

کاربرد روش‌های موجک متقاطع - فیلتر کالمن و GIUH در مدل‌سازی وقایع بارش - رواناب

فاطمه محمدی^{۱*}، احمد فاخری فرد^۲، محمد علی قربانی^۳، یعقوب دین پژوه^۴، صداقت شهرماد^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶

چکیده

وجود عدم قطعیت بالا و غیرخطی بودن روابط بارش و رواناب، جای خالی بسیاری از مطالعات در این راستا را همچنان مشهود می‌سازد. مطالعه حاضر نیز با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار حوضه بر اساس شناخت بخشی از روابط حاکم بر این سیستم پیچیده انجام می‌گیرد. در این مطالعه روش‌های تبدیل موجک متقاطع، فیلتر کالمن و برنامه‌ریزی خطی (KF-LP-CW) جهت تجزیه و تحلیل ۹ رخداد مرکب بارش و رواناب حوضه آبخیز صوفی چای با مساحت ۲۵۰/۶۵ کیلومتر مربع استفاده شد. سپس جهت مقایسه عملکرد روش مذکور نتایج حاصله با روش‌های هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی و هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی بر پایه مدل نش مقایسه گردید. با توجه به عملکرد رضایت‌بخش هر سه مدل، در نهایت با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد استفاده در تحقیق، عملکرد نهایی روش‌های مذکور، مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد روش KF-LP-CW رخدادهای مرکب مورد مطالعه را به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۴۷ و ۳/۲ شبیه‌سازی نمود. در مورد زمان تا اوج به طور متوسط میانگین مطلق خطای نسبی در کل رخدادهای (MARE) در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در ۳ روش مورد مطالعه ۰/۰۵ و ۰/۰۳۷ است و همین معیار برای دبی اوج و زمان پایه در دو مرحله واسنجی (به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۶) و صحت‌سنجی (۰/۱۸ و ۰/۰۷) می‌باشد. که این امر بیانگر عملکرد مناسب‌تر روش‌ها به ترتیب در برآورد زمان تا اوج، زمان پایه و دبی اوج می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رخداد مرکب، موجک متقاطع، فیلتر کالمن، GIUH، Nash

مقدمه

عدم قطعیت به‌عنوان چالش اساسی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی به ویژه فرایند بارش - رواناب به شمار می‌رود و ارایه راهکار جهت مدل‌سازی دقیق و کاهش عدم قطعیت از ضروریات مطالعات هیدرولوژیکی است. مدل‌های هیدرولوژیکی ساده شده‌ای از سیستم هیدرولوژیکی واقعی هستند که به مطالعه کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرایندهای هیدرولوژیکی می‌پردازند و به دسته‌های مختلفی اعم از مدل‌های ریاضی و تجربی در برابر مدل‌های فیزیکی، مدل‌های پیوسته در برابر مدل‌های رویدادگرا یا گسسته و مدل‌های یکپارچه در مقابل مدل‌های پارامتر

توزیعی و نیمه توزیعی طبقه بندی می‌شوند (et al., 2001).
Jothityangkoon).

مطالعه فرایند بارش - رواناب همواره یکی از موضوعات مهم در هیدرولوژی بوده و یک اقدام ضروری در توسعه، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به شمار می‌رود (Nayak et al., 2013). فیلتر کالمن یک سیستم دینامیکی خطی است که رفتار یک فرایند طبیعی مشاهده شده را تقلید می‌کند. فیلتر کالمن این عمل را توسط برآورد بهینه وضعیت فعلی از فرایند مشاهده شده در هر لحظه انجام می‌دهد. هنگامی که خروجی بعدی رخ می‌دهد، فیلتر تفاوت بین پیش‌بینی و خروجی واقعی را محاسبه نموده و از این باقیمانده‌ها برای تنظیم (یا به‌روزرسانی) برآورد خود از این حالت استفاده می‌کند. برآورد جدید اصلاح شده سپس حالت یا وضعیت بعدی را می‌توان پیش‌بینی نمود. در نتیجه یک تکرار کامل از فیلتر تکمیل می‌شود.

(Chu and Wong., 2004). امروزه، ترکیب داده‌های متوالی یک جز کلیدی در سیستم‌های پیش‌بینی هیدرولوژیکی است، که برای مدل کردن فرایند غیرخطی بارش - رواناب متغیر با زمان استفاده می‌شود. لذا از آنجا که ایده اصلی تبدیل موجک تجزیه

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز
 - ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۵- استاد گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز
- (*) - نویسنده مسئول: Email: 83.mohammadi@gmail.com

جهت مدل‌سازی و از روش‌های هوشمند نظیر شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی استفاده شده است. از آنجا که 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^۳ برای اولین بار در تحلیل بارش-رواناب توسط لابات (Labat., 2000) مورد استفاده قرار گرفت.

لیو و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی و ارزیابی خطاهای زمانی مدل در تخمین‌های هیدرولوژیکی و همچنین ارزیابی یک روش جدید بر مبنای موجک متقاطع پرداختند. نتایج نشان داد که روش مبتنی بر موجک متقاطع می‌تواند خطاهای زمانی را در پیش‌بینی‌های جریان سیلابی با قابلیت خوبی پیش‌بینی کند (Liu et al., 2011). این امر در مطالعات تورنس و کامپو (Torrnce and Campo., 1998) نیز مورد توجه قرار گرفته است.

عبداللهی و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای از دو روش مبتنی بر آنالیز موجک متقاطع و شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی دبی جریان رودخانه بهشت‌آباد استفاده نمودند. نتایج نشان داد ترکیب روش‌های شبکه عصبی و موجک در مقایسه با مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و موجک متقاطع از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. از آنجا که تاکنون مطالعات محدودی در زمینه کاربرد موجک متقاطع در مدل‌سازی هیدرولوژیکی انجام گرفته است و در اکثر مطالعات انجام گرفته، به منظور پیش‌بینی از روش‌های هوشمند استفاده شده است که در اکثر موارد نتایج رضایت‌بخشی از تلفیق این روش‌ها حاصل شده است. لذا در این مطالعه به منظور اعمال اختلاف فازهای اتفاق افتاده (تاخیرهای ایجاد شده بین متغیرهای بارش و رواناب) از روش موجک متقاطع و جهت پیش‌بینی و مشخص نمودن فضای حالت حاکم بر سیستم حوضه از روش فیلتر کالمن استفاده شده است. بر اساس مطالعه چو و وانگ (Chu and Wong, 2004) ترکیب موجک و فیلتر کالمن می‌تواند سیگنال‌های غیر ایستای بارش و رواناب را تحلیل کند. بنابراین برای نخستین بار در مطالعات مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب از تلفیق روش موجک متقاطع و فیلتر کالمن استفاده گردید. سپس جهت مقایسه عملکرد این روش توسعه داده شده، از مدل‌های مفهومی فیزیکی بر مبنای خصوصیات فیزیوگرافی حوضه که قبلاً عملکرد آن‌ها در مطالعات پیشین به اثبات رسیده است، استفاده شد. که در ادامه به برخی از این مطالعات و نتایج حاصله اشاره شده است.

اسواین در مطالعه‌ای به پیش‌بینی جریان رودخانه‌های فاقد آمار در حوضه رودخانه Koel با استفاده از روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی حوضه (GIUH) پرداختند و نتایج را با هیدروگراف

سری زمانی با استفاده از یک گروه توابع موجی شکل به یک سری ضرایب است بنابراین ترکیب خروجی‌ها در سطوح مختلف تجزیه شده، در قلمرو زمان و فرکانس جهت مدل‌سازی بسیار ارزشمند است. این سری‌های تجزیه شده قابلیت تلفیق با روش‌های مختلف با هدف مدل‌سازی را دارا هستند. برای مثال کارایی این سطوح تجزیه به عنوان ورودی در روش‌های هوشمند نظیر شبکه عصبی مصنوعی، جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی در بسیاری از مطالعات بررسی و تایید شده است که در ادامه به مواردی از آن اشاره خواهد شد. توابع موجک با استفاده از حرکت دادن یک تابع موجک پایه‌ای که به آن موجک مادر^۱ یا موجک تحلیل‌گر گفته می‌شود، به وجود می‌آیند و خواص ریاضی همچون متعامد بودن و انرژی واحد را دارا هستند. موجک‌ها در حال تبدیل شدن به یک ابزار به طور فزاینده مهم برای پردازش تصویر و سیگنال می‌باشند. موجک‌ها به طور موثر زمان و فرکانس را مانند اطلاعات سیگنال‌های متغیر با زمان استخراج می‌کنند (Hong et al., 1998).

نایاک و همکاران به مدل‌سازی بارش-رواناب و جریان رودخانه جهت توسعه مدل بارش رواناب برای حوضه مالاپرابها^۲ در هند، با استفاده از مدل مفهومی NAM و روش موجک در مدل‌سازی بارش رواناب پرداختند. داده‌های روزانه بارش، دبی و تبخیر به مدت ۲۱ سال (۱۳۵۸-۱۳۷۸) برای مدل‌سازی استفاده گردید. در مدل‌سازی اصلی، ورودی توسط موجک تجزیه شده و زیر مجموعه تجزیه به عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شدند. پارامترهای مدل با استفاده از ۱۷ سال از داده‌ها کالیبره شدند و سایر داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت نتایج نشان داد که تلفیق روش موجک و شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری را نسبت به مدل مفهومی NAM در تخمین خصوصیات هیدروگراف از جمله زمان پایه، دارا است (Nayak et al., 2013).

شعیب به بررسی مقایسه‌ای مدل شبکه عصبی بر اساس موجک برای مدل‌سازی بارش-رواناب پرداخت. در این مطالعه از ۲۳ تابع موجک بر اساس عملکرد هیبرید شبکه عصبی مصنوعی و موجک برای مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود از بین تمامی انواع مدل‌های توسعه داده شده، تبدیل موجک گسسته هیبرید با شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، با سطح تجزیه ۹ بهترین عملکرد را داشت. همچنین نتایج نشان داد که پیش‌پردازش داده‌های ورودی بارش با تبدیل موجک به طور قابل توجهی می‌تواند باعث افزایش عملکرد مدل‌سازی شود (Shoab., 2014).

با توجه به بررسی انجام گرفته در سایر مطالعات، از تبدیل موجک برای تجزیه متغیرها و تفکیک در دامنه فرکانس و زمان متغیرها،

1- Mother wavelet
2- Malaprabha

3- Cross-wavelet transform

پیشین انجام گرفت و با توجه به جایگاه استفاده از روش‌های مورد مطالعه در این مطالعات، مدل تلفیقی موجک متقاطع و فیلتر کالمن توسعه داده شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین 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 پیش‌بینی وقایع بارش - رواناب در حوضه آبخیز صوفی چای پرداخته شد. سپس به خاطر اهمیت کاربرد روش هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی در حوضه‌های فاقد آمار و سهولت استفاده از این روش، همچنین به دلیل وابستگی فضای حالت در روش فیلتر کالمن به خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه، جهت مقایسه عملکرد روش مذکور نتایج حاصله با روش‌های هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی و هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی بر پایه مدل نش مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز صوفی چای با مساحت ۲۵۰/۶۵ کیلومتر مربع حوضه آبریز صوفی چای در مختصات جغرافیایی $37^{\circ}15'2''$ تا $37^{\circ}15'3''$ عرض شمالی و $45^{\circ}56'30''$ تا $46^{\circ}25'5''$ طول شرقی و در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. این رودخانه در رده ۴ رودخانه‌ای از نظر روش استراهلر قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت قرارگیری حوضه مورد مطالعه به همراه نقشه رقوم ارتفاعی (DEM) نشان داده شده است. همچنین موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و باران سنجی، در شکل (۲-الف) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبخیز صوفی چای

حوضه آبخیز صوفی چای	پارامتر
۲۵۰/۶۵	مساحت (کیلومتر مربع)
۹۱/۱۳	محیط (کیلومتر)
۱۶/۶۹	شیب (درصد)
۳۴۰۸	ارتفاع حداکثر (متر)
۱۵۸۲	ارتفاع حداقل (متر)
۲۴۲۸/۵	ارتفاع متوسط (متر)
۱۷/۷۹	طول حوضه آبخیز (کیلومتر)
۵۹۱/۹	طول آبراهه ها (کیلومتر)
۳۹/۹۸	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
۳/۴۷	شیب متوسط آبراهه اصلی (درصد)

جهت کاربرد روش هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی نقشه رده-

واحد مصنوعی استخراج شده توسط روش کمیون ملی آب مقایسه نمودند. نتایج نشان داد از هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی حاصله می‌توان به‌عنوان تابع انتقال برای مدل‌سازی فرآیند بارش باران - رواناب استفاده کرد. در این مطالعه سرعت ماکزیمم برای حوضه کالیبره شد که این مقدار ۰/۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این مقاله بر سهولت استفاده از این روش به همراه نتایج رضایت بخش تاکید شده است (Swaina et al., 2015).

ساگر در مطالعه‌ای به تاثیر نقشه DEM حوضه بر نسبت‌های هورتون در استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای در ۴۲ زیر حوضه از دو حوضه آبخیز در هند انجام دادند. نتایج نشان داد تفاوت‌های ناشی از تفکیک شبکه آبراهه در مدل‌های ارتفاعی رقومی DEM مختلف باعث تفاوت در نسبت‌های هورتون می‌شود، که ممکن است به عدم قطعیت در تخمین‌ها منجر شود (Sagar RohidasChavan., 2015).

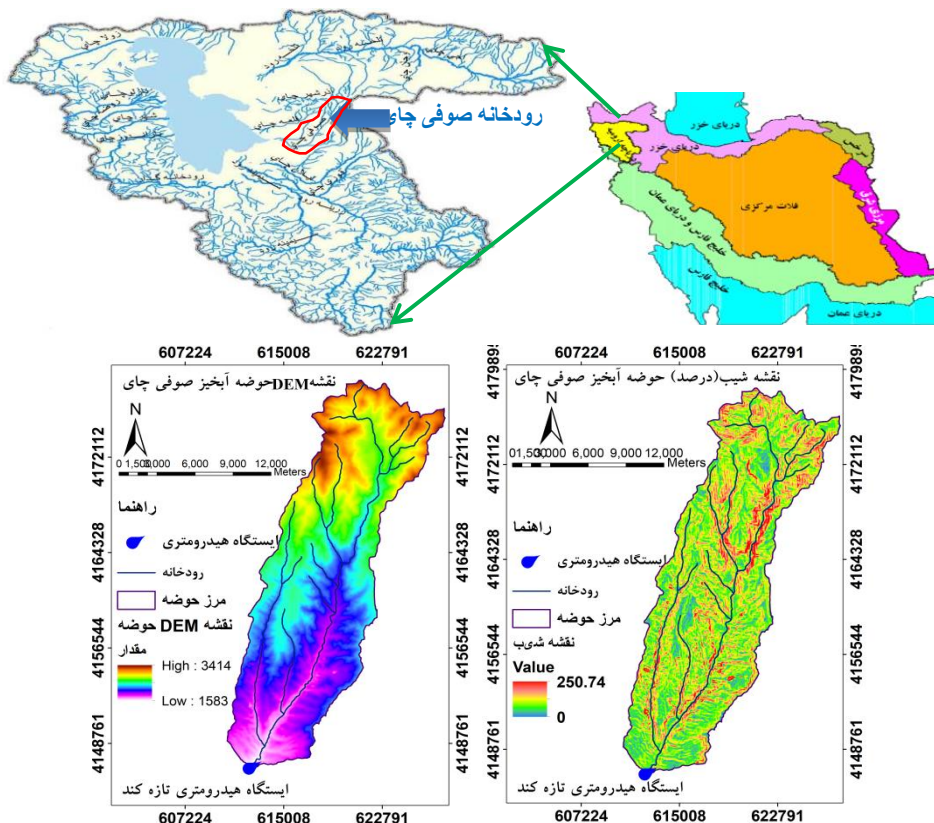
کرمی و اسمعیل‌پور (۱۳۹۳) در پژوهشی با استفاده از خصوصیات مورفومتری حوضه آبخیز دریا چای مانند نسبت انشعاب و طول بلندترین آبراهه هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی حوضه را برای پنج رویداد بارش - رواناب استخراج نمودند و با استفاده از معیارهایی مانند ضریب تعیین، درصد خطای مربوط به پیش‌بینی دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج و ضریب بازده نش - ساتکلیف و درصد خطای حجم رواناب با هیدروگراف مشاهداتی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که اختلاف کمی بین زمان اوج شبیه‌سازی شده با استفاده از هیدروگراف واحد و مقادیر مشاهداتی وجود دارد و پیش‌بینی بهتری از زمان اوج به دست می‌دهد.

تجاسوینی و همکاران تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات زهکشی و ژئومورفولوژی را در مدیریت حوضه آبخیز رودخانه ورادا^۱ در شمال کارناتاکا به کار بردند و ضرایب n, k را در مدل نش برای اعمال اقدامات مدیریتی در حوضه به دست آوردند. نتایج مطالعات نشان داد حوضه شمالی (غیر جنگلی) ایده‌آل برای ذخیره‌سازی آب - های سطحی است و زیر حوضه در منطقه زراعی جنوب، پتانسیل ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی و تغذیه مصنوعی را دارا است (Tejasvini et al., 2011).

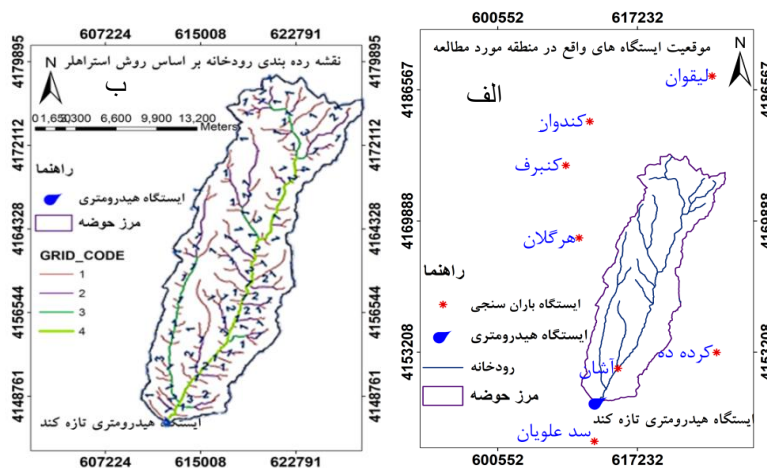
اگرچه تحقیقات وسیعی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در حوضه‌های آبخیز انجام گرفته است، ولی پیچیدگی‌های بسیار زیاد سیستم حاکم بر این پدیده از یک سو و اهمیت تعیین مولفه های سیستم‌های هیدروژئولوژیکی از سوی دیگر نیاز به انجام تحقیقات در این زمینه را دو چندان می‌نماید. لذا در نهایت مدلی مبتنی بر مدل تلفیق موجک متقاطع و فیلتر کالمن، جهت پیش‌بینی رویدادهای انتخابی توسعه داده شد. با توجه به مروری که بر مطالعات

مشخصات فیزیوگرافی حوزه آبخیز صوفی چای ارایه شده است.

بندی آبراهه‌های حوزه، با استفاده از روش استراهلر تهیه گردید که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز صوفی چای به همراه نقشه شیب و DEM حوزه



شکل ۲- نقشه موقعیت ایستگاه‌های منطقه (الف) و نقشه رده بندی آبراهه‌ها (ب) برای حوزه آبخیز صوفی چای بالادست ایستگاه تازه کند

که سیگنال واقعی $s(t)$ در مقیاس (کشیده و فشرده) ضرب می‌شود و به نسخه‌های تابع موجک ψ انتقال می‌یابد، تعریف می‌شود (Nakken., 1999).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

$$WT(scale, position) =$$

روش‌های مورد مطالعه

تبدیل موجک پیوسته (CWT)^۱

تبدیل موجک پیوسته (CWT) به عنوان مجموع تمامی زمان‌هایی

1- Continuous Wavelet Transform

که در آن $Re[W_{xy}(s, b)]$ و $Im[W_{xy}(s, b)]$ به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب $W_{xy}(s, b)$ می‌باشند. همچنین S_1 و S_2 حدود انتگرال و به ترتیب نشان‌دهنده حدود پایین و بالای باند مقیاس بوده و $S_1 < S_2$ می‌باشد (Torrence and Compo., 1998).

فیلتر کالمن^۴

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

مدل سیستم

سیستمی که رفتار دینامیکی گسسته دارد را می‌توان از نظر بردار حالت به صورت رابطه ۸ تعریف نمود (Toddini., 1978).

$$X(k) = \Phi(k|k-1)X(k-1) + \Gamma(k|k-1)w(k-1) \quad (۸)$$

که در این رابطه:

$X(k)$ بردار حالت با ابعاد $(n \times 1)$ ، $\Phi(k|k-1)$ ماتریس گذار (انتقال ۵) 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.

مدل اندازه‌گیری

بردار حالت $X(k)$ در سیستم از طریق سیستم اندازه‌گیری که ذاتا دارای خطا می‌باشد، مشاهده می‌شود. بنابراین بردار اندازه‌گیری $Z(k)$ را می‌توان به عنوان یک ترکیب خطی از بردار حالت $X(k)$ و یک بردار خطای اندازه‌گیری $v(k)$ توصیف نمود.

$$Z(k) = H(k).X(k) + v(k) \quad (۹)$$

که در این رابطه: $Z(k)$ بردار اندازه‌گیری با ابعاد $(m \times 1)$ ، $H(k)$ ماتریس انتقال اندازه‌گیری با ابعاد $(m \times n)$ و $v(k)$ بردار اندازه‌گیری خطا با ابعاد $(m \times 1)$ می‌باشد. فرض می‌شود $w(k)$ و $v(k)$ از فرایند مستقل گوسین پیروی کنند (Lee and Singh., 1999).

مدل فیلتر کالمن

به وسیله معادله ۱۰ سیستم برای مقادیر حالت پیش-

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*(scale, position, t)dt \quad (۲)$$

$$CWT_x^\psi(s, b) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{s}\right)dt \quad (۳)$$

که در آن $\psi(t)$: موجک اصلی (مادر) با طول موثر (t) که معمولا بسیار کوتاه‌تر از سری زمانی هدف $x(t)$ است، نماد * معرف مزدوج مختلط، CWT ضرایب موجک حاصل از تبدیل موجک پیوسته (CWT) سیگنال $x(t)$ هستند و s پارامتر مقیاس و یا اتساع است که یک تابع را با فشردگی‌سازی و یا کشیدن آن مقیاس‌بندی می‌کند. پارامتر b زمان انتقال است. به طوری که تغییرات آن نشان‌دهنده لغزش موجک از روی تابع $x(t)$ است.

تبدیل موجک گسسته (DWT)^۱

فرم گسسته تابع موجک (DWT) به صورت رابطه ۴ می‌باشد (Chen et al., 1999).

$$DWT_x^\psi(S, b) = \frac{1}{\sqrt{|S_0^j|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-nb_0S_0^j}{S_0^j}\right)dt \quad (۴)$$

تبدیل موجک گسسته (DWT) برای محاسبه ضرایب موجک بر روی مقیاس‌های دوتایی^۲ گسسته و موقعیت‌ها در زمان می‌باشد. تابع موجک گسسته به‌وسیله انتخاب $S = S_0^j$ و $b = nb_0S_0^j$ در رابطه ۴ حاصل می‌گردد که j و k اعداد صحیح هستند که به ترتیب انبساط و (جابجایی) را کنترل می‌کنند. همواره $b_0 > 0$ و $S_0 > 1$ می‌باشد.

موجک متقاطع (CW)^۳

تحلیل طیفی موجک متقاطع در دو سری زمانی $x(t)$ و $y(t)$ به صورت رابطه ۵ تعریف می‌گردد (jury et al., 2002).

$$W_{xy}(s, b) = W_x(s, b) W_y^*(s, b) \quad (۱۰) \quad (۵)$$

که در آن $W_x(s, b)$ و $W_y^*(s, b)$ به ترتیب ضرایب تبدیل موجک پیوسته دو سری زمانی $x(t)$ و $y(t)$ هستند. همان‌گونه که قبلا ذکر گردید S و b به ترتیب بیانگر مقیاس و زمان تاخیر سری-های زمانی مذکور می‌باشد و 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 تاخیر و مقیاس مشخص به صورت ساده شده رابطه ۶ توسط تورنس و کاپو به فرم رابطه ۷ تعریف شده است.

$$\Delta\Phi(b, s) = \tan^{-1} \left(\frac{\int_{S_1}^{S_2} Im[W_{xy}(s, b)] ds}{\int_{S_1}^{S_2} Re[W_{xy}(s, b)] ds} \right) \quad (۶)$$

$$\Delta\Phi(b) = \tan^{-1} \left(\frac{Im[W_{xy}(s, b)]}{Re[W_{xy}(s, b)]} \right) \quad (۷)$$

1- Discrete Wavelet transform

2- Dyadic

3- Cross Wavelet

4 - Kalman Filter

5- transition

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

$$GIUH = f\{R_A, R_B, R_L, v, L_\Omega\} \quad (۱۵)$$

$$q_p = 1.31 \cdot L_\Omega^{-1} \cdot R_L^{0.43} \cdot v \quad (۱۶)$$

$$t_p = 0.44 \cdot L_\Omega \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} * R_L^{-0.38} \cdot v^{-1} \quad (۱۷)$$

که در آن R_B : نسبت انشعاب ، R_L : نسبت طول و R_A : نسبت مساحت دبی پیک هیدروگراف لحظه ای $(1/hr)$ و t_p : زمان تا پیک (hr) می‌باشد. L_Ω طول رودخانه با درجه Ω (بزرگ‌ترین رده آبراهه) و v میانگین سرعت در مقطع عرض جریان در خروجی در هنگام دبی اوج برای یک گراف سیل مشخص، بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. روسو ارتباط تجربی به شرح رابطه ۱۸ را بین مدل مفهومی نش و هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی (Nash- GIUH) ارائه نمود (Rosso, 1984).

$$U(t) = \frac{1}{k} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \frac{\exp(-\frac{t}{k})}{\Gamma(n)} \quad (۱۸)$$

$$n = 3.29(R_B/R_A)^{0.78} R_L^{0.07} \quad (۱۹)$$

$$K = 0.7(R_A/(R_B * R_L))^{0.48} v^{-1} L_\Omega \quad (۲۰)$$

که در آن K ثابت ذخیره ، n تعداد مخازن و Γ تابع گاما می‌باشد. میانگین سرعت در مقطع عرض جریان در خروجی در هنگام دبی پیک برای یک گراف سیل مشخص است.

بینی $\bar{x}(k/k - 1)$ در زمان k مقدار در گام زمانی قبل یعنی $k - 1$ را محاسبه می‌کند

(Wu and Hung., 1990 و Mizumura., 1984)

$$\bar{X}(k|k - 1) = \Phi(k|k - 1)\bar{X}(k - 1|k - 1) \quad (۱۰)$$

با دانستن مقدار پیش‌بینی حالت $\bar{X}(k|k - 1)$ و بردار اندازه-گیری $Z(k)$ در مدل اندازه‌گیری، مقدار تخمین حالت $\hat{X}(k|k)$ به وسیله فیلتر خطای اندازه‌گیری با استفاده از هسته کالمن $k(k)$ به صورت روابط ۱۱ تا ۱۲ حاصل می‌شود.

$$\hat{X}(k|k) = \bar{X}(k|k - 1) + k(k)Z(k) - H(k)\bar{X}(k|k - 1) \quad (۱۱)$$

$$k(k) = P(k|k - 1) \cdot H(k)^T [H(k)P(k|k - 1) \cdot H(k)^T + R(k)]^{-1} \quad (۱۲)$$

همچنین عبارت $[Z(k) - H(k)\bar{X}(k|k - 1)]$ خطای اندازه-گیری می‌باشد. کواریانس $P(k|k)$ در تخمین خطای حالت به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌گردد.

$$P(k|k) = [I - k(k)H(k)] \cdot P(k|k - 1) \quad (۱۳)$$

هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی

معادله عمومی GIUH برای رودخانه رده N پیش از این در مطالعات رودریگز و والداس (Rodriguez Iturb and Valdes., 1979) ارائه گردید.

$$\frac{d\theta_{N+2}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N \theta_i(0) \frac{d\varphi_{i(N+2)}(t)}{dt} \quad (۱۴)$$

که در آن t : موقعیت مکانی قطره باران فرضی می‌باشد. $\theta_{N+2}(t)$: احتمال موقعیت، احتمال اینکه یک قطره باران در

جدول ۲- معیارهای ارزیابی جهت تحلیل شبیه‌سازی

معیار ارزیابی	رابطه
ضریب نابرابری تایل (TIC)	$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (M - O)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum M^2 + \frac{1}{N} \sum O^2}} \quad 0 \leq TIC \leq 1$ (۲۱)
فرم اصلاح شده نش-ساتکلیف (E_J)	$0 \leq E_J \leq 1 \quad E_J = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O - M|}{\sum_{i=1}^N |O - \bar{O}|^J}, J \in N$ (۲۲)
خطای نسبی (RE)	$RE = \frac{M - O}{O}$ (۲۳)
میانگین مطلق خطای نسبی (MARE)	$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n |RE|}{n}$ (۲۴)

معیار ارزیابی موفقیت تحقیق

در این بخش تعدادی از معیارهای ارزیابی مطابق جدول ۲ جهت تحلیل نتایج استفاده گردید.

که در آن

O : مقادیر مشاهداتی، M : مقادیر محاسبه شده توسط مدل، N : تعداد داده های واسنجی یا صحت سنجی، \bar{O} : متوسط مقادیر مشاهداتی و \bar{M} : متوسط مقادیر محاسباتی توسط مدل است. در معیار ضریب نابرابری تایل مقدار صفر برای آماره نشان دهنده برازش کامل است.

در این مطالعه از ۹ رخدادهای بارش و رواناب با مشخصات کلی مطابق جدول ۳ در حوضه آبخیز صوفی چای استفاده شد. سپس وقایع به دو مرحله واسنجی و صحت سنجی تقسیم و جهت مدل سازی فرایند آماده شدند. پس از کسر جریان پایه توسط روش پیشنهادی چاو در هیدروگرافهای مرکب، انجام گرفت. توضیح کامل روشهای جداسازی دبی پایه در مطالعات چاو ارایه شده است (Chow, 1998). محاسبه بارش موثر با استفاده از شاخص ϕ که مقادیر آن برای وقایع مرحله واسنجی در جدول ۳ ارایه شده است، انجام گرفت.

توسعه مدل کنترلی فیلتر کالمن - برنامه ریزی خطی - موجک متقاطع (KF-LP-CW)

مطابق شکل ۳ جهت مدل سازی در ابتدای امر پس از جداسازی آب پایه و کسر شاخص ϕ 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. در این روش مراحل کلی مطالعه به ترتیب از مرحله یک تا شش انجام گرفت.

مرحله ۱: جداسازی دبی پایه هیدروگراف سیلاب و کسر متوسط شاخص ϕ از بارش کل اتفاق افتاده در حوضه (بارش متوسط در حوضه با استفاده از میانگین گیری تیسین با استفاده از آمار بارش در ایستگاههای کندوان، کنبرف، لیقوان، هرگلان، آشان، کرده ده و سد علویان شکل (۲-الف) محاسبه گردید. و تخمین هیدروگراف واحد حوضه با استفاده از روش برنامه ریزی خطی.

مرحله ۲: اعمال تبدیل موجک گسسته به منظور حذف نویز موجود در سیگنال رواناب و انتخاب موجک مناسب جهت تجزیه نمونه ای از این تجزیه در شکل ۴ جهت جداسازی نویز توسط مدل موجک گسسته سیملت برای مدل سازی در فیلتر کالمن در واقعه ۱۳۸۲/۰۲/۱۹ ارایه شده است. لازم به ذکر است توابع مختلف موجک مادر بر سیگنال رواناب برازش یافته و در نهایت بهترین برازش با کم-

ترین خطا جهت جداسازی نویز وقایع انتخاب گردید. نتایج این محاسبات در جدول ۳ در بخش نتایج ارایه شده است.

مرحله ۳: اعمال موجک متقاطع بر سیگنالهای بارش موثر و رواناب مستقیم جهت تشخیص فاز و تاخیر زمانی بین سیگنالهای بارش و رواناب

مرحله ۴: اعمال تاخیرهای زمانی محاسبه شده جهت انتقال مولفه های بارش موثر

مرحله ۵: ورود هیدروگراف واحد محاسبه شده به عنوان فضای حالت و اعمال فیلتر کالمن برای شبیه سازی وقایع

مرحله ۶: محاسبه هیدروگراف سیلاب و ارزیابی معیارهای خطا.

نتایج و بحث**نتایج حاصل از آماده سازی اولیه داده ها و اعمال موجک گسسته**

نتایج حاصل از انجام مرحله ۱ و ۲ در مدل سازی وقایع بارش و رواناب شامل کسر تلفات از بارش کل، هیتوگراف بارش موثر، هیدروگراف رواناب مستقیم، جداسازی نویز از سیگنالهای رواناب با استفاده از تبدیل موجک گسسته سیملت در سطوح تجزیه مختلف در جدول ۳ ارایه شده است.

نتایج حاصل از محاسبه هیدروگراف واحد یا استفاده از روش برنامه ریزی خطی

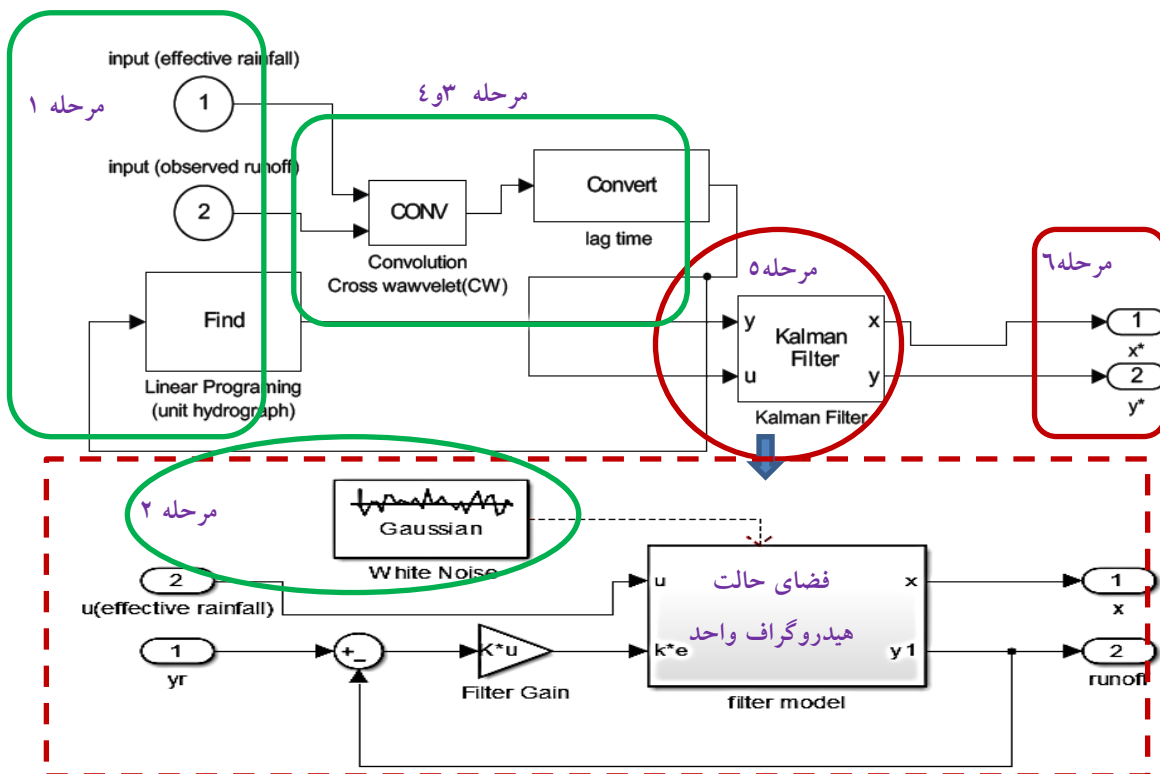
پس از آماده سازی سری داده های بارش و رواناب جهت استفاده در مدل، با استفاده از روش برنامه ریزی خطی، با استفاده از وقایع مرحله واسنجی، ابعاد هیدروگراف واحد برای هر واقعه محاسبه گردید. سپس از هیدروگرافهای واحد حاصل میانگین گیری انجام گرفت و به عنوان هیدروگراف واحد حوضه جهت استفاده در فضای حالت مدل اندازه گیری در فیلتر کالمن استفاده شد. در شکل ۵ هیدروگرافهای واحد محاسبه شده برای ۵ واقعه مرحله واسنجی به همراه هیدروگراف واحد میانگین برای حوضه ارایه شده است.

نتایج مدل سازی هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی حوضه**GIUH و مدل نش (Nash-GIUH)**

در این روش پس از محاسبات مورد نیاز در خصوص فیزیوگرافی و شبکه زهکشی حوضه که نتایج حاصل از آن به طور خلاصه در جداول ۴ و ۵ ارایه شده است، رده بندی آبراهه به روش استراهلر انجام شد. سپس زمان تمرکز حوضه بر اساس برخی از روابط تجربی توسعه داده شده محاسبه گردید. نتایج حاصل در جدول ۶ ارایه شده است. که به طور میانگین ۹/۴ ساعت محاسبه گردید بنابراین در مطالعه فوق در مرحله واسنجی مدل مقدار سرعت کالیبره شده در حوضه

واحد لحظه‌ای GIUH و Nash-GIUH) در شکل ۶ ارائه شده است.

معادل ۱/۸ متر در ثانیه محاسبه گردید و برای رخدادهای مرحله صحت‌سنجی از این سرعت استفاده شد. نتایج محاسبه هیدروگراف



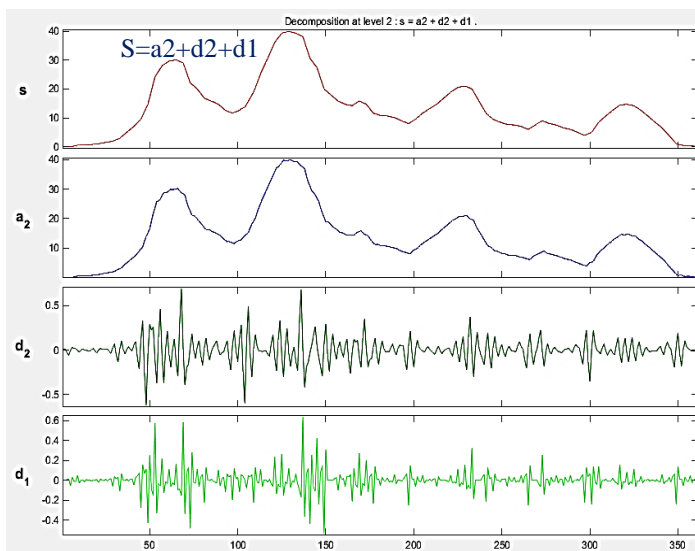
شکل ۳- مدل کنترلی بارش - رواناب با کاربرد فیلتر کالمن - برنامه ریزی خطی و موجک متقاطع (KF-LP-CW)

سیگنال اصلی رواناب مورخ
 $S=a_2+d_2+d_1$
 ۱۳۸۲/۱/۱۹

a_2 : سیگنال رواناب پس از حذف نویز

d_2 : جداسازی نویز ناشی از اعمال تبدیل موجک گسسته سیمت در سطح ۲

d_1 : جداسازی نویز ناشی از اعمال تبدیل موجک گسسته سیمت در سطح ۱، جهت استفاده در مدل سازی فیلتر کالمن (مرحله ۲) در سیگنال رواناب

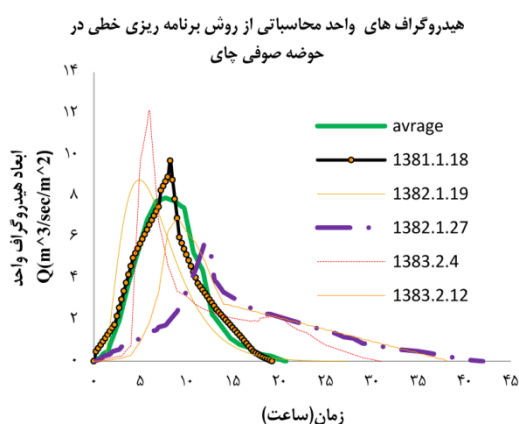


شکل ۴- مرحله (۲) حذف نویز وقایع با استفاده از موجک گسسته سیمت در دو سطح (به عنوان مثال رخداد ۱۳۸۲/۱/۱۹)

جدول ۳- مشخصات کلی وقایع مرکب بارش - رواناب، خصوصیات تجزیه سیگنال و فضای حالت

وقایع انتخابی جهت مرحله صحت سنجی			وقایع انتخابی جهت مرحله کالیبراسیون (آموزش)			مرحله		
۲/۱۲	۱۲/۳۴	۲/۳۱	۱/۲۷	۲/۱۲	۱۳۸۳/۲/۴	۱/۲۷	۱/۱۹	۱/۱۸
۱۳۸۹	۱۳۸۷	۱۳۸۶	۱۳۸۴	۱۳۸۳		۱۳۸۲	۱۳۸۲	۱۳۸۱
۲۲/۰۶	۲۷/۲۵	۸/۴۸	۵۲/۱۷	۳۴/۲۵	۴۵/۴۷	۲۶/۸۷	۱۹/۶	۱۶/۷
۰/۵۷	۲/۳۷	۱/۴	۱/۸۷	۲/۲۱	۱/۵۶	۱/۴	۱/۰۴	۲/۷۶
۱۱/۱	۴/۵	۱۱/۴	۷/۸۳	۱۴/۶	۱۳	۱۳/۶	۹/۰۷	۸/۵۸
۲۶/۵	۳۴	۴۷/۷	۳۵/۳۷	۶۵/۴	۳۴/۹	۳۱/۶	۳۹/۴۸	۵۰/۲۲
۹/۵	۱۷	۶	۱۲/۷۵	۱۵	۹	۲۴	۳۲/۷۵	۴
۶۵	۲۸	۳۱/۲۵	۴۲	۳۵	۲۷	۳۰	۹۰	۱۸
				۱۶/۲۵	۶	۵/۲۵	۱۶/۵	۵/۷۵
*Sym3	Sym3	Sym3	Sym3	Sym3	Sym4	Sym4	Sym3	Sym3
۲	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲
۰/۲۱۵	۰/۱۱۱	۰/۳۱۲	۰/۴۳	۰/۴۳۶	۰/۶۹	۰/۳۸۵	۰/۱۱۹	۰/۳۷۵۲

*Sym: Symlets wavelet



شکل ۵- هیدروگراف واحد محاسبه شده برای ۵ واقعه مرحله واسنجی و هیدروگراف میانگین با استفاده از روش برنامه ریزی خطی

جدول ۴- مشخصات شبکه زهکشی حوضه آبخیز صوفی چای

درجه آبراهه	تعداد آبراهه درجه i	مساحت (کیلومتر مربع)	طول (کیلومتر)	متوسط طول L	متوسط مساحت A
۱	۱۴۸	۱۵۴/۸۶	۱۵۰/۳۴	۱/۰۱۵	۱/۰۴
۲	۳۰	۱۳۰/۵۹	۶۲/۷۸	۲/۰۹۳	۴/۳۵
۳	۶	۱۳۴/۰۹	۳۳/۹۲	۵/۶۵۴	۲۲/۳۴
۴	۱	۲۵۰/۶۵	۳۲/۳۳	۳۲/۳۳	۲۵۰/۶۵

جدول ۵- تعیین نسبت های ژئومورفولوژیکی در حوضه مورد مطالعه

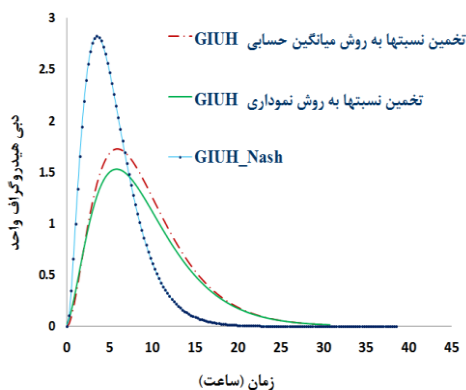
روش	نموداری			میانگین حسابی		
درجه آبراهه	$\ln R_B$	$\ln R_L$	$\ln R_A$	R_B	R_L	R_A
۱	۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۴/۹۳	۲/۰۶	۴/۱۶
۲	۳/۴	۰/۷۴	۱/۴۷	۵	۲/۷	۵/۱۳
۳	۱/۷۹	۱/۷۳	۳/۱۱	۶	۵/۷۲	۱۱/۲۲
۴	۰	۳/۴۸	۵/۵۲			
نسبت	۵/۲۶	۳/۱۱	۶/۱۷	۵/۳۱	۳/۵	۶/۸۴
t_p (hr)	۵/۸۱				۵/۲۸	
q_p (l/hr)	۰/۱۱۳				۰/۱۱۸۸	

جدول ۶- تعیین زمان تمرکز حوضه با استفاده از روابط تجربی

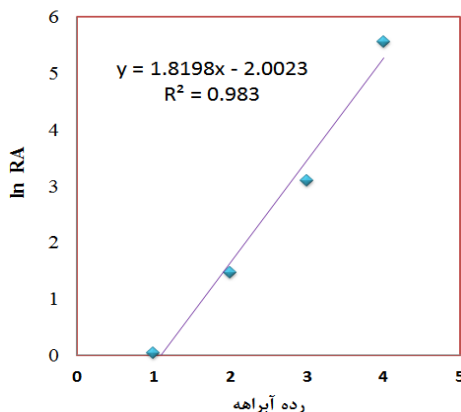
نام روش	رابطه	شرح پارامتر	مقدار (ساعت)
کرپیچ	$T_c = 0.9195 * L^{0.77} * S^{0.385}$	T_c : زمان تمرکز (دقیقه) L : طول آبراهه اصلی (متر) S : شیب آبراهه اصلی (متر بر متر)	۱۴/۶۸
برانسی ویلیامز	$T_c = \frac{L}{1.5 * D} \left(\frac{A^2}{F} \right)^{0.5}$	D : قطر دایره معادل (کیلومتر) L : طول آبراهه اصلی (کیلومتر) A : مساحت حوضه (کیلومتر مربع) F : شیب متوسط آبراهه (درصد)	۱۰/۶
جانسون کراس	$T_c = 0.087 \left(\frac{L}{S} \right)^{0.5}$	L : طول آبراهه اصلی (متر) S : شیب آبراهه اصلی (درصد)	۹/۳۳
کربای	$T_c = \frac{6.562 * L * n}{3 * \sqrt{S_b}}$	T_c : زمان تمرکز (دقیقه) S_b : شیب متوسط حوضه (درصد) n : ضریب زبری مانینگ	۷/۴۱
scs	$T_{lag} = \frac{L^{0.8} (s + 1)^{0.7}}{1900 * y^5}$ $S_{nat} = \frac{1000}{CN} - 10$ $T_c = 1.67 T_{lag}$	T_{lag} : زمان تاخیر (ساعت) L : طول آبراهه اصلی (فوت) S_{nat} : ضریب نگهداشت آب در حوضه CN : شماره منحنی متوسط حوضه y : شیب آبراهه اصلی (درصد)	۸/۵۵
Simas	$T_c = 0.0085 W^{0.5937} S_b^{-0.1505} S_{nat}^{0.3131}$ $W = \frac{A}{L}$	W : عرض حوضه (فوت) S_b : شیب متوسط حوضه (فوت بر فوت) S_{nat} : ضریب نگهداشت آب در حوضه	۶/۳۶
پاپاداکیس و کازان	$T_c = 0.66 L^{0.5} n^{0.52} S^{-0.31} i^{-0.38}$	T_c : زمان تمرکز (دقیقه) L : طول آبراهه اصلی (فوت) S : شیب رودخانه اصلی (فوت بر فوت) i : شدت بارش مازاد (اینچ بر ساعت)	۵/۸۳
میانگین			۹/۴

هر رده، طول متوسط در هر رده \ln گرفته می‌شود و سپس در یک نمودار در برابر رده آبراهه رسم می‌شود معکوس \ln شیب خط حاصله نسبت ژئومورفولوژیکی مربوطه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است جهت کاربرد روابط ۲۱ تا ۲۸ لازم است نسبت‌های ژئومورفولوژیکی در حوضه تعیین شود که این امر با استفاده از روش نموداری و میانگین‌گیری حسابی انجام می‌پذیرد. در روش نموداری از مقادیر متوسط تعداد آبراهه در هر رده، مساحت متوسط در



شکل ۶- هیدروگراف واحد GIUH-Nash و GIUH



شکل ۷- تعیین نسبت های ژئومورفولوژیکی به روش نموداری

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل بارش - رواناب

با توجه به کاربرد سه روش مذکور در شبیه سازی مدل کنترلی بارش - رواناب در حوضه آبخیز صوفی چای، نتایج در شکل ۹ برای وقایع مرحله واسنجی و شکل ۱۰ برای وقایع مرحله صحت سنجی و نتایج بررسی کارایی روش ها توسط معیارهای ارزیابی در جدول ۸ ارائه شده است.

نتایج حاصله نشان داد در صورتی که از منظر معیار ارزیابی جذر میانگین مربع خطاها ارزیابی را مورد توجه قرار دهیم، روش (LP- KF-CW) نسبت به دو روش دیگر در هر دو مرحله واسنجی (۲/۴۴) و صحت سنجی (۲/۳۳) از عملکرد بهتری برخوردار می باشد. همچنین نتایج مربوط به ضریب تعیین R^2 عملکرد بهتر این روش را تایید می کند. به طوریکه مقادیر متوسط برای این معیار در روش مذکور در مرحله واسنجی ۰/۹۸ و در مرحله صحت سنجی به طور متوسط برابر ۰/۹۳ است.

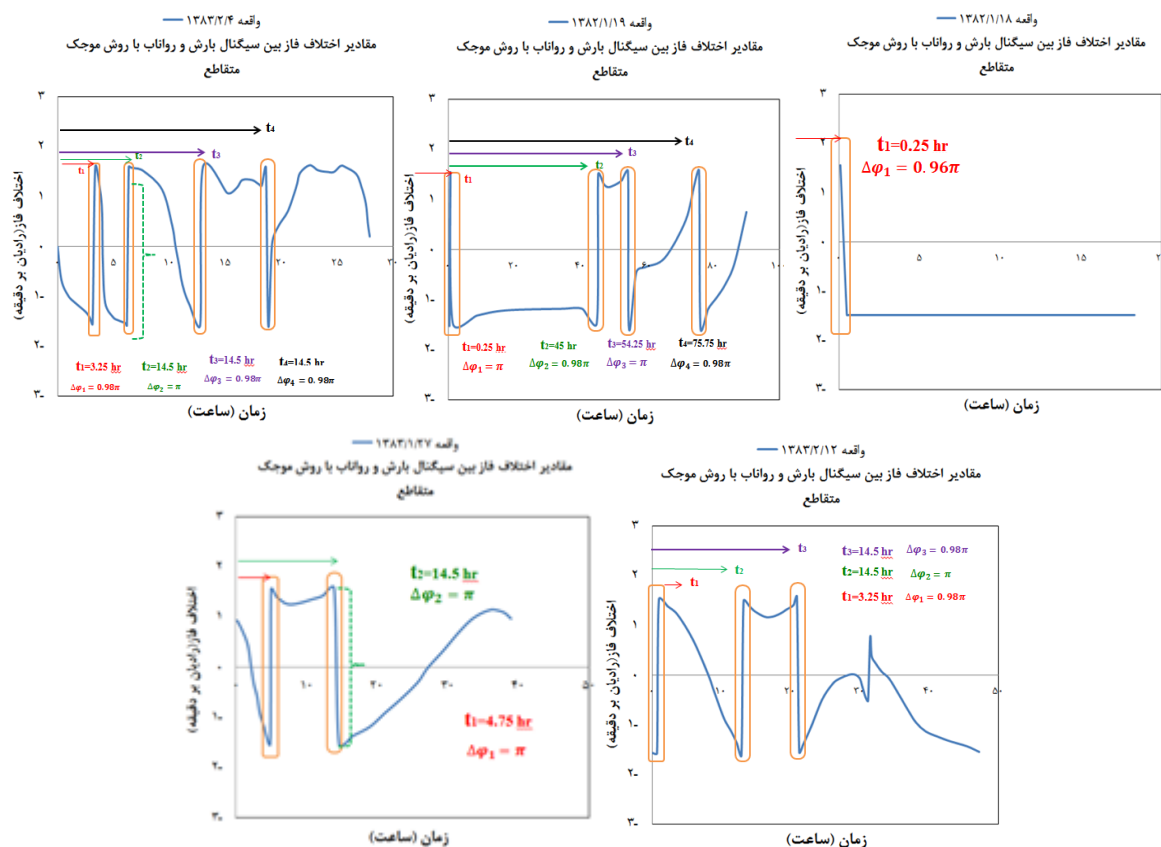
در مورد معیار E_j که از لحاظ مفهومی شبیه به ضریب تعیین است با متوسط ۰/۹۸ و ۰/۸۹ به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت سنجی مؤید عملکرد بهتر روش مذکور نسبت به ۲ روش دیگر می باشد. تحلیل ضریب نابرابری تایل نیز با مقادیر متوسط ۰/۱۴ و ۰/۲۹ به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت سنجی، نشان دهنده عملکرد بهتر این روش نسبت به دو روش دیگر می باشد.

پیش بینی واقعه ۱۳۸۶/۲/۳۱ در مرحله صحت سنجی کمترین خطا را از بین ۹ واقعه مورد مطالعه دارا بود. در تحلیل ضریب نابرابری تایل مشخص گردید هر سه روش به طور متوسط مقداری زیر ۰/۵ دارا می باشند که بیانگر عملکرد مناسب این روش ها برای وقایع اشاره شده می باشد. در جدول ۸ مقادیر هر معیار برای هر واقعه در هر روش ارائه شده است. در مورد زمان پایه زمان تا اوج و دبی اوج در نمودارهای ۱۱ تا ۱۳ به وضوح عملکرد روش های مختلف در دو مرحله واسنجی و صحت سنجی ارائه شده است.

به عنوان مثال شکل ۷ در رابطه با تعیین نسبت مساحت (R_A) ارائه شده است. در این مطالعه در وقایع مرحله واسنجی نتایج حاصل از روش میانگین حسابی دقت بیشتری را داشت.

نتایج تعیین فاز سیستم در وقایع بارش - رواناب مورد مطالعه

با توجه به فرض مقدار متوسط برای تلفات بارش در حوضه تحت عنوان شاخص φ و توجه به این نکته که در طبیعت تلفات بارش در ابتدا زیاد و سپس رفته رفته کاهش می یابد، لذا کسر یک مقدار متوسط برای تلفات همواره باعث بروز خطا در برآورد هیئوگراف بارش موثر می شود. لذا با استفاده از تبدیل موجک متقاطع می توان مولفه های بارش موثر اولیه را مطابق با تاخیرهای ایجاد شده اصلاح نمود. این روش برای اولین بار در این زمینه استفاده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تشخیص واکنش حوضه در ایجاد تاخیر 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 (فازها در مقیاس های مختلف اعمال و مقیاسی که بهترین نتیجه خروجی را ارائه دهد با استفاده از کد برنامه نوشته شده انتخاب گردید) برای وقایع مرحله واسنجی و صحت سنجی ترسیم گردید. تاخیر در پالس های بارش مازاد اولیه در زمان هایی اعمال شد که اختلاف فاز مضرب صحیحی از π باشد. نتیجه جالبی که از بررسی چشمی منحنی های تغییر فاز دیده می شود، واکنش تقریباً مشابه حوضه در مواجه شدن با این وقایع می باشد بنابراین با استفاده از ۵ منحنی فاز به دست آمده در مرحله واسنجی، منحنی فاز برای ۴ رخداد مرحله صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصله با فاز واقعی مشاهداتی همین وقایع مقایسه گردید (جدول ۷).

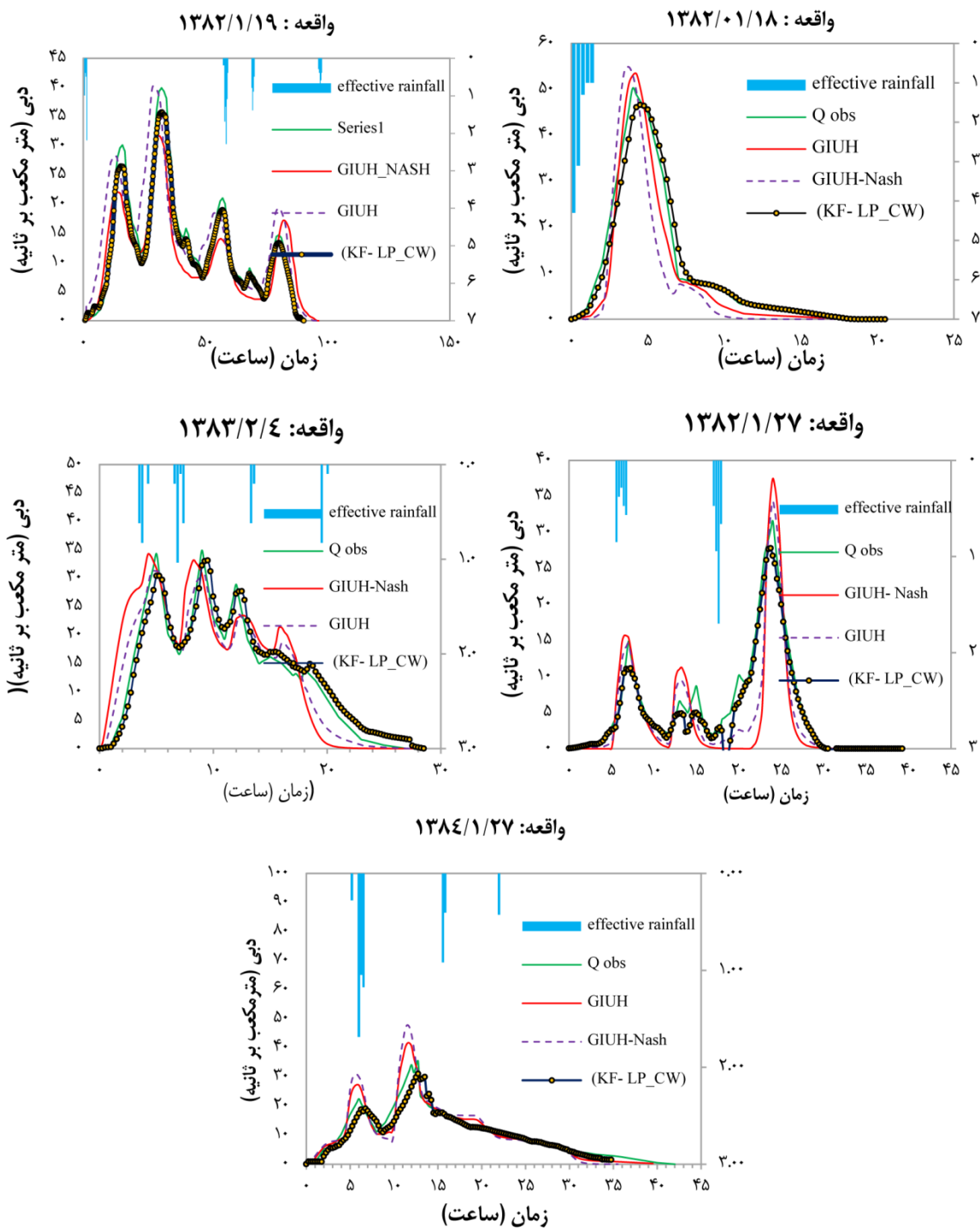


شکل ۸- منحنی‌های اختلاف فاز برای رخداد‌های مرحله واسنجی

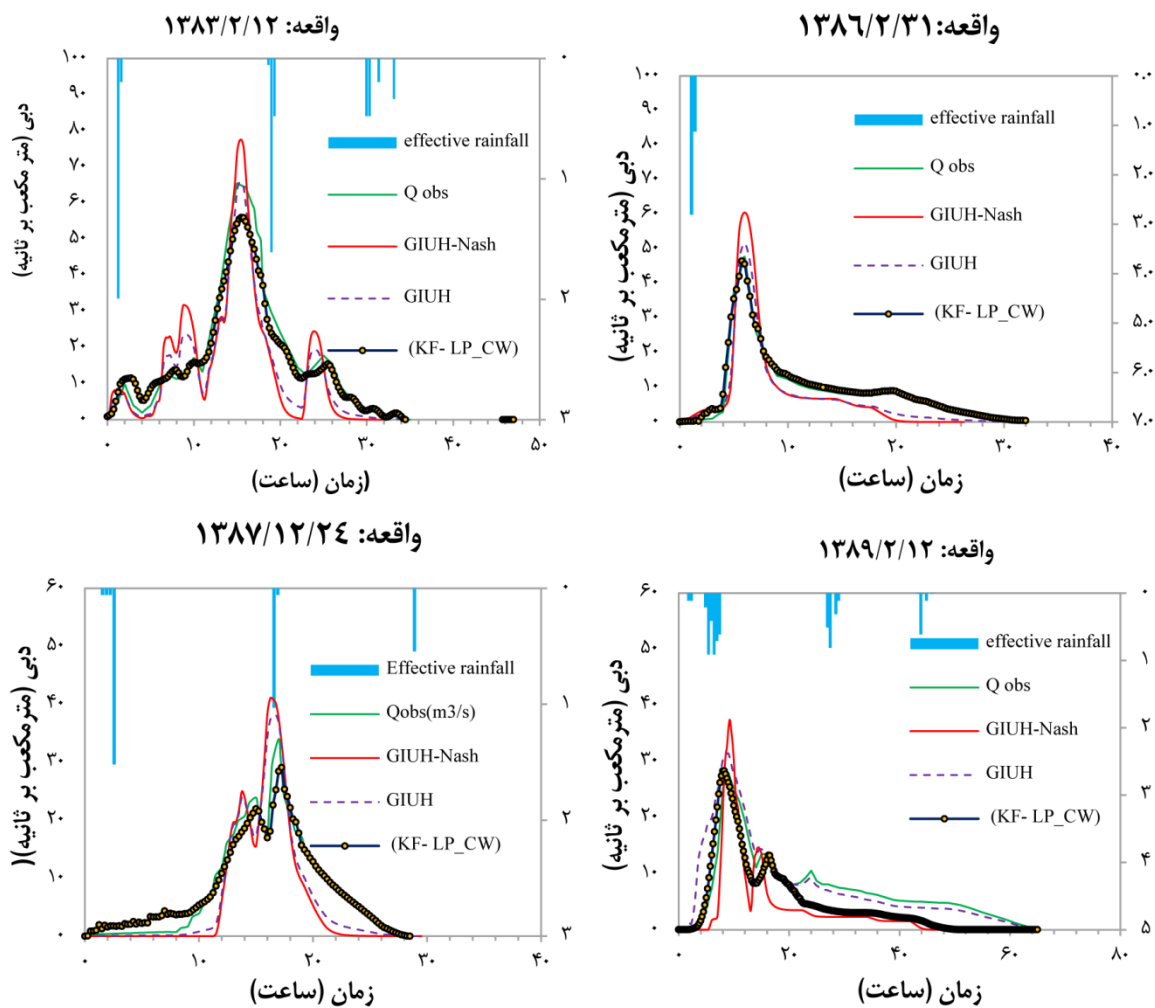
جدول ۷- اختلاف فاز وقایع بارش و رواناب در مرحله واسنجی و صحت سنجی

$\Delta\phi_4$	t_4	$\Delta\phi_3$	t_3	$\Delta\phi_2$	t_2	$\Delta\phi_1$	t_1^*	رخداد
رادیان بر دقیقه	ساعت	رادیان بر دقیقه	ساعت	رادیان بر دقیقه	ساعت	رادیان بر دقیقه	ساعت	واسنجی
.	.	.	.	.	.	0.96π	-/۲۵	۱۳۸۱/۰۱/۱۸
0.98π	۷۵/۷۵	π	۵۴/۲۵	0.97π	۴۵	π	-/۲۵	۱۳۸۲/۰۱/۱۹
.	.	.	.	π	۱۴/۵	π	۴/۷۵	۱۳۸۲/۰۱/۲۷
0.98π	۱۸/۷۵	0.98π	۱۲/۷۵	π	۶/۲۵	0.98π	۳/۲۵	۱۳۸۳/۰۲/۰۴
.	.	0.99π	۲۱	π	۱۳	0.98π	-/۷۵	۱۳۸۳/۰۲/۱۲
.	.	.	.	π	۱۴/۵	π	۴/۷۵	*۱
π	۲۵	π	۱۷	0.97π	۸	0.98π	۴/۲۵	*۲ ۱۳۸۴/۰۱/۲۷
.	.	.	.	.	.	0.96π	-/۲۵	۱
.	.	.	.	.	.	0.97π	-/۵	۲ ۱۳۸۶/۰۲/۳۱
.	.	0.99π	۲۱	π	۱۳	0.98π	-/۷۵	۱ ۱۳۸۷/۱۲/۲۴
.	.	π	۲۲	0.98π	۱۲/۷۵	0.98π	۱	۲
.	.	0.99π	۲۱	π	۱۳	0.98π	-/۷۵	۱ ۱۳۸۹/۰۲/۱۲
π	۵۰/۷۵	0.98π	۴۰/۵	π	۱۸/۲۵	π	۶	۲

*۱: اعمال اختلاف فاز بر اساس مرحله واسنجی و رخداد مشابه با واقعه مورد نظر و *۲: فاز مشاهداتی



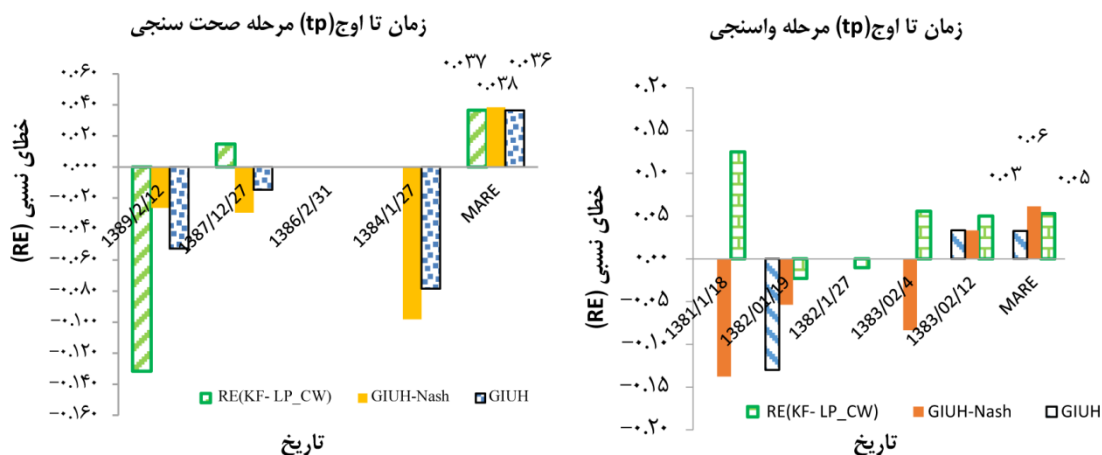
شکل ۹- نتایج شبیه سازی روش های مورد مطالعه در وقایع حوضه صوفی چای - مرحله واسنجی



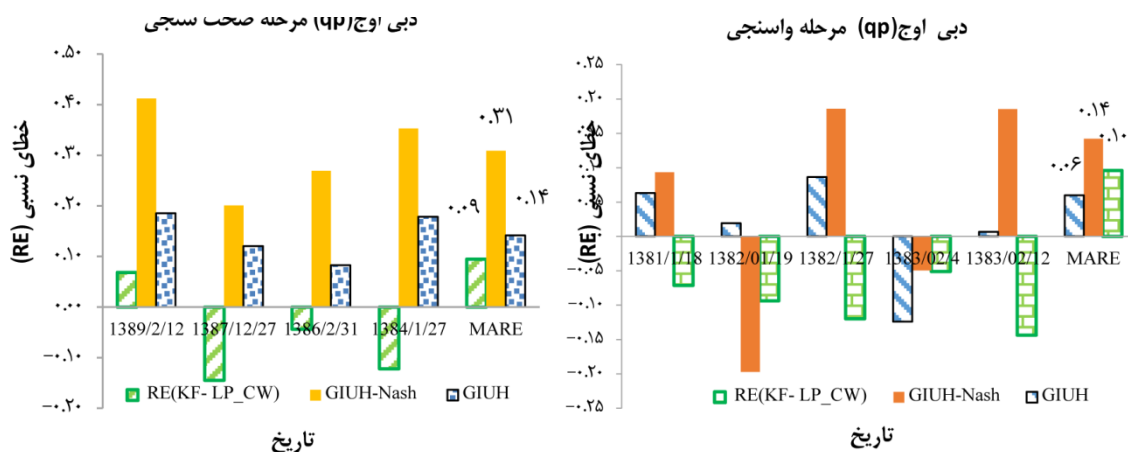
شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی روش‌های مورد مطالعه در وقایع حوضه صوفی چای- مرحله صحت‌سنجی

جدول ۸- نتایج کاربرد معیارهای ارزیابی مورد مطالعه در وقایع انتخابی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

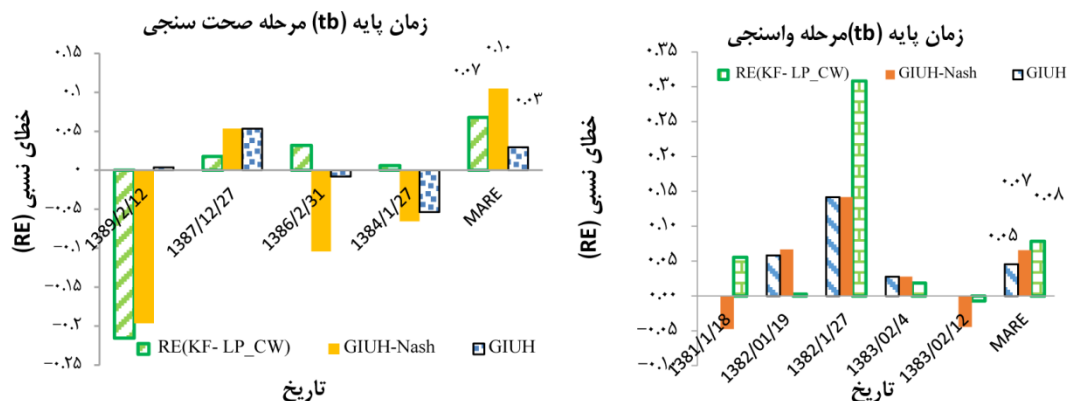
وقایع مرکب انتخابی مرحله ...									واسنجی (آموزش)		صحت‌سنجی (تست)	
رخداد	معیار	ارزیابی	روش	۱۳۸۱/۰۱/۱۸	۱۳۸۲/۰۱/۱۹	۱۳۸۲/۰۱/۲۷	۱۳۸۳/۰۲/۰۴	۱۳۸۳/۰۲/۱۲	۱۳۸۴/۰۱/۲۷	۱۳۸۶/۰۲/۳۱	۱۳۸۷/۱۲/۲۴	۱۳۸۹/۰۲/۱۲
جزر میانگین	KF-) (LP_CW	۲/۵۱	۱/۹۶	۱/۴۸	۲/۱۶	۴/۲۲	۲/۴۵	۱/۰۹	۵/۹	۳/۵		
مربع خطا (RMSE)	(GIHU-Nash) (GIHU)	۷/۳۶	۴/۸۹	۵/۱۶	۵/۷۸	۹/۹۵	۴/۳۵	۶/۰۲	۵/۴۲	۵/۳۳		
ضریب تعیین (R^2)	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۹۷	-۰/۹۹	-۰/۹۸	-۰/۹۶	-۰/۹۸	-۰/۹۲	-۰/۹۹	-۰/۸۲	-۰/۸۳		
ضریب نابرابری تایلر (TIC)	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۸۳	-۰/۸	-۰/۶۵	-۰/۷۵	-۰/۸۵	-۰/۸۹	-۰/۸۶	-۰/۸۸	-۰/۸۱		
ضریب نش ساتکلیف اصلاح شده (E_j)	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۹۲	-۰/۶۲	-۰/۷۸	-۰/۸۶	-۰/۹	-۰/۹۴	-۰/۹۱	-۰/۸۵	-۰/۸		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۱۴	-۰/۱۳	-۰/۱۷	-۰/۱۲	-۰/۱۷	-۰/۱۹	-۰/۰۸	-۰/۵	-۰/۴		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۴۷	-۰/۳۵	-۰/۵۳	-۰/۳۱	-۰/۴۲	-۰/۳۷	-۰/۳۷	-۰/۴۳	-۰/۵۹		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۲۷	-۰/۳۶	-۰/۴۱	-۰/۲۲	-۰/۳۸	-۰/۱۹	-۰/۲۹	-۰/۳۹	-۰/۳۱		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۹۷	-۰/۹۶	-۰/۹۵	-۰/۹۸	-۰/۹۴	-۰/۹۱	-۰/۹۹	-۰/۷۵	-۰/۶۶		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۷۷	-۰/۷۳	-۰/۴۴	-۰/۸۸	-۰/۷	-۰/۷۲	-۰/۶۸	-۰/۷۸	-۰/۳۶		
	KF-) (LP_CW) (GIHU-Nash) (GIHU)	-۰/۸۹	-۰/۵۶	-۰/۷	-۰/۹۵	-۰/۸۱	-۰/۸۸	-۰/۸۵	-۰/۸۲	-۰/۶۶		



شکل ۱۱- خطای نسبی هر رویداد و MARE زمان اوج در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش‌های مورد مطالعه



شکل ۱۲- خطای نسبی هر رویداد و MARE دبی اوج در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش‌های مورد مطالعه



شکل ۱۳- خطای نسبی هر رویداد و MARE زمان پایه در مرحله واسنجی و صحت سنجی در روش‌های مورد مطالعه

همین معیار برای دبی تا اوج و زمان پایه در دو مرحله واسنجی (به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۱۸) و صحت‌سنجی (۰/۰۶ و ۰/۰۷) می‌باشد. همچنین از تحلیل نتایج می‌توان به دقت بیش‌تر روش‌های مذکور در

به‌طوریکه در مورد زمان تا اوج به طور متوسط میانگین مطلق خطای نسبی در کل رخدادهای (MARE) در مرحله واسنجی و صحت-سنجی به ترتیب در ۳ روش مورد مطالعه ۰/۰۵ و ۰/۰۳۷ است و

استفاده نمودند.

منابع

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

کرمی، ف.، اسمعیل پور، م. ۱۳۹۳. برآورد رواناب با استفاده از مدل هیدروگراف لحظه‌ای ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه دریان چای)، هیدرومورفولوژی. ۱: ۱۴۵-۱۵۷

Chen, B.H., Wang, X.Z., Yang, S.H., McGreavy, C. 1999. Application of wavelets and neural Networks to diagnostic System development, feature extraction, Comput and Chem. Computers and Chemical Engineering, Elsevier Sciences. 23.7: 899-906.

Chou, C.M., Wang, R.Y. 2004. Application of wavelet-based multi model Kalman filters to real-time flood forecasting. Hydrology process. 18: 987-1008.

Chow, V.T., Maidment, D.R and Mays, L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw- Hill book company, New York.

Guasti Lima, F and Assaf Neto, A. 2012. Combining wavelet and kalman filters for financial time series forecasting, Journal of International Finance and Economics. 12. 3: 47-64.

Hong, L., Chen, G., Chui, C.K. 1998. A filter-bank-based Kalman filtering technique for wavelet estimation and decomposition of random signals. IEEE Trans. Circuits Systems-II: Analog Digit Signal Processing. 45.2: 237-241.

J.B. Swaina, R. Jhab, K., Patrac, C. 2015. Stream flow prediction in a typical ungauged catchment using GIUH approach, international conference on water resources, coastal and ocean engineering. 4: 993 - 1000.

Jothityangkoon, C., Sivapalan, M and Farmer, D.L. 2001. Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development. Journal of Hydrolog. 254: 174-198.

Jury, M.R., Enfield, D.B., Melice, J.L. 2002. Tropical monsoons around Africa: stability of El Nino-southern oscillation associations and links with continental climate. Journal of Geophysical Research. 107. 15: 1-17

Labat, D. Ababou, R., Mangin, A. 2000. Wavelet analysis in Karstic hydrology. 2nd Part: Rainfall-runoff cross-wavelet analysis. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences IIA Earth and Planetary Science. 329: 881-887.

برآورد زمان تا اوج و زمان پایه اشاره کرد. در حالی که در برآورد دبی تا اوج دقت کمتری وجود دارد.

در صورتی که نتایج برآورد در کل ۹ رخداد را مد نظر قرار دهیم، به طور متوسط در کل وقایع و ۳ روش مورد مطالعه میانگین مطلق خطای نسبی در کل رخدادها (MARE) به ترتیب در زمان تا اوج برابر ۰/۰۴۳، در مورد دبی اوج ۰/۱۴ و زمان پایه برابر ۰/۰۷ می‌باشد. این امر بیانگر عملکرد مناسب‌تر روش‌ها به ترتیب در برآورد زمان تا اوج، زمان پایه و دبی اوج می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه به شبیه‌سازی پدیده وقایع مرکب بارش - رواناب در حوضه صوفی چای بالادست ایستگاه هیدرومتری تازه کند در استان آذربایجان شرقی در ایران پرداخته شد. این امر با استفاده از تلفیق روش‌های برنامه‌ریزی خطی، موجک متقاطع و فیلتر کالمن انجام گردید. نتایج حاصله با کاربرد روش‌های هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی و تلفیق آن با روش نش مقایسه گردید. از نتایج کلی این مطالعه می‌توان به اصلاح مولفه‌های هیتوگراف بارش موثر، توسط موجک متقاطع اشاره نمود. با اعمال اختلاف فاز در هیتوگراف‌های بارش موثر، خطای محاسبات به حداقل ممکن رسید. این کاربرد زمان وقوع اوج‌ها را بهبود می‌بخشد.

با کاربرد معادلات فیلتر کالمن در مدل‌سازی و استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی جهت محاسبه هیدروگراف واحد، فضای حالت حاکم بر وقایع بارش - رواناب در مدل اندازه‌گیری فیلتر کالمن، تعیین گردید. که نتایج کاربرد آن را می‌توان در اصلاح مقادیر رواناب و اوج‌ها به وضوح مشاهده نمود.

با توجه با فرایند بازگشتی فیلتر کالمن، دقت بالای روش موجک متقاطع جهت تفکیک فاز و ایجاد تاخیرهای زمانی و استفاده از برنامه‌ریزی خطی، تلفیق این سه روش (KF-LP-CW) نتایج رضایت‌بخشی را به دنبال داشته است. لذا با توجه به تحلیل معیارهای ارزیابی، روش مذکور از عملکرد مناسب‌تری نسبت به ۲ روش دیگر برخوردار است.

دو روش مورد مطالعه مبتنی بر خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه (GIUH و GIUH-Nash) در تلفیق با روش موجک متقاطع نتایج رضایت‌بخشی را به دنبال داشتند. این امر بیانگر ماهیت نسبتاً مشابه حوضه در پاسخ به بارش و ایجاد رواناب می‌باشد. و از آنجا که اساس این دو روش بر خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه استوار هستند، لذا می‌توان از این روش‌ها نیز به عنوان فضای حالت در سیستم فیلتر کالمن و تلفیق آن با روش موجک متقاطع استفاده نمود. این امر در مطالعات اسواین (Swaina., 2015) نیز قابل مشاهده است که از نتایج حاصل از این روش را به عنوان تابع انتقال

- based GIUH for catchments in two Indian river basins, *Journal of Hydrology*. 528: 463-489.
- Shoaib, M.Y., Shamseldin, A.W., Melville, B. 2014. Comparative study of different wavelet based neural network models for rainfall-runoff modeling, *Journal of Hydrology*. 515: 47-58.
- Tejaswini, N.B., Shetty, A., Hegde, V.S. 2011. Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management-A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka. *Catena*. 87: 52-59.
- Todini, E. 1978. Mutually interactive state parameter (MISP) estimation. Application of Kalman Filter, *Proceeding of American Geophysical Union (AGU) Chapman Conference, University of Pittsburgh, Pittsburgh*: 135-151.
- Torrence, C and Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79.1: 61-78.
- Wu, C.M and Huang, W.C. 1990. Effect of observability in Kalman filtering on rainfall-runoff modeling. *Taiwan Water Conservancy Quarterly, Taiwan*. 38: 37-47.
- Lee, Y.H and Singh, V.P. 1999. Tank model using kalman filter, *Journal of hydrologic engineering*. 4: 344-349.
- Liu, Y., Brown, J., Demargne, J and Jun Seo, D. 2011. A wavelet-based approach to assessing timing errors in hydrologic predictions, *Journal of Hydrology*. 397:210-224.
- Mizumura, K. 1984. Application of kalman filter to oceanic data, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*. 110:334-343.
- Nakken, M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modelling and Software*. 14: 283-295.
- Nayak, P.C., Venkatesh, B., Krishna, B and Jain, S.K. 2013. Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. *Journal of Hydrology*. 493: 57-67.
- Rodriguez-Iturbe, I and Valdes, J.B. 1979. The geomorphic structure of hydrologic response, *Water Resource. Research*. 18.4:877-886.
- Rosso, R. 1984. Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resources Research*. 20: 914-920.
- Sagar Rohidas Chavan, S., Srinivas, V.V. 2015. Effect of DEM source on equivalent Horton-Strahler ratio

Application of Cross Wavelet - Kalman Filter and GIUH Methods in Modeling of Rainfall-Runoff Events

F. Mohammadi ^{*1}, A. Fakherifard ², M. A. Ghorbani ³, Y. Dinpazhoh ⁴, S. Shahmorad ⁵

Recived: Dec.11, 2017

Accepted: Jun.16, 2018

Abstract

The existence of high uncertainty and the nonlinearity of rainfall and runoff relationships signalize the vacancy of many studies in this direction. The present study is conducted with the aim of simulating and predicting the watershed's behavior based on the recognition of a part of the relationships prevailing on this complex system. In this study, Cross wavelet transform methods, Kalman Filter and Linear Programming (KF-LP_CW) were used to analysis of 9 compound events of rainfall and runoff in the Sufi Chai watershed with about 250.65 km² area. Then, to compare the performance of this method, the results were compared with geomorphologic unit hydrograph combination with Cross wavelet (GIUH-CW) and geomorphologic unit hydrograph based on Nash models combination with Cross wavelet (GIUH-Nash-CW). Considering the satisfactory performance of all three models, the final performance of these methods was finally discussed using the evaluation criteria used in the research. Results showed that the KF-LP_CW method simulated the compound events in the calibration and validation stage with a mean square error (MSE) of 2.47 and 3.2, respectively. In the case of time to peak, the mean average relative error (MARE) for the three studied methods was 0.05 and 0.037 for the calibration and validation stages, respectively. The same criteria for peak discharge and base time were 0.07 and 0.06 respectively for the two calibration stages, and 0.18 and 0.07 in the two validation stages. This indicates better performance of the methods in the estimation of time to peak, base time, and peak discharge, respectively.

Keywords: Cross-Wavelet, GIUH, Kalman Filter, Rainfall-Runoff

1- PhD Candidate of water Resources Engineering. Water Engineering Department. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

2- Full Professor of Water Engineering Department. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

3- Associate Professor of Water Engineering Department. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

4- Associate Professor Water Engineering Department. Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

5- Full Professor of Mathematical Department. Faculty of Mathematical Sciences. University of Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: 83.mohammadi@gmail.com)