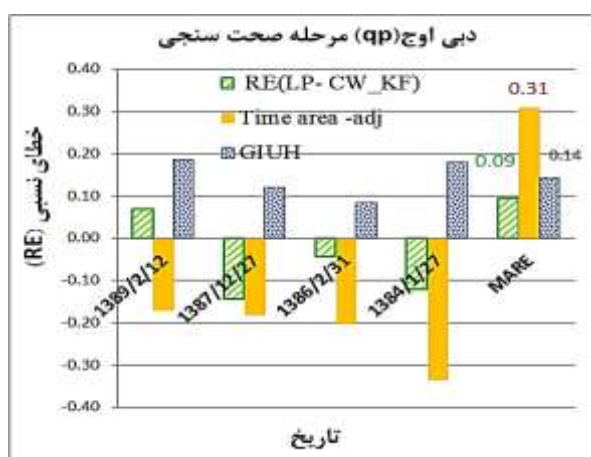
ارائه شده است. در مورد زمان تا اوج به طور متوسط میانگین مطلق خطای نسبی در کل رخدادهای (MARE) و سه روش مورد مطالعه؛ در مرحله واسنجی و صحت سنجی به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۶۲ است و همین معیار برای دبی تا اوج و زمان پایه در دو مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۱۲ و صحت سنجی ۰/۱۵ و ۰/۱۳ می باشد. همچنین از تحلیل نتایج می توان به دقت بیشتر روش های مذکور در برآورد زمان تا اوج و زمان پایه اشاره کرد. درحالی که در برآورد دبی تا اوج دقت کمتری وجود دارد.

در مورد معیار E<sub>j</sub> که از لحاظ مفهومی شبیه به ضریب تعیین است با متوسط ۰/۷۴ و ۰/۷۳ به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت سنجی مؤید عملکرد بهتر روش مذکور نسبت به دو روش دیگر می باشد. تحلیل ضریب نابرابری تایید نیز با مقادیر متوسط ۰/۱۴ و ۰/۲۹ به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت سنجی، نشان دهنده عملکرد بهتر این روش نسبت به دو روش دیگر می باشد.

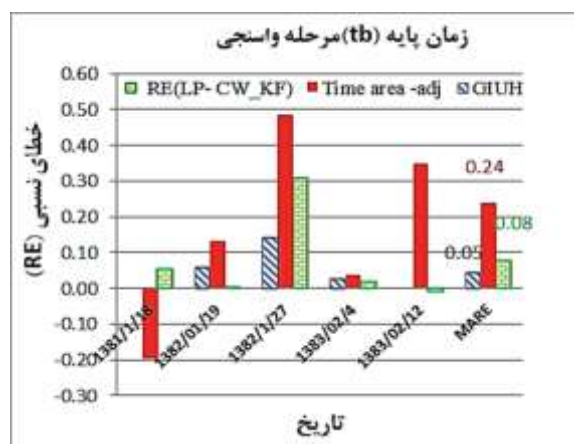
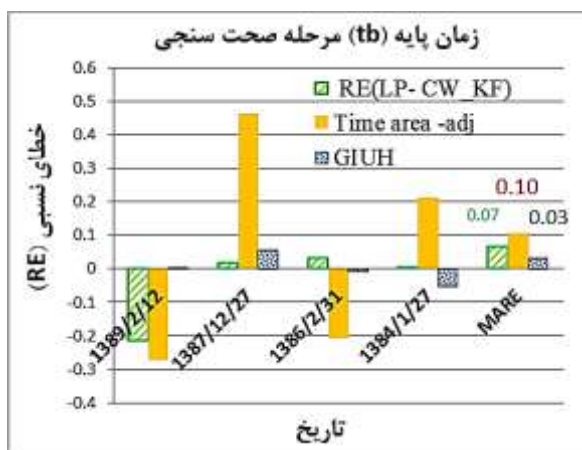
در مورد زمان پایه زمان تا اوج و دبی در نمودارهای (۸) تا (۱۰) به وضوح عملکرد روش های مختلف در دو مرحله واسنجی و صحت سنجی



شکل ۸. خطای نسبی هر رویداد و MARE زمان اوج در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش های مورد مطالعه



شکل ۹. خطای نسبی هر رویداد و MARE دبی اوج در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش های مورد مطالعه



شکل ۱۰. خطای نسبی هر رویداد و MARE زمان پایه در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش های مورد مطالعه

می شود. لازم به ذکر است تحلیل حساسیت در پارامترهای مدل فیلتر کالمن و موجک متقاطع و نیز مقادیر دبی اوج، زمان اوج و زمان پایه به عنوان پیشنهاد در مطالعات آتی انجام پذیرد.

#### منابع

۱. عبداللهی س. (۱۳۹۰). تخمین دبی جریان روزانه رودخانه کارون با استفاده از آنالیز موجک متقاطع. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

- Adamowski J and Sun K (2010). Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of no perennial rivers in semiarid watersheds. *Hydrology*. 390: 85-91.
- Antonios A and Constantine E.V (2003). Wavelet Exploratory Analysis of the FTSE ALL SHARE Index. *Economics Letters University of Durham UK*.
- Bateni M., Eslamian, S. S., Mousavi, S. F. and Hosseinipour E.Z. (2012). Application of a Localization Scheme in Estimating Groundwater Level using Deterministic Ensemble Kalman Filter, EWRI/ASCE 10th Symposium on Groundwater Hydrology, Quality and Management, USA.
- Cheng H and Sun Z (1996). Application of wavelet packets theory in maneuver target tracking. *National Aerospace and Electronics Conference*. 1: 157-162.

در صورتی که نتایج برآورد حاصله در کل ۹ رخداد را مد نظر قرار دهیم، به طور متوسط در کل وقایع و سه روش مورد مطالعه میانگین مطلق خطای نسبی در کل رخدادهای (MARE) به ترتیب در زمان تا اوج برابر ۰/۰۶۹، در مورد دبی اوج ۰/۱۳۱ و زمان پایه برابر ۰/۱۲۵ می باشد. این امر بیانگر عملکرد مناسب تر روش ها به ترتیب در برآورد زمان تا اوج، زمان پایه و دبی اوج می باشد.

#### جمع بندی و نتیجه گیری

در کل می توان اذعان داشت با توجه با فرایند بازگشتی فیلتر کالمن، دقت بالای روش موجک متقاطع جهت تفکیک فاز و ایجاد تأخیرهای زمانی و استفاده از روش بهینه سازی برنامه ریزی خطی، نشان دهنده یک کنترل مقاوم سیستم می باشد. که نتایج رضایت بخشی را به دنبال داشته است. از مهمترین مزایای این سیستم کنترلی می توان به قابلیت تعمیم این سیستم برای سایر وقایع بارش- رواناب در حوضه آبخیز مورد مطالعه و حوضه های مشابه اشاره نمود. همچنین نشان داده شد که در صورت در نظر گرفتن جهت صحیح حرکت جریان و تعیین موقعیت خطوط هم پیمایش از بالادست حوضه به پایین دست، نزدیک ترین هیدروگراف به راه حل تحلیلی موج سینماتیک حاصل

6. Chou C.M and Wang R.Y (2004). Application of wavelet-based multi model Kalman filters to real-time flood forecasting. Hydrology process. 18: 987-1008.
7. Guasti Lima F and Assaf Neto A (2012). Combining wavelet and kalman filters for financial time series forecasting, International Finance and Economics. 12: 47.
8. Hong L., Chen G and Chui C.K (1998). A filter-bank-based Kalman filtering technique for wavelet estimation and decomposition of random signals. Analog Digit Signal Processing, 45(2): 237-241.
9. Jury M.R., Enfield D.B and Melice J.L (2002). Tropical monsoons around Africa: stability of El Nino-southern oscillation associations and links with continental climate. Geophysical Research. 107: 10-29.
10. Labat D., Ababou R and Mangin A (2000). Wavelet analysis in karstic hydrology. 2nd Part: Rainfall-runoff cross-wavelet analysis. Earth and Planetary Science. 329: 881-887.
11. Lee Y. H. and Singh V. P(1999). Tank model using kalman filter, hydrologic engineering. 4: 344-349.
12. Moradkhani H and Sorooshian S (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. Water Science and Technology Libra ry. 63: 1-23.
13. Nayak P.C., Venkatesh B., Krishna B and Jain Sharad K (2013). Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. Hydrology. 493: 57-67.
14. Nourani V, Hosseini Baghanam A, Adamowski J and Gebremichael M (2013). Using self-organizing maps and wavelet transforms for space-time pre-processing of satellite precipitation and runoff data in neural network based rainfall-runoff modeling. Hydrology. 476: 228-243.
15. Shoaib M Y., Shamseldin A and Melville B (2014). Comparative study of different wavelet based neural network models for rainfall-runoff modeling. Hydrology. 515: 47-58.
16. Singh V. P., Corradini C and Melone F (1985). Comparison of some methods of deriving the instantaneous unit hydrograph, Nordic hydrology. 16(1): 1-10.
17. Todini E (1978). Mutually interactive state parameter (MISP) estimation. Application of Kalman Filter. Chapman Conference. University of Pittsburgh, Pittsburgh. 15: 135-151.



## Water and Irrigation Management

(Scientific Journal of Agriculture)  
(College of Abouraihan – University of Tehran)

Vol. 8 ■ No. 1 ■ Spring & Summer 2018

### Development of Cross wavelet- kalman filter Isochrones lines model to analyze compound rainfall-runoff events

Fatemeh Mohammadi<sup>1\*</sup>, Ahmad Fakherifard<sup>2</sup>, Mohammad Ali Ghorbani<sup>3</sup>, Yaghoob Dinpashoh<sup>4</sup>,  
Sedaghat Shahmorad<sup>5</sup>

1. Graduate Ph.D. Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Full Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
5. Full Professor, Department of Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Received: January 11, 2018

Accepted: May 29, 2018

#### Abstract

Hydrological modeling plays a valuable role in watershed management. In order to advance this important, in this study, a combination of linear programming, cross-wavelet transform and Kalman filter as a control model for the analysis of nine compound rainfall and runoff events were used in Sufi Chay Basin. The results were compared with modified time area unit hydrograph, and geomorphologic unit hydrograph. Finally, using the evaluation criteria used in the research, the final performance of these methods was investigated and analyzed. It was revealed that the modified time area method has a relatively weaker performance than the other two methods, which is due to the assumptions used in drawing the isochrones lines. The LP-CW-KF method showed the best performance among the studied methods, which simulated the compound events in the calibration and validation stage with a mean squared error of 2.47 and 2.7, respectively. On average, in all the events and the three studied methods, the mean absolute relative error (MARE) was 0.069 in the time to peak, 0.131 in the peak discharge and 0.125 in the base time. Therefore, on average, all methods showed a better performance in estimating time to peak.

**Keywords:** Error control model, linear programming, Sufi Chay, Time-area.