

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو دسته داده شامل داده‌های بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد (۲۰۱۶-۱۹۶۱) و داده‌های دبی روزانه ایستگاه دبی‌سنجی چم انجیر واقع در پایاب حوزه آبخیز رودخانه خرم‌آباد (۲۰۱۶-۱۹۶۱) استفاده شد. همچنین به منظور انجام این پژوهش از نسخه اصلاح‌شده تبدیلات موجک گسسته (DWT) تحت عنوان تبدیل موجک گسسته با بیشینه همپوشانی (MODWT) استفاده شد. بنابراین در این مطالعه جهت تحلیل چندنمایی موجکی (تحلیل نوسان‌ها)، تحلیل واریانس موجکی و شناسایی رابطه دینامیکی و همبستگی چندمقیاسی بین سیگنال بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد از رویکرد موجک گسسته با بیشینه همپوشانی بر پایه تابع موجک مادر سیملت ۴ (sym4) استفاده شد. بدین ترتیب که سری زمانی بارش و جریان رودخانه با استفاده از MODWT به ۱۱ سطح مقیاسی تجزیه شدند. شایان ذکر است که از تجزیه سیگنال توسط MODWT، دو گونه ضریب شامل ضرایب موجکی (جزییات (D)) و ضرایب مقیاسی (کلیات (S)) حاصل می‌شود. ضرایب مقیاسی نشان‌دهنده ضرایب تبدیل موجک با تفکیک بالا (بسامد پایین) هستند که روند کلی و هموار را در سری زمانی بارش و جریان رودخانه نشان می‌دهند. در مقابل، ضرایب موجکی (بسامد بالا) اطلاعات جزئی روندها و تناوب‌های معینی از سری‌های زمانی هیدرولوژیکی را ارائه می‌دهند. هر مؤلفه D یک دوره زمانی معین یا مقیاس زمانی مشخصی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

تحلیل چندنمایی سیگنال بارش و جریان رودخانه از یک تا ۱۳ سطح تجزیه موجکی نشان از سیمای بسیار مشخص نوسان‌های نیم‌سال نسبت به سایر مقیاس‌های زمانی دارد. همچنین به‌رغم نوسانی‌تر بودن سیگنال بارش در مقیاس‌های زمانی روزانه تا دو ماهه نسبت به سیگنال جریان رودخانه، اما برخی از نقاط اوج آن‌ها متناظر باهم هستند. این نقاط اوج نشان‌دهنده سیلاب و بارش‌های سنگینی هستند که در مقیاس روزانه اتفاق افتاده‌اند: از سویی نوسان‌های بسیار متمایزی با چرخه‌های ۱۱ و ۲۲ ساله در سیگنال آن‌ها شناسایی شد که به ترتیب متناظر با چرخه‌های شناخته‌شده تعداد لکه‌های خورشیدی و چرخه هیل هستند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس این دو پدیده تا ۱۱ سطح تجزیه موجکی نشان از شباهت کلی رفتار واریانس موجکی آن‌ها در مقیاس‌های زمانی روزانه تا چند ساله دارد اما

تحلیل همبستگی چندمقیاسی و واریانس موجکی سری زمانی بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد

حمید میرهاشمی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

DOI: 10.22034/18.64.39

چکیده مبسوط

مقدمه

به‌رغم تأثیرپذیری شدید جریان رودخانه از مقدار و ماهیت بارشی که در حوزه آبخیز رودخانه اتفاق می‌افتد، اما رابطه بین این دو متغیر هیدرو-اقلیمی به خصوص در حوزه‌های مناطق کوهستانی از دینامیک پیچیده‌ای در دامنه بسامد و شدت برخوردار است. این دینامیک پیچیده نه تنها به سبب دخالت مؤلفه‌های متعدد طبیعی و انسانی بوده که هرکدام از رفتار چندمقیاسی متفاوتی برخوردارند، بلکه ناشی از تغییر این مؤلفه‌ها در طی زمان نیز است. به این ترتیب که همگام با تغییر این مؤلفه‌ها، شدت اندرکنش و تأثیر آن‌ها در حوزه آبخیز دستخوش تغییر شده و دینامیک رفتاری جریان رودخانه نیز متحمل تغییر می‌شود. از این گذشته، بارش به عنوان مهم‌ترین عامل محرک جریان رودخانه به شمار می‌رود که متأثر از سازوکارهای متفاوتی است که هرکدام از این سازوکارها در افق زمانی متفاوتی فعال‌اند. چنین سازوکارهای متفاوتی موجب شده‌اند که سری زمانی بارش ضمن دارا بودن رفتاری پیچیده و ناپایستا از رفتاری چندمقیاسی نیز برخوردار باشد. به طوری که شدت و زمان پاسخ جریان رودخانه نسبت به مقدار بارش ضمن آنکه از یک الگوی کلی و خطی پیروی نمی‌کند بلکه در مقیاس‌های زمانی مختلف، الگوهای متفاوتی را نشان می‌دهد. با این تفاسیر، سری زمانی بارش و جریان رودخانه حاوی نوسان‌های کوچک و بزرگی هستند. بنابراین هدف از انجام این مطالعه عبارت از ۱- شناسایی نوسان‌های بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد در مقیاس‌های زمانی مختلف. ۲- آشکارسازی سهم هرکدام از افق‌های زمانی کوچک - بزرگ در تعیین واریانس جریان رودخانه و بارش روزانه.

۱- نویسنده مسئول و استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
آدرس ایمیل: mirhashemi.h@lu.ac.ir

آهنگ تغییر واریانس جریان رودخانه به ازای افزایش مقیاس زمانی، تفاوت از آهنگ تغییر بارش است. از سویی، بیشترین تغییرپذیری بارش به مقیاس روزانه (۸۵ درصد از کل واریانس) اختصاص دارد. در صورتی که بیشترین تغییرپذیری جریان رودخانه به صورت یک جریان حدی مطلق در چرخه سالانه قرار دارد. بنابراین، نوسانهای سریع و متوسط، به ترتیب سهم بسیار مهمی در تغییرپذیری سیگنال بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد برعهده دارند. همبستگی موجکی بین بارش و جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف یک رابطه مثبت معنادار در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین این دو متغیر را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

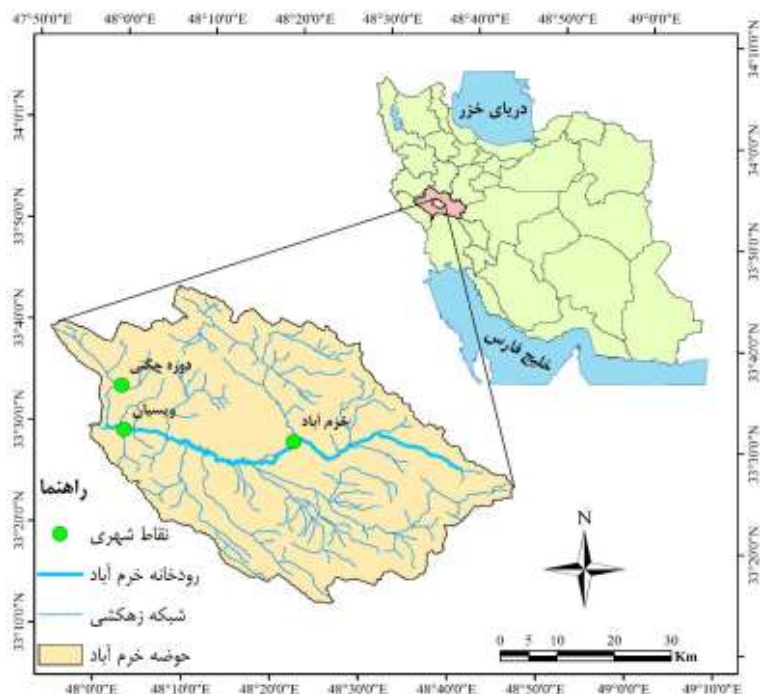
با تجزیه موجکی واریانس کلی سیگنال بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد مشخص شد که شدت تغییرپذیری این دو پدیده متناسب با تغییر مقیاس زمانی به شدت تغییر می‌کنند. به طوری که شدیدترین نوسان‌های بارش و جریان رودخانه به ترتیب در مقیاس روزانه - ماهانه و سالانه اتفاق می‌افتند. بنابراین نوسان‌های جریان رودخانه به‌رغم آنکه متأثر از نوسان‌های بارش است اما به طور شدیدی از سازوکارهایی تأثیر می‌پذیرد که در مقیاس‌های زمانی ۶-۸ ماهه با چرخه سالانه عمل می‌کنند. همچنین در مقیاس‌های زمانی چندساله نیز نقاطی از مقادیر بالا در نوسان بارش و جریان رودخانه آشکار شدند که چرخه سینوسی را نشان می‌دهند. این نقاط نوسانی در دوره‌های زمانی ۱۱ و ۲۲ ساله وجود دارند. به طورکلی، نتایج این مطالعه نشان داد که بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد از نوسان‌های روزانه، هفتگی، ماهانه، سالانه و چندین ساله برخوردارند که این نوسان‌ها نقش مهمی در چگونگی رابطه بین بارش و جریان رودخانه ایفا می‌کنند. چنانکه رابطه بین بارش و جریان این رودخانه از الگوی چندمقیاسی برخوردار بوده که در صورت تجزیه سیگنال‌های آن‌ها می‌توان چرخه‌های این نوسان‌ها که در ساختار کلی سیگنال گاهاً به صورت نویزی و بی‌نظم هستند را استخراج کرد و به این ترتیب ضمن شناسایی آن‌ها به سازوکار ایجادکننده آن‌ها نیز آگاهی پیدا کرد.

کلیدواژه‌ها: بارش، چندنمایشی، موجک، نوسان.

مقدمه

به‌رغم تأثیرپذیری شدید جریان رودخانه از مقدار و ماهیت بارشی که در حوزه آبخیز رودخانه اتفاق می‌افتد، اما رابطه بین این دو متغیر هیدرو - اقلیمی به خصوص در حوزه‌های مناطق کوهستانی از دینامیک پیچیده‌ای در دامنه بسامد و شدت برخوردار است. این دینامیک پیچیده نه تنها به سبب دخالت مؤلفه‌های متعدد طبیعی و انسانی بوده که هرکدام از رفتار چندمقیاسی متفاوتی برخوردارند بلکه ناشی از تغییر این مؤلفه‌ها در طی زمان نیز است. به این ترتیب که همگام با تغییر این مؤلفه‌ها، شدت اندرکنش و تأثیر آن‌ها

در حوزه آبخیز دستخوش تغییر شده و دینامیک رفتاری جریان رودخانه نیز متحمل تغییر می‌شود [۲]. از این گذشته، بارش به عنوان مهمترین عامل محرک جریان رودخانه به شمار می‌رود [۵۲] که متأثر از سازوکارهای متفاوتی است که هرکدام از این سازوکارها در افق زمانی متفاوتی فعال‌اند [۳۰]. چنین سازوکارهای متفاوتی موجب شده‌اند که سری زمانی بارش ضمن دارا بودن رفتاری پیچیده و نایستا [۲۴] از رفتاری چندمقیاسی نیز برخوردار باشد [۷، ۲۶، ۲۹، ۳۸]. به طوری که شدت و زمان پاسخ جریان رودخانه نسبت به مقدار بارش ضمن آنکه از یک الگوی کلی و خطی پیروی نمی‌کند بلکه در مقیاس‌های زمانی مختلف، الگوهای متفاوتی را نشان می‌دهد. با این تفاسیر، سری زمانی بارش و جریان رودخانه حاوی نوسان‌های کوچک و بزرگی هستند [۱۶] که تنها با کاربرد روش‌های پیشرفته‌ای همچون روش‌های فرکتالی [۱۰، ۱۴، ۲۰، ۳۰] و چندفرکتالی [۳۲، ۴۳] و موجک‌ها [۴، ۱۹، ۵۱] می‌توان به ماهیت چنین سیگنال‌هایی پی برد و اطلاعات پنهان آن‌ها را استخراج کرد. در این راستا، با توجه به اهمیت فرایند بارش و جریان رودخانه، از روش‌های متعددی برای آشکارسازی نوسان‌ها، رفتار چندمقیاسی و همچنین شناخت چگونگی ارتباط بین آن‌ها همچون تحلیل همبستگی و تحلیل طیفی - فوریه [۲۲، ۲۸]، روش‌های جعبه سیاه همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی [۶، ۱۷، ۳۳، ۴۱]، تحلیل فرکتالی - چندفرکتالی [۱۳، ۳۲، ۴۷] موجک‌ها [۵، ۵۰] استفاده شده است. با این حال مشخص شده که روش‌های هوش مصنوعی و سایر روش‌های خطی و غیرخطی در برخورد با سری‌های زمانی نایستا، ضعیف عمل می‌کنند [۱، ۳]. از سویی، تبدیل فوریه به‌عنوان یک روش متداول برای تشخیص اطلاعات پنهان به شمار می‌رود [۳۹] که اطلاعات مربوط به فرکانس‌های موجود در یک سیگنال را ارائه می‌دهد [۹] ولی از زمان رخداد سیگنال هیچ‌گونه اطلاعی نمی‌دهد. زیرا در تبدیل فوریه، سیگنال از حوزه زمان به محدوده بسامد منتقل می‌شود ولی چون روی شکل سینوسی واقع شده، اطلاعات زمانی بعد از انتقال از دست می‌رود که در صورت نایستا بودن سیگنال، آگاهی داشتن از زمان رخداد یک بسامد اهمیت پیدا می‌کند [۴۲]. در نتیجه، به سبب نایستایی سری زمانی بارش و جریان رودخانه، تحلیل طیفی (فوریه) اطلاعاتی در مورد رخداد‌های سیل یا فرایندهای متناوب در سری زمانی بارش و جریان رودخانه فراهم نمی‌کند [۱۹]؛ بنابراین، به‌منظور غلبه بر محدودیت‌هایی که در کاربرد تحلیل فوریه وجود دارد، ایده موجک در سال ۱۹۸۴ توسط گراسمن معرفی شد [۲۵]. از آنجا که موجک‌ها در محدوده زمان و فرکانس، سیگنال را تجزیه می‌کنند، بنابراین رویکرد موجک‌ها برای تجزیه سری‌های زمانی نایستا بسیار کارآمد است [۴، ۲۵، ۴۸، ۵۱]. به عبارتی، تبدیل موجک، براساس زمان و بسامد، یک سری زمانی را به تعداد کوچکی از سری‌های زمانی‌های تجزیه می‌کند که هرکدام از این سری‌های زمانی مبتنی بر افق زمانی یا مقیاسی متفاوت‌اند که



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی رودخانه خرم‌آباد در حوزه آبخیز خرم‌آباد

Fig 1. Geographical location of Khorramabad river in the Khorramabad Watershed

پرباب‌ترین و کم‌آب‌ترین ماه‌های این رودخانه به شمار می‌روند. از دیدگاه زمین‌شناسی، رسوبات آبرفتی عمدتاً در بخش‌های میانی حوضه و سازندهایی مانند کشکان، بختیاری، گورپی، امیران، آسماری و ... نیز در محدوده این حوضه مشاهده می‌شوند [۴۶]. راه‌های ارتباطی خرم‌آباد به بروجرد و خرم‌آباد - خوزستان از محدوده این حوضه عبور می‌کنند (شکل ۱).

روش پژوهش

در این پژوهش از دو دسته داده شامل داده‌های بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد (۲۰۱۶-۱۹۶۱) و داده‌های دبی روزانه ایستگاه دبی‌سنجی چم انجیر واقع در پایاب حوزه آبخیز رودخانه خرم‌آباد (۲۰۱۶-۱۹۶۱) استفاده شد. همچنین به منظور انجام این پژوهش از نسخه اصلاح‌شده تبدیلات موجک گسسته (DWT) تحت عنوان تبدیل موجک گسسته با بیشینه همپوشانی (MODWT¹) استفاده شد زیرا یکی از محدودیت‌های تبدیل موجک گسسته آن است که تعداد مشاهدات باید مضربی از ۲ باشد. همچنین، تابع تبدیل موجک گسسته نسبت به نقطه شروع سری زمانی حساس است [۲۱]. از سوی، تبدیل موجک با بیشینه همپوشانی، نسخه اصلاح‌شده تبدیل موجک گسسته است که می‌تواند در مورد سری‌های زمانی با هر تعداد مشاهده بکار می‌رود. برخلاف تبدیل موجک گسسته که پس از هر مرحله از انجام الگوریتم، سری زمانی اصلی به دو سری با طول نصف سری مرحله قبل تقسیم می‌شود، در این تبدیل در هر مرحله اندازه سری جزئیات و سری کلیات برابر با سری اصلی است. این رویکرد اجازه می‌دهد تا داده‌های تجزیه‌شده در

بدین ترتیب بسیاری از خصوصیات سری زمانی مانند روند، دوره‌ها و گسستگی و نقاط تغییر، معین می‌شوند [۱۲، ۱۸، ۳۴، ۴۵]. چنانکه مشخص است، تبدیلات موجک از قابلیت بالایی در شناسایی ماهیت و آشکارسازی سازوکارهای داخلی و اطلاعات پنهان در سری‌های زمانی بارش و جریان رودخانه که دارای رفتاری نایستا و چندمقیاسی هستند برخوردارند. بنابراین هدف از انجام این مطالعه عبارت از ۱- شناسایی نوسان‌های بارش و جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف. ۲- آشکارسازی سهم هر کدام از افق‌های زمانی کوچک - بزرگ در تعیین واریانس جریان رودخانه و بارش روزانه. ۳- شناسایی همبستگی چندمقیاسی و رابطه دینامیکی بین سری‌های زمانی جریان و بارش روزانه.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوضه خرم‌آباد با مساحت ۲۵۰۳ کیلومترمربع در مرکز استان لرستان و غرب ایران واقع شده است. رودخانه اصلی حوزه، رودخانه خرم‌آباد نام دارد و طول آن حدود ۶۴ کیلومتر است. این رودخانه از شهر خرم‌آباد شروع و پس از مسافتی در حدود ۵۰ کیلومتر در روستایی به نام چم‌باغ در شهرستان چگنی به رودخانه کاکارضا پیوسته و آنگاه به رودخانه کشکان که از سرشاخه‌های اصلی حوزه آبریز کرخه است، می‌ریزد [۲۷]. میانگین بارش سالانه حوضه براساس آمار ایستگاه سینوپتیک هواشناسی خرم‌آباد برابر با ۴۹۵ میلی‌متر است. میانگین جریان ماهانه رودخانه خرم‌آباد بالغ بر ۹/۶۷ مترمکعب بر ثانیه است که فروردین و شهریور به ترتیب به‌عنوان

1. Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform

زمانی است. برحسب تعریف، انرژی در یک سری زمانی (x) برابر با جمع مقادیر مربعات آن است (رابطه ۳).

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{x} = \|\mathbf{x}\|^2 \quad (3)$$

در رابطه ۳: T عملگر ترانهاده است و $\|\mathbf{x}\|$ اشاره به نرم اقلیدسی سری زمانی x دارد. این تجزیه بیان می‌کند که رابطه ۴ برقرار است. بنابراین انرژی در سری زمانی در ضرایب مقیاسی و موجکی MODWT حفظ می‌شود. حال اگر $\hat{\sigma}_x^2$ واریانس نمونه سری‌های زمانی باشد (رابطه ۵). رابطه ۶ بنابر رابطه ۵ ایجاد می‌شود.

$$\|\mathbf{x}\|^2 = \sum_{j=1}^{J_0} \|w_j\|^2 + \|v_{J_0}\|^2 \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 - \bar{x}^2 \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{J_0} \|w_j\|^2 + \frac{1}{N} \|v_{J_0}\|^2 - \bar{x}^2 \quad (6)$$

در رابطه ۵: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n$ میانگین سری زمانی است. در رابطه ۶ به عبارت $\frac{\|w_j\|^2}{N} = \hat{v}_j^2$ به عنوان واریانس موجکی اشاره شده است. بنابراین \hat{v}_j^2 را می‌توان به عنوان یک عبارت مناسب برای واریانس نمونه ضرایب موجکی سطح j لحاظ کرد. از سویی، $\frac{1}{N} \|v_{J_0}\|^2 - \bar{x}^2$ واریانس نمونه ضرایب مقیاسی بوده زیرا v_{J_0} میانگین متحرک x است و بنابراین میانگین نمونه \bar{x} را دارد. در نتیجه، معادله ۶ تحلیل واریانس مبتنی بر مقیاس را ارائه می‌دهد که در آن واریانس به $J_0 + 1$ قطعه شکسته می‌شود.

تحلیل همبستگی موجکی MODWT

از آنجایی که ایده اساسی واریانس موجکی مبتنی بر جایگزینی مفهوم واریانس در مقیاس‌های زمانی مختلف به جای واریانس کلی است [۳۶] بنابراین چنین کاربردی را برای کواریانس موجکی نیز می‌توان متصور شد. کواریانس موجکی، کواریانس نمونه را در میان مقیاس‌های زمانی مختلف تجزیه می‌کند. به عبارتی، کواریانس موجکی در یک مقیاس زمانی معین $\lambda_j = 2^{j-1}$ سهم این مقیاس را در تعیین کواریانس بین دو متغیر نشان می‌دهد. کواریانس موجکی در مقیاس زمانی λ_j به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود [۴۹].

$$\text{cov}_{xy}(\lambda_j) = \frac{1}{N_j} \sum w_j^x w_j^y \quad (7)$$

در رابطه ۷: w_j^x و w_j^y به ترتیب ضرایب موجکی MODWT متغیر x و y در مقیاس زمانی λ_j هستند. از آنجایی که کواریانس وابسته به واریانس سری‌های زمانی است بنابراین طبیعی است که مفهوم همبستگی موجکی را می‌توان برحسب کواریانس/واریانس تعریف کرد. همبستگی موجکی به سادگی از طریق کواریانس موجکی و واریانس موجکی برای دو متغیر x و y بنا نهاده شده است. در نتیجه، تخمین گر همبستگی موجکی MODWT به صورت رابطه ۸ بیان شده است.

مقیاس‌های مختلف اعم از روند و جزئیات سری زمانی با همدیگر و سری زمانی اصلی به صورت هم‌تراز استخراج شوند. همچنین MODWT نسبت به جابجایی در زمان به صورت دوار سری زمانی حساس نیست و تخمین گر واریانس در این موجک کارتر از DWT است [۳۶]. چنانکه بکارگیری این ابزار، امکان برقراری رابطه بین متغیرها را به صورت دینامیک و پیگیری تغییرات آن‌ها را در طی زمان از منظر شدت و جهت تغییرات و تحلیل‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت و تحلیل زمان - بسامد را مهیا می‌کند. بنابراین در این مطالعه جهت تحلیل چندنمایشی موجکی (تحلیل نوسان‌ها)، تحلیل واریانس موجکی و شناسایی رابطه دینامیکی و همبستگی چندمقیاسی بین سیگنال بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد از رویکرد موجک گسسته با بیشینه همپوشانی بر پایه تابع موجک مادر سیملت ۴ (sym4) استفاده شد. بدین ترتیب که سری زمانی بارش و جریان رودخانه با استفاده از MODWT به ۱۱ سطح مقیاسی تجزیه شدند. شایان ذکر است که از تجزیه سیگنال توسط MODWT، دو گونه ضریب شامل ضرایب موجکی (جزئیات (D)) و ضرایب مقیاسی (کلیات (S)) حاصل می‌شود. ضرایب مقیاسی نشان‌دهنده ضرایب تبدیل موجک با تفکیک بالا (بسامد پایین) هستند که روند کلی و هموار را در سری زمانی بارش و جریان رودخانه نشان می‌دهند. در مقابل، ضرایب موجکی (بسامد بالا) اطلاعات جزئی روندها و تناوب‌های معینی از سری‌های زمانی هیدرولوژیکی را ارائه می‌دهند. هر مؤلفه D یک دوره زمانی معین یا مقیاس زمانی مشخصی را نشان می‌دهد.

تحلیل چند نمایشی موجکی (MRA)

این نوع از تجزیه موجکی، یک تجزیه جمع‌پذیر است که در ادبیات موجکی به عنوان تحلیل چندنمایشی شناخته می‌شود. این تجزیه بیان می‌کند که می‌توان x را بصورت مجموعه‌ای از $J_0 + 1$ سری زمانی جدید مبتنی بر مقیاس زمانی مشخصی تجزیه کرد [۳۶].

$$D_j = w_j^T w_j \quad , \quad S_{J_0} = v_{J_0}^T v_{J_0} \quad (1)$$

در رابطه فوق: D_j و S_{J_0} به ترتیب بردارهای N بُعدی زامین سطح جزئیات و J_0 امین سطح کلیات است. اکنون رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$x = \sum_{j=1}^{J_0} D_j + S_{J_0} \quad (2)$$

که D_j یک سری زمانی است که نوسان‌ها را در مقیاس زامین سطح تجزیه موجکی منعکس می‌کند در صورتی که S_{J_0} سری زمانی است که میانگین مقیاس J_0 امین سطح تجزیه موجکی را منعکس می‌کند [۳۶].

تحلیل واریانس از طریق واریانس موجک

تحلیل واریانس در MODWT مبتنی بر تجزیه انرژی در سری

$$\rho_{xy} \equiv \frac{\text{cov}_{xy}(\lambda_j)}{\hat{v}_x(\lambda_j)\hat{v}_y(\lambda_j)} \quad (8)$$

در این رابطه \hat{v}_y^2 و \hat{v}_x^2 به ترتیب واریانس‌های موجکی MODWT برای متغیرهای x و y هستند [۳۶، ۳۷، ۴۹]. شایان ذکر است که پریسوال [۳۷]، ویتچر [۴۸] و ویتچر [۴۹] تخمین‌گر همبستگی موجکی MODWT را به عنوان رویکردی مناسب جهت تخمین رابطه بین دو سری زمانی معرفی کرده‌اند.

نتایج

شاخص‌های آماری گرایش مرکزی سری زمانی بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد نشان می‌دهند که به‌رغم بیشتر بودن میانگین و واریانس جریان رودخانه نسبت به سری زمانی بارش، اما ضریب تغییرات یا به عبارتی بی‌نظمی بارش بیشتر از جریان رودخانه است (جدول ۱). بنابراین بارش از یک الگوی نوسانی‌تر نسبت به جریان رودخانه برخوردار است.

از سویی به منظور رهیافت به شناخت و استخراج اطلاعات پنهانی که در سری‌های زمانی یادشده وجود دارد با کاربرد آنالیز موجک گسسته با بیشینه همپوشانی، سری زمانی بارش و جریان رودخانه تا ۱۱ سطح بسامد تجزیه شدند به این ترتیب که هرکدام از این زیرسیگنال‌های بسامدی از طریق D بیانگر مقیاس زمانی متفاوتی هستند که با محاسبه واریانس و همبستگی بین بارش و جریان رودخانه این سیگنال‌ها ضمن آشکارشدن سهم هرکدام از این مقیاس‌های زمانی در تعیین واریانس کلی، مشخص خواهد شد که رابطه بین بارش و جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی متفاوت، چگونه است. به عبارتی با این رویکرد، واریانس کلی و همبستگی بین بارش و جریان رودخانه تجزیه شدند که بدین ترتیب مشخص خواهد شد که سری زمانی در مقیاس‌های زمانی مختلف چگونه تغییر می‌کنند.

تحلیل چندنمایشی بارش و جریان رودخانه با کاربرد MODWT

تحلیل چندنمایشی سیگنال بارش و جریان رودخانه از یک تا ۱۳ سطح تجزیه (D13-D1) منتج به آشکارشدن رفتار نوسان‌های این دو سیگنال در مقیاس‌های زمانی متفاوت شده است (شکل ۲). به عبارتی، سطوح متفاوت این تحلیل چندنمایشی به عنوان پنجره

زمانی متفاوتی به شمار می‌روند که فرایندهای دخیل در آن مقیاس زمانی را بازنمود می‌کنند. سیگنال‌های جریان رودخانه و بارش از سطح یک تا سطح شش تجزیه موجکی که مبتنی بر مقیاس‌های زمانی روزانه تا دو ماه است چندان دستخوش تغییر نشده‌اند. چنانکه از این سطوح مقیاسی مشخص است به‌رغم نوسانی‌تر بودن سیگنال بارش نسبت به سیگنال جریان رودخانه، اما برخی از نقاط اوج آن‌ها متناظر باهم هستند. این نقاط اوج نشان‌دهنده سیلاب و بارش‌های سنگینی هستند که در مقیاس روزانه اتفاق افتاده‌اند: به طور نمونه سیلاب آوریل ۲۰۱۶ (فروردین/ اردیبهشت سال ۱۳۹۵) در انتهای نمودار و بارش و سیلاب دسامبر ۱۹۷۸ (آذرماه ۱۳۵۷). چنانکه از نمودارهای تحلیل چندنمایشی مشخص است بیشینه نوسان جریان رودخانه برای سیلاب ۱۹۷۸ در اولین سطح موجکی نیز مشخص است. این بدین معنی است که در مقیاس زمانی روزانه، سطح آب به طور شدیدی افزایش یافته است. در صورتی که نوسانی که این بارش نسبت به سایر روزها در سری زمانی بارش موجب شده، در مقیاس زمانی ماهانه بارزتر است. به عبارتی بارش‌های مداومی که چندین روز ادامه داشته‌اند موجب رخداد چنین سیلابی شده‌اند که به این ترتیب جریان رودخانه نیز با یک تأخیر زمانی نسبت به شروع بارش‌ها، به نقطه اوج رسیده است.

به طور کلی، سیمای سیگنال‌های بارش و جریان رودخانه از مقیاس روزانه تا مقیاس دو ماه چندان تغییری پیدا نمی‌کنند و تنها شدت نوسان‌های آن‌ها با افزایش مقیاس زمانی متحمل تغییر شده که این نشان‌دهنده نقش و وزن بالایی است که سیلاب‌ها و بارش‌های سنگین روزانه در سیمای ماهانه سیگنال بارش و جریان رودخانه برعهده دارند. از سویی از شدت نوسان‌های بارش و جریان رودخانه در هفتمین سطح بسامدی که متناظر بر دوره‌های زمانی نیم‌سال است به شدت کاسته شده و نوسان‌ها مشخص‌تر شده‌اند. به عبارتی تغییرپذیری این دو متغیر در دوره‌هایی که چرخه نیم‌سال را نشان می‌دهد نسبت به چرخه‌های کمتر و بزرگتر از خود، کاهش یافته و شباهت بیشتری نسبت به حالت سینوسی پیدا می‌کنند. بنابراین بارش و جریان رودخانه از دوره‌های شش ماهه پرآب و کم‌آب بسیار متمایزی برخوردار هستند. سطوح هشت و نه، سال‌های خشک و تر را بازنمود می‌کنند [۱۹]. در مقیاس‌های زمانی چندساله نیز نقاطی از مقادیر بالا در نوسان بارش و جریان رودخانه آشکار شده‌اند که از چرخه سینوسی ۱۱ و ۲۲ ساله برخوردارند.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری سری زمانی بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد (۱۹۶۱-۲۰۱۶)

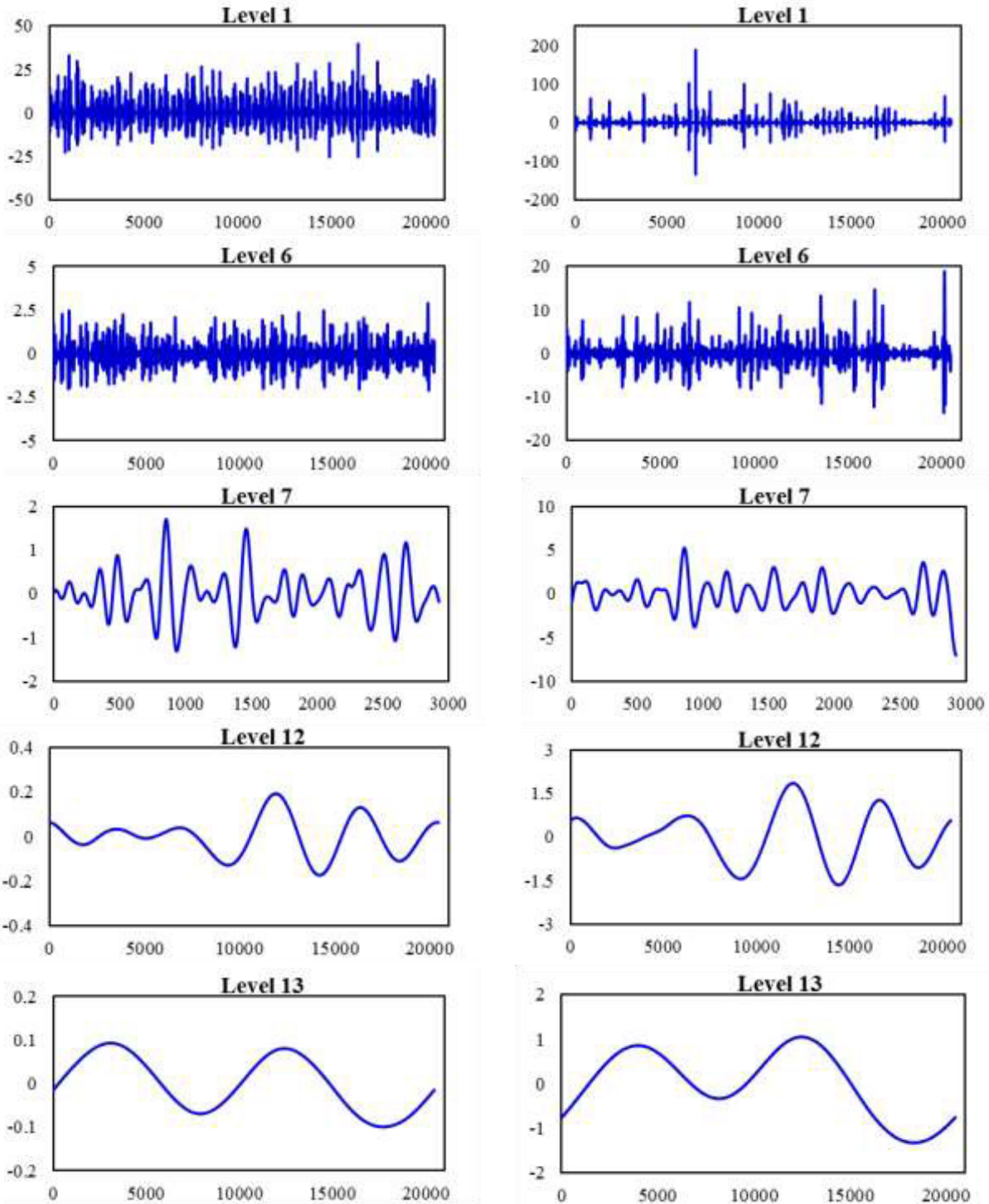
Table 1. Statistical characteristics of the time series of precipitation and flow of Khorramabad River (1961-2016)

جریان رودخانه River flow		بارش precipitation		متغیر Variable	
ضریب تغییرات CV (%)	واریانس Variance (m3)	ضریب تغییرات (%) CV	واریانس Variance (mm)	میانگین Mean (mm)	شاخص آماری statistical
124	140.7	364	24.3	1.36	Value مقدار

واریانس موجکی MODWT

یکی از مهمترین کاربردهای MODWT تجزیه مقیاسی واریانس داده‌هاست. بدین ترتیب که مقدار واریانس داده‌ها را در مقیاس‌های متفاوت زمانی آشکار می‌کند. در این خصوص سری زمانی بارش و جریان رودخانه با تابع موجک مادر sym4 تا ۱۱ سطح فرکانسی تجزیه شدند. بنابراین ۱۱ واریانس ضریب موجکی و یک واریانس

ضریب مقیاسی بدست آمد که مجموع این واریانس‌ها برابر با واریانس کل سری زمانی است. با وجود اینکه سیمای کلی تغییر واریانس موجکی بارش و جریان رودخانه برای مقیاس‌های زمانی روزانه تا چندین ساله نشان از شباهت کلی رفتار واریانس موجکی آن‌ها دارد اما آهنگ تغییر واریانس جریان رودخانه به ازای افزایش مقیاس زمانی، متفاوت از



شکل ۲- تحلیل چندنمایشی سری زمانی جریان رودخانه (نمودارهای سمت راست) و سری زمانی بارش (نمودارهای سمت چپ)

Fig 2. Multiresolution analysis of river flow (right graphs) and precipitation time series (left graphs)

در صورتی که نوسان‌های متوسط از بیشترین سهم در تغییرپذیری جریان رودخانه برخوردارند.

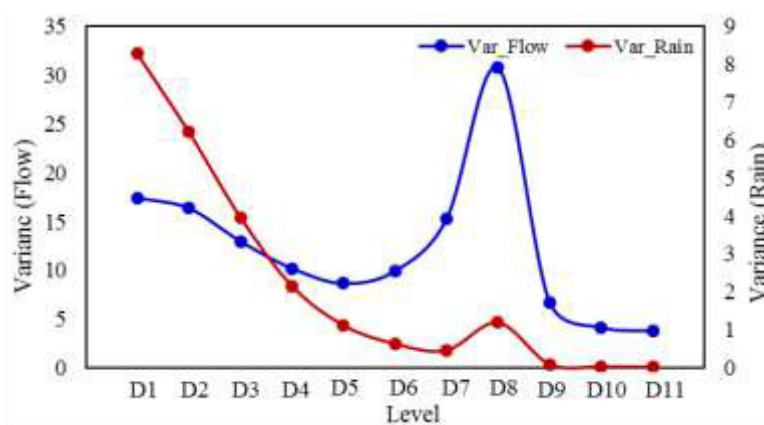
همبستگی چندمقیاسی و دینامیکی بین بارش و جریان رودخانه

علاوه بر کشف نوسان‌های بارش و جریان رودخانه، شناسایی چگونگی رابطه بین بارش با جریان رودخانه نیز اهمیت دارد. بنابراین مشابه واریانس موجکی که نشان‌دهنده سهمی از واریانس کلی است که به هر مقیاس زمانی خاص اختصاص دارد، کواریانس و همبستگی موجکی نیز در هر زمان - مقیاس، معرف سهمی از کواریانس یا رابطه بین بارش و جریان رودخانه است که به آن مقیاس زمانی خاص تعلق دارد. بنابراین با این رویکرد مشخص خواهد شد که رابطه بین این دو متغیر در هر مقیاس زمانی چگونه است.

کواریانس کلی بین بارش و جریان رودخانه به مقدار $24/9$ بدست آمد. از سویی، کواریانس موجکی MODWT بین این دو متغیر از سطح یک تا سطح ۱۱ حساب شد که نتیجه آن در شکل ۵ نمایان است. چنانکه مشخص است، آهنگ تغییر کواریانس موجکی شباهت بسیار نزدیکی به آهنگ تغییر واریانس موجکی جریان رودخانه دارد و این به سبب وزن داده‌های جریان رودخانه در تعیین چگونگی این رابطه است. به طوری که به‌رغم کاهش بودن مقدار کواریانس از سطح یک به سمت سطح شش اما از این سطح تا سطح هشت که مبتنی بر دوره زمانی سالانه است روند تغییر مقدار کواریانس از کاهشی به افزایشی تغییر یافته و نقطه حدی با یک مقدار بیشینه نسبی در دوره زمانی یادشده اتفاق می‌افتد. به طور کلی نزدیک به ۱۶ درصد از کل کواریانس به سطح هشت اختصاص دارد چنین وزنی از کواریانس کلی با وزن کواریانس روزانه برابری می‌کند. بنابراین رابطه بین بارش و جریان رودخانه در دوره‌های زمانی سالانه به یک مقدار بیشینه نسبی می‌رسد.

از آنجایی که تنها با تکیه بر مقدار کواریانس نمی‌توان به اطلاعات کاملی از رابطه بین جریان رودخانه و بارش دست یافت. همبستگی

آهنگ تغییر بارش است. به این ترتیب که واریانس موجکی جریان روزانه رودخانه از سطح اول تا سطح پنجم یعنی از مقیاس زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه، کاهنده است در صورتی که چنین کاهشی در واریانس بارش از مقیاس زمانی روزانه تا فصلی اتفاق می‌افتد. از سویی، واریانس جریان رودخانه از سطح شش تا سطح هشت به شدت افزایش پیدا می‌کند چنانکه بیشینه نقطه اوج واریانس آن که یک حد مطلق است در چرخه سالانه اتفاق می‌افتد. چنین نقطه اوجی برای بارش نیز به صورت یک حد نسبی در چرخه سالانه واقع شده است. واریانس هر دو متغیر از دوره‌های زمانی بیش از سالانه، به تدریج روند کاهنده و یکنواخت پیدا می‌کند (شکل ۳) ترسیم نمودار فراوانی نسبی واریانس موجکی برای مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که بیشترین تغییرپذیری بارش در مقیاس روزانه قرار دارد به طوری که نزدیک به ۸۵ درصد از تغییرپذیری بارش در دوره‌های زمانی روزانه تا ماهانه اتفاق می‌افتد. بنابراین نوسان‌های سریع بیشترین سهم را در مقدار واریانس سری زمانی بارش برعهده دارند. در مقابل، تنها ۴۰ درصد از تغییرپذیری جریان رودخانه به دوره‌های زمانی روزانه تا ماهانه اختصاص دارد. از سویی، نقطه اوج یا به عبارتی بیشینه واریانس جریان رودخانه با اختصاص $22/4$ درصد از واریانس کل، در چرخه سالانه قرار دارد. شایان توجه است که شدت تغییرپذیری سالانه جریان رودخانه با شدت تغییرپذیری چرخه روزانه بارش برابری می‌کند. این بدین معنی است که نوسانات جریان رودخانه در دوره‌های سالانه به عنوان بیشترین تغییرپذیری جریان رودخانه به شمار می‌روند. از این گذشته، تغییرپذیری دوره‌های زمانی نیم‌سال جریان رودخانه بیش از ۱۱ درصد از کل واریانس را شامل می‌شود. بنابراین مقدار جریان رودخانه در دوره‌های زمانی شش ماهه بسیار بیشتر از دوره شش ماهه دیگر از سال بوده و به‌رغم آنکه بارش از نوسان‌های روزانه بسیار شدیدی برخوردارند چنین نوسان‌های را جریان رودخانه در بازه زمانی نیم‌سال و سالانه نشان می‌دهد. در نتیجه، نوسان‌های سریع، سهم بسیار مهمی در تغییرپذیری سیگنال بارش برعهده دارند.

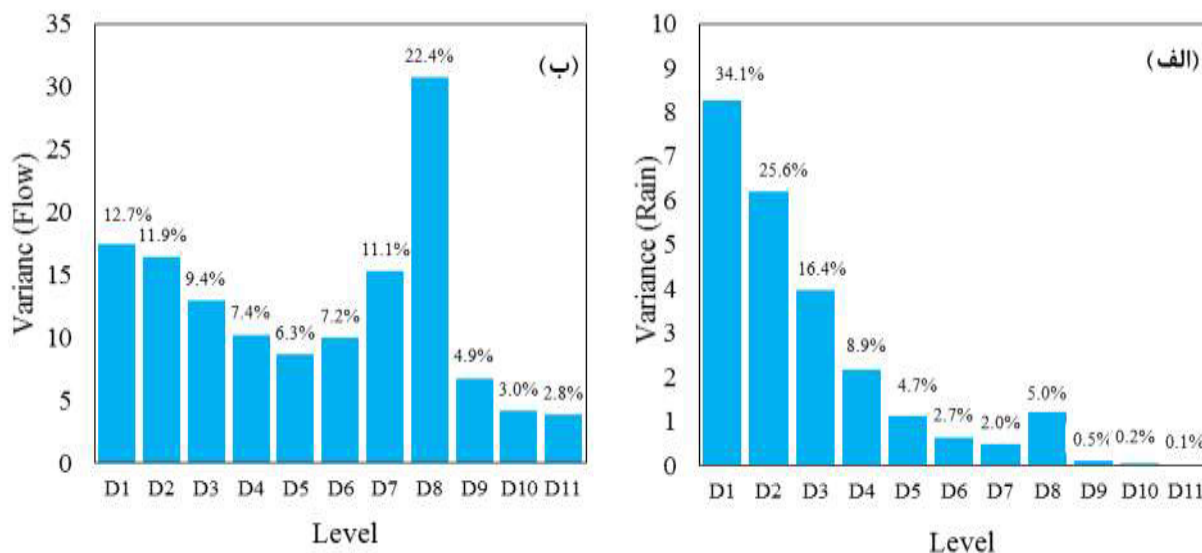


شکل ۳- واریانس موجکی سری زمانی بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد

Fig 3. Wavelet variance of the time series of precipitation and daily flow of Khorramabad river

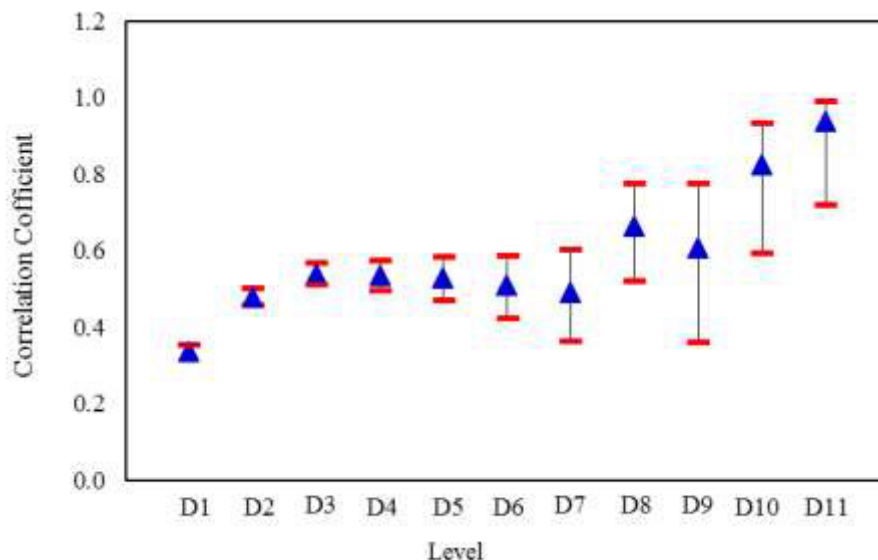
همواره یک رابطه دینامیکی بین بارش و جریان رودخانه وجود دارد که ممکن است این رابطه دینامیکی در دوره‌های زمانی متفاوت، تغییر پیدا کند. در این خصوص با کاربرد همبستگی متقابل موجکی می‌توان رابطه بین این متغیرها را در زمان‌های تأخیر گوناگون محاسبه کرد. نقطه اوج همبستگی متقاطع در یک زمان تأخیر منفی اتفاق می‌افتد. در سطح اول و دوم موجکی (D1-D2) که مبتنی بر مقیاس زمانی روزانه است همبستگی قوی و مثبتی بین بارش و جریان رودخانه بدون تأخیر زمانی از بیشترین رابطه معنادار برخوردار است. همبستگی‌های منفی که در دو سوی این همبستگی قابل مشاهده‌اند کاذب هستند. این همبستگی‌های منفی به سبب شکل موجک sym4 است. در سایر تأخیرهای زمانی، رابطه معناداری بین این دو متغیر

موجکی بین بارش و جریان رودخانه که از قابلیت بهتری نسبت به کواریانس جهت شناسایی رابطه بین این دو متغیر برخوردار است نیز محاسبه شد. شکل ۵ که ترسیم همبستگی بین بارش و جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف است یک رابطه مثبت و معنادار در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین این دو متغیر در تمامی مقیاس‌های زمانی را نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین ضریب همبستگی به ترتیب به سطح یک (چرخه روزانه) و سطح ۱۱ (چرخه ۵-۱۱ ساله) اختصاص دارد. از سویی آهنگ تغییر همبستگی بارش با جریان رودخانه نسبت به افزایش مقیاس زمانی، نایک‌نواخت است. همانند واریانس و کواریانس موجکی، یک بیشینه نسبی از ضریب همبستگی مبتنی بر چرخه سالانه بین بارش و جریان رودخانه وجود دارد.



شکل ۵- ضریب همبستگی موجکی بین بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد

Fig 5. Wavelet correlation between precipitation and daily flow of Khorramabad river



شکل ۶- همبستگی متقابل موجکی بین بارش و جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد

Fig 6. Wavelet cross- correlation between precipitation and daily flow of Khorram Abad river

مشاهده نمی‌شود. در مقیاس زمانی هفتگی (سطح ۳) بیشترین رابطه بین بارش و جریان رودخانه با یک روز تأخیر، اتفاق می‌افتد. همچنانکه از شکل ۶ محرز است با افزایش مقیاس زمانی، نه تنها زمان تأخیر رابطه بین بارش و جریان رودخانه افزایش پیدا می‌کند بلکه رابطه معنادار بین این دو متغیر تنها منحصر به یک زمان تأخیر معین نمی‌شود و در زمان‌های تأخیر پیوسته‌ای، رابطه معنادار بین این دو متغیر پدید می‌آید. در چرخه‌های سالانه (سطح ۸)، رابطه دینامیکی بین بارش و جریان رودخانه از یک الگوی سینوسی تبعیت می‌کند چنانکه بیشترین همبستگی دینامیکی (۰/۹۳-) بین این دو متغیر در چرخه‌های سالانه مبتنی بر تأخیر ۴۴ روز است. از سویی در چرخه‌های بیش از سالانه نیز بیشترین رابطه دینامیکی بین بارش و جریان رودخانه در مقیاس زمانی ۳۰-۵۰ روز یا به عبارتی در مقیاس زمانی ماهانه اتفاق می‌افتد.

بحث و نتیجه‌گیری

ساختار دینامیکی سری زمانی بارش و جریان روزانه رودخانه به ویژه در حوزه‌های کوهستانی مناطق نیمه‌خشک بسیار نوسانی و پیچیده است. از سویی نوسان‌های مثبت و منفی در بارش و جریان رودخانه حاصل سازوکارهای گوناگونی هستند که هر کدام در مقیاس زمانی متفاوتی عمل می‌کنند. چنانکه بازخورد بارش و جریان رودخانه به آن سازوکار مبتنی بر افق زمانی است که سازوکار موردنظر در آن فعالیت می‌کند. بنابراین بارش و جریان رودخانه از نوسان‌های روزانه، هفتگی، ماهانه، سالانه و چندین ساله برخوردارند که کشف این نوسان‌ها مستلزم تجزیه سیگنال سری زمانی آن‌ها در دامنه زمان - مقیاس است. از سویی، این نوسان‌ها نقش مهمی در چگونگی رابطه بین بارش و جریان رودخانه نیز ایفا می‌کنند. در این مطالعه با تجزیه موجکی واریانس کلی سیگنال بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد مشخص شد که شدت تغییرپذیری این دو پدیده متناسب با تغییر مقیاس زمانی به شدت تغییر می‌کنند. به طوری که شدیدترین نوسان‌های بارش و جریان رودخانه به ترتیب در مقیاس روزانه - ماهانه و سالانه اتفاق می‌افتند. بنابراین نوسان‌های جریان رودخانه به‌رغم آنکه متأثر از نوسان‌های بارش است اما به طور شدیدی از سازوکارهایی تأثیر می‌پذیرد که در مقیاس‌های زمانی ۶-۸ ماهه با چرخه سالانه عمل می‌کنند. همچنین در مقیاس‌های زمانی چندساله نیز نقاطی از مقادیر بالا در نوسان بارش و جریان رودخانه آشکار شدند که چرخه سینوسی را نشان می‌دهند. این نقاط نوسانی که در دوره‌های زمانی ۱۱ و ۲۲ ساله وجود دارند با بیشینه نوسان بارش که در مطالعه میرهاشمی [۳۱] با استفاده از روش‌های چندفرکتالی و رویکرد MOWDT برای بارش ایستگاه خرم‌آباد شناسایی شده بود همخوانی دارد. در بسیاری از مطالعه‌ها، چنین نوسان‌های ۱۱ و ۲۲ ساله‌ای در متغیرهای هیدرو - اقلیمی به ویژه بارش و جریان رودخانه را مرتبط با چرخه‌های ۱۱ ساله تعداد لکه‌های خورشیدی و چرخه‌های ۲۲ ساله هیل دانسته‌اند [۸].

۱۱، ۱۵، ۲۳، ۳۵، ۴۰، ۴۴]. به طور کلی، چنین تغییرپذیری مقیاسی از نوسان‌های سری زمانی بارش و جریان رودخانه در چگونگی رابطه بین آن‌ها نیز تأثیر گذاشته است. به طوری که همبستگی بین بارش روزانه و جریان رودخانه از الگوی چندمقیاسی برخوردار است. چنانکه در مقیاس زمانی روزانه به سبب دخالت نوسان‌های بسیار شدید و سریع که غالباً به صورت نویز در سیگنال بارش تجلی پیدا می‌کند [۳۲] و همچنین به سبب آنکه نوسان‌های بارش فراتر از مقیاس ۱-۲ روز موجب نوسان‌های شدید در سری زمانی روزانه جریان رودخانه شده‌اند، بنابراین رابطه بین این دو پدیده در مقیاس روزانه از کمترین مقدار ضریب همبستگی برخوردار است. در صورتی که در مقیاس‌های زمانی سالانه و چندین ساله به سبب افزایش وزن نوسان‌های آهسته، رابطه بین سری زمانی بارش و جریان رودخانه افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرپذیری و رابطه بین بارش و جریان رودخانه خرم‌آباد از الگوی چندمقیاسی برخوردار است که در صورت تجزیه سیگنال‌های آن‌ها می‌توان چرخه‌های این نوسان‌ها که در ساختار کلی سیگنال گاهاً به صورت نویزی و بی‌نظم هستند را استخراج کرد و به این ترتیب ضمن شناسایی آن‌ها به سازوکار ایجادکننده آن‌ها نیز آگاهی پیدا کرد. همچنین به منظور مدل‌سازی فرایند بارش - رواناب ضرورت دارد که چنین مدل‌های مبتنی بر مقیاس‌های زمانی مختلف باشند و از ارائه یک مدل کلی برای این دو سیگنال اجتناب شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه لرستان به سبب فراهم کردن بستری جهت انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

حمید میرهاشمی: تمامی بخش‌های این پژوهش.

منابع مورد استفاده

1. Adamowski, J.F. 2008. Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis. *Journal of Hydrology*. 353(3): 247-266.
2. Baker, T.J. and Miller, S.N. 2013. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*. 486: 100-111.
3. Cannas, B. Fanni, A. See, L. and Sias, G. 2006. Data

Mechanics and its Applications. 330(1-2): 240-245.

15. Khosravi, M. and Rostami Jalilian, S. 2014. The relationship between precipitation and temperature of IRAN with the sunspot cycle using wavelet filtering. *Journal of Climate Research*. 1393(19): 39-52.

16. Koscielny-Bunde, E. Kantelhardt, J.W. Braun, P. Bunde, A. and Havlin, S. 2003. Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. *Journal of Hydrology*. 322: 120-137.

17. Kumar, P.S. Praveen, T.V. and Prasad, M.A. 2016. Artificial Neural Network Model for Rainfall-Runoff -A Case Study. *International Journal of Hybrid Information Technology*. 9: 263-272.

18. Labat, D. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part I. A review of concepts. *Journal of Hydrology*. 314: 275-288.

19. Labat, D. Ababou, R. and Mangin, A. 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*. 238(3): 149-178.

20. Labat, D. Masbou, J. Beaulieu, E. and Mangin, A. 2011. Scaling behavior of the fluctuations in stream flow at the outlet of karstic watersheds, France. *Journal of Hydrology*. 410(3): 162-168.

21. Lark, R.M. and Webster, R. 2001. Changes in variance and correlation of soil properties with scale and location: analysis using an adapted maximal overlap discrete wavelet transform. *European Journal of Soil Science*. 52.

22. Larocque, M. Mangin, A. Razack, M. and Banton, O. 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*. 205: 217-231.

23. Laurenz, L. Lüdecke, H.-J. and Lüning, S. 2019. Influence of solar activity changes on European rainfall. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 185: 29-42.

24. Li, E. Mu, X. Zhao, G. and Gao, P. 2015. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Streamflow in the Yellow River Basin, China. *Water*. 7(4): 1670-1686.

25. Lotfollahi-Yaghin, M.A. and Koohdaragh, M. 2011. Examining the function of wavelet packet transform (WPT) and continuous wavelet transform (CWT) in recognizing the crack specification. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 15(3): 497-506.

26. Lovejoy, S. and Mandelbrot, B.B. 1985. Fractal properties of rain, and a fractal model. *Tellus A*. 37(3): 209-232.

27. Maghsoudi, M. Sharafi, S. and Maghami, Y. 2010. Trend of

preprocessing for river flow forecasting using neural networks: Wavelet transforms and data partitioning. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 31(18): 1164-1171.

4. Daubechies, I. 1992. Ten Lectures on Wavelets. *Computers in Physics*. 6: 697-697.

5. Falayi, E.O. Adepitan, J.O. Adewole, A.T. and Roy-Layinde, T.O. 2022. Analysis of rainfall data of some West African countries using wavelet transform and nonlinear time series techniques. *Journal of Spatial Science*: 1-12.

6. Gholami, V. and Darvari, Z. 2013. A study on the simulation of rainfall-runoff process using Artificial Neural Network (ANN) and HEC-HMS (Case study: Kasilian Basin). *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*. 7(21): 67-70. (In Persian)

7. Guntu, R.K. Rathinasamy, M. Agarwal, A. and Sivakumar, B. 2020. Spatiotemporal variability of Indian rainfall using multiscale entropy. *Journal of Hydrology*. 587: 124916.

8. Hajian, S. and Movahed, M.S. 2010. Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis of sunspot numbers and river flow fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 389(21): 4942-4957.

9. Harris, F.J. 1978. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*. 66(1): 51-83.

10. Hekmatzadeh, A.A. Torabi Haghighi, A. Hosseini Guyomi, K. Amiri, S.M. and Kløve, B. 2019. The effects of extremes and temporal scale on multifractal properties of river flow time series. *River Research and Applications*. 36: 171 - 182.

11. Jahanbakhsh, S. and Edalatdoust, M. 2008. The effect of solar activity on the variation of annual precipitation in Iran. *Geographical research*. 23(1): 3-24. (In Persian)

12. Joshi, N.K. Gupta, D. Suryavanshi, S. Adamowski, J.F. and Madramootoo, C.A. 2016. Analysis of trends and dominant periodicities in drought variables in India: A wavelet transform based approach. *Atmospheric Research*. 182: 200-220.

13. Kantelhardt, J.W. Koscielny-Bunde, E. Rybski, D. Braun, P. Bunde, A. and Havlin, S. 2006. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *Journal of Geophysical Research*. 111.

14. Kantelhardt, J.W. Rybski, D. Zschiegner, S.A. Braun, P. Koscielny-Bunde, E. Livina, V. Havlin, S. and Bunde, A. 2003. Multifractality of river runoff and precipitation: comparison of fluctuation analysis and wavelet methods. *Physica A: Statistical*

Athens.

40. Rahimi, d. and rahemi, y. 2016. Resources in the Impacts Climate Change on Floods in North of Iran. *Geography and Environmental Planning*. 27(1): 89-102. (In Persian)
41. Rajurkar, M.P. Kothiyari, U.C. and Chaube, U.C. 2004. Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. *Journal of Hydrology*. 285: 96-113.
42. Ren, W. and Roeck, G.D. 2002. STRUCTURAL DAMAGE IDENTIFICATION USING MODAL DATA. II: TEST VERIFICATION. *Journal of Structural Engineering-asce*. 128: 96-104.
43. Rybski, D. Bunde, A. Havlin, S. Kantelhardt, J.W. and Koscielny-Bunde, E. Year. Detrended Fluctuation Studies of Long-Term Persistence and Multifractality of Precipitation and River Runoff Records.
44. Sadegh Movahed, M. Jafari, G. Ghasemi, F. Rahvar, S. and Reza Rahimi Tabar, M. 2006. Erratum: Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2011: E09001.
45. Sang, Y.-F. Wang, D. Wu, J.-C. Zhu, Q.-P. and Wang, L. 2009. Entropy-Based Wavelet De-noising Method for Time Series Analysis. *Entropy*. 11(4): 1123-1147.
46. shayan, s. dehestani, h. and hosein zadeh, m.m. 2018. Geomorphologic Classification of Rivers in Mountainous Basins (Case study: Khorramabad River). *Quantitative Geomorphological Research*. 6(2): 133-147. (In Persian)
47. Tan, X. and Gan, T.Y. 2017. Multifractality of Canadian precipitation and streamflow. *International Journal of Climatology*. 37.
48. Whitcher, B. Year. Assessing Nonstationary Time Series Using Wavelets.
49. Whitcher, B. Guttorp, P. and Percival, D.B. 2000. Wavelet analysis of covariance with application to atmospheric time series. *Journal of Geophysical Research*. 105: 14941-14962.
50. Yarahmadi, D. and Mirhashemi, H. 2018. Forecasting Kashkan River Flow using a Combination of Artificial Neural Network, Wavelet Analysis and K - Nearest Neighbor. *Water and Soil*. 31(6): 1561-1574. (In Persian).
51. Zamrane, Z. Mahé, G. and Laftouhi, N.-E. 2021. Wavelet Analysis of Rainfall and Runoff Multidecadal Time Series on Large River Basins in Western North Africa. *Water*. 13(22): 3243.
52. Zhao, G. Hörmann, G. Fohrer, N. Zhang, Z. and Zhai, J. 2010. Streamflow Trends and Climate Variability Impacts in Poyang Lake Basin, China. *Water Resources Management*. 24(4): 689-706.
- morphological pattern changes in Khorramabad River using RS, GIS and Auto Cad. *The Journal of Spatial Planning*. 14(3): 275-294. (In Persian)
28. Mangin, A. 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*. 67: 25-43.
29. Marani, M. 2003. On the correlation structure of continuous and discrete point rainfall. *Water Resources Research*. 39.
30. Matsoukas, C. Islam, S. and Rodríguez-Iturbe, I. 2000. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series. *Journal of Geophysical Research*. 105: 29165-29172.
31. Mirhashemi, H. 2021. Identification of structural breaks and change points of rainfall time series in mountainous areas (Case study: Khorramabad Synoptic Station). *Geographical Studies of Mountainous Areas*. 1(4): 1-16. (In Persian).
32. Mirhashemi, H. and Yarahmadi, D. 2021. Multifractal analysis of daily precipitation of selected stations in the west - southwest of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*. 47(3): 485-499. (In Persian).
33. Mirhashemi, H. Yarahmadi, D. Sharifi, S. and Farzin, S. 2019. Improvement of Support Vector Machine and Random Forest Algorithm in Predicting Khorramabad River Flow Using Non-uniform De-Noising of data and Simplex Algorithm. *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*. 13(47): 40-51. (In Persian)
34. Pandey, B.K. Gosain, A.K. Paul, G. and Khare, D. 2016. Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model. *Applied Water Science*. 7: 2029-2041.
35. Peña, J.C. Schulte, L. Badoux, A. Barriendos, M. and Barrera-Escoda, A. 2015. Influence of solar forcing, climate variability and modes of low-frequency atmospheric variability on summer floods in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19: 3807-3827.
36. Percival, D.B. and Walden, A.T. 2000. Wavelet Methods for Time Series Analysis.
37. Percival, D.P. 1995. On estimation of the wavelet variance. *Biometrika*. 82: 619-631.
38. Pierini, J.O. and Telesca, L. 2010. FLUCTUATION ANALYSIS OF MONTHLY RAINFALL TIME SERIES. *Fluctuation and Noise Letters*. 09: 219-228.
39. Polikar, R. Year. The Story of Wavelets. In Mastorakis, N., Ed., *Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering*. in World Scientific and Engineering Society Press.

Analysis of Multi-Scale Correlation and Wavelet Variance of Time Series of Precipitation and Flow of Khorramabad River

Hamid Mirhashemi¹

Received: 20-11-2022 Accepted: 30-12-2023

Abstract

Introduction:

Despite the of river flow affected by the amount and nature of precipitation that occurs in the river watershed, the relationship between these two hydro-climatic variables has complex dynamics in terms of frequency and intensity, especially in mountainous areas. This complex dynamic is not only due to the involvement of many natural and human components, each of which has a different multi-scale behavior, but also due to the change of these components over time. Along with the change of these components, the intensity of their interaction and impact in the watershed is changed and the behavioral dynamics of the river flow is also changed. After all, precipitation is considered as the most important driving factor of the river flow, which is affected by different mechanisms, each of which is active in a different time horizon. Such different mechanisms have caused the rainfall time series to have a complex and unstable behavior and a multi-scale behavior. So that the intensity and response time of the river flow in relation to the amount of precipitation does not follow a general and linear pattern, but shows different patterns in different time scales. With these interpretations, the time series of precipitation and river flow contain small and large fluctuations. Therefore, the purpose of this study is 1- to identify the fluctuations of precipitation and flow of Khorram Abad river in different time scales. 2- Revealing the contribution of each of the small-large time horizons in determining the variance of river flow and daily precipitation.

Materials and Methods:

In this research, two types of data were used, including the daily precipitation data of Khorramabad synoptic station (1961-2016) and the daily discharge data of Chamanjir discharge measuring station 1961-2016). Also, in order to carry out this research, a modified version of discrete wavelet transforms (DWT) under the name of maximum overlapping discrete wavelet transform (MODWT) was used, so in this study, for wavelet multi-representation analysis (fluctuation analysis), wavelet variance analysis and identification of dynamic relationship and correlation Multiscale between precipitation signal and daily flow of Khorramabad river was used using discrete wavelet approach with maximum overlap based on Symlet 4 (sym4) mother wavelet function. Thus, the time series of precipitation and river flow were divided into 11 scale levels using MODWT. It is worthnoting that from signal analysis by MODWT, two types of coefficients including wavelet coefficients (details (D)) and scale coefficients (generalities (S)) are obtained. The scaling coefficients represent the wavelet transform coefficients with high resolution (low frequency) that show the general and smooth trend in the time series of precipitation and river flow. On the other hand, wavelet coefficients (high frequency) provide detailed information of certain trends and intervals of hydrological time series. Each component D represents

¹ Assistant Professor in Climatology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan university, Khorramabad, Iran.

a specific time period or time scale.

Results and Discussion:

Multispectral analysis of precipitation and river flow signal from one to 13 levels of wavelet decomposition shows a very specific appearance of semi-annual fluctuations compared to other time scales. Also, despite the fact that the precipitation signal is more fluctuating in daily to bimonthly time scales than the river flow signal, some of their peak points correspond to each other. These peaks indicate floods and heavy rains that occurred on a daily scale: on the other hand, very distinct fluctuations with 11- and 22-year cycles were detected in their signal, which correspond to the known cycles of sunspot number and Hill cycle, respectively. The results of analyzing the variance of these two phenomena up to 11 levels of wavelet analysis show the general similarity of their wavelet variance behavior in daily to multi-year time scales, but the rate of change of river flow variance for increasing the time scale is different from the rate of change of precipitation. On the other hand, the highest rainfall variability is assigned to the daily scale (85% of the total variance). If the maximum variability of the river flow is in the form of an absolute limit flow in the annual cycle. Therefore, fast and medium fluctuations, respectively, have a very important contribution to the variability of the precipitation signal and the daily flow of Khorramabad River. Wavelet correlation between precipitation and river flow in different time scales shows a significant positive relationship at the 99% confidence level between these two variables.

Conclusion:

With the wavelet analysis of the total variance of the rainfall signal and the flow of Khorramabad river, it was found that the intensity of variability of these two phenomena changes strongly according to the change of time scale. So that, the most extreme fluctuations of precipitation and river flow occur on a daily-monthly and annual scale, respectively. Therefore, although the fluctuations of the river flow are affected by the precipitation fluctuations, they are strongly affected by the mechanisms that operate in the time scales of 6-8 months with the annual cycle. Also, in multi-year time scales, points of high values were revealed in the fluctuation of precipitation and river flow, which show the sinusoidal cycle. These fluctuation points exist in periods of 11 and 22 years. In general, the results of this study showed that the precipitation and flow of Khorramabad River have daily, weekly, monthly, annual and several-year fluctuations, and these fluctuations play an important role in the relationship between precipitation and They play a role in the flow of the river. As the relationship between the precipitation and the flow of this river has a multi-scale pattern, if their signals are analyzed, the cycles of these fluctuations can be extracted, which are sometimes noisy and irregular in the overall structure of the signal, and in this way, while identifying them, the mechanism that creates them can also be extracted.

Keywords: Precipitation, Multi-Resolution, Wavelet, fluctuation

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Lorestan.

Conflicts of interest

The author of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author

Authors' contribution

Hamid Mirhashemi: All parts of this research.