

بررسی ارتباط پارامترهای بارش و رواناب با استفاده از معیار ارتباط موجکی

فرناز دانشور وثوقی^{*}

چکیده

در تحقیق حاضر، از ارتباط موجکی جهت سنجش تأثیر پارامتر بارش روی رواناب دشت اردبیل استفاده می‌کند. ارتباط موجکی معیاری برای ارزیابی همبستگی بین دو سری زمانی در حالت موضعی و ارتباط احتمالی بین دو فرآیند در فضای فرکانس-زمان می‌باشد و نشان‌گر مقدار همبستگی و ارتباط فرکانسی بین سری زمانی دو فرآیند مختلف می‌باشد. برای این منظور، از داده‌های ماهانه هیدروکلیماتولوژی ۳ ایستگاه بارش و یک ایستگاه رواناب در خروجی دشت اردبیل رواناب در دشت اردبیل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دوره‌های فرکانسی ۸-۱۲ و ۸-۱۶ در پارامتر بارش قوی هستند و معنی‌داری دوره تناوب ۱۶-۸ ماه با سطح معنی‌داری ۰.۹۵٪ در پارامتر رواناب از طریق نمودارهای تبدیل موجک پیوسته و طیف توان موجکی تأیید می‌شود. همچنین، نتایج وابستگی موجکی و موجک متقابل نشان داد که بین پارامترهای بارش و رواناب در دوره تناوب ۸-۱۶ ماه بیشترین ارتباط شناسایی گردید.

واژگان کلیدی:

ارتباط موجکی، بارش، دشت اردبیل، دوره زمانی مؤثر، رواناب

^۱گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران. fdaneshvar.vousoughi@gmail.com

مقدمه

به عبارت دیگر، ارتباط تبدیل موجکی، آنالیزهای همبستگی خطی که به آشکارسازی همبستگی‌های متناوب بین دو پدیده کمک می‌کنند را افزایش می‌دهد؛ که وجود این همبستگی به‌وضوح در آنالیزهای تبدیل ارتباط موجک نشان داده می‌شود. برای مثال از این معیار می‌توان در بررسی تأثیر شاخص‌های اتمسفریک^۸ مانند NAO و AO روی شرایط یخ دریای بالتیک و یا در مطالعات فرآیندهای ژئوفیزیک و سری زمانی آن‌ها استفاده کرد. علاوه بر این کاربردها، هندرسون^۹ و همکاران (۲۰۰۹)، از معیار تبدیل ارتباط موجکی در کنار فهم حرکت آب زیرزمینی، برای پمپاژ از سطح آب زیرزمینی نیز بهره بردند. هولمان^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۱) نیز ناپایداری سطح آب زیرزمینی را به خاطر تغییرات الگوی اتمسفریک به کمک معیار تبدیل ارتباط موجکی، تشخیص دادند. سه سال بعد انجی و چان^{۱۱} (۲۰۱۲) گسترش مفهوم ارتباط موجکی کاربرد ارتباط موجک جزئی و چندگانه در ژئوفیزیک را نشان دادند و در نهایت فنگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۵) به مفید بودن ارتباط موجکی برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی سه‌بعدی پی بردند. معیار ارتباط موجکی در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارد. به‌عنوان مثال در پژوهش‌های نورانی و موسوی^{۱۳} (۲۰۱۶) و نورانی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۶) از معیار ارتباط موجکی برای تعیین ورودی‌های مهم برای مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی با مدل‌های هوش مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از معیار ارتباط موجکی در انتخاب ورودی‌های مدل‌سازی دقت آن‌ها را در پیش‌بینی این پارامتر افزایش می‌دهد.

قاسم‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) تأثیر پارامترهای هیدرولوژیکی مختلف را روی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از معیار ارتباط موجکی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر این است که از بین پارامترهای هیدروکلیماتولوژی^{۱۵}، سری زمانی رواناب با بالاترین مقدار ارتباط موجکی زمانی مؤثر بیشتر نسبت به سایر پارامترها، دارای بیشترین تأثیر روی نوسانات سطح آب می‌باشد و تأثیر سری‌های زمانی دما،

در سال‌های اخیر، یافتن معیار مناسب برای بررسی تغییرات هیدرولوژیکی یکی از بحث‌های مهم مهندسين آب بوده است و تحقیقاتی برای بررسی این تغییرات با استفاده از روش‌های مختلف اعم از آزمون‌های پارامتریک مانند تحلیل رگرسیون، آزمون‌های ناپارامتریک مثل آزمون ضریب همبستگی اسپیرمن^۱، آزمون مان-کندال^۲ و یا روش تبدیل موجک بین سری‌های زمانی مختلف آن‌ها صورت گرفته است. عموماً سری‌های زمانی فرآیندهای هیدرولوژیکی ناپایدار بوده و به خاطر قابلیت آنالیز موجک در لحاظ کردن ناپایداری و نوسانات فصلی فرآیندهای هیدرولوژیکی، اخیراً تبدیل موجک توسط هیدرولوژیست‌ها مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، نورانی و همکاران (۲۰۱۵) از تبدیل موجک گسسته و روش ناپارامتریک مان-کندال برای آنالیز سری‌های زمانی بارش و رواناب حوضه تامپابای^۳ آمریکا استفاده کردند.

پرکیوال و والدن^۴ (۲۰۰۶)، معرفی بر آنالیزهای موجک و آنالیزهای آماری براساس تئوری موجک انجام داده و مقدمه ای از آنالیز سری‌های زمانی در زمینه علوم تجربی، مهندسی و علوم دارایی فراهم آوردند. والنات^۵ (۲۰۰۲) و گرینستد^۶ و همکاران (۲۰۰۴) در مورد آنالیز تبدیل موجک متقابل و ارتباط موجکی برای به‌دست آوردن اطمینان و روابط فیزیکی بین سری‌های زمانی تحقیق کردند. به‌طور کلی، تبدیل موجک برای آنالیز سری‌های زمانی ناپایدار با فرکانس‌های مختلف به‌کار می‌رود؛ که عمده هدف این آنالیزها جداسازی سیگنال بیان‌شده توسط تابع زمان t ، به مؤلفه‌هایی با فرکانس‌های مختلف است. ماراون و کورتز^۷ (۲۰۰۴) نشان دادند که طیف متقابل موجک برای بیان همبستگی بین دو فرآیند (برای مثال، نوسانات NAO و ENSO نامناسب به نظر می‌رسد و استفاده از آنالیزهای ارتباط موجکی را پیشنهاد کردند که معیاری برای تشخیص ارتباط احتمالی بین دو فرآیند می‌باشد.

^۸Atmospheric^۹Henderson^{۱۰}Holman^{۱۱}Ng and Chan^{۱۲}Fang^{۱۳}Nourani and Mousavi^{۱۴}Nourani^{۱۵}Hydro-climatology^۱Spearman^۲Mann-Kendall test^۳Tampa Bay^۴Percival and Walden^۵Walnut^۶Grinsted^۷Maraun and Kurths

مؤلفه‌های غیرایستا باشد، محاسبه وابستگی متقابل اشتباه است. بدین منظور، وابستگی متقابل پیوسته موجکی برای غلبه بر محدودیت‌های ارتباطات کلاسیک معرفی شد. تابع وابستگی متقابل موجکی با علامت $WC_{xy}(a, u)$ برای دو سری مرتبط $x(t)$ و $y(t)$ در مقیاس a و تأخیر زمانی u تعریف می‌شود (لی و نوزاکی^۶، ۱۹۹۷):

$$WC_{XY}(a, u) = E[W_{XX}(a, \tau)W_{YY}(a, \tau + u)] \quad (۴)$$

برخی از محققین جدا نمودن بخش حقیقی $RWC_{xy}(a, \tau)$ را از قسمت موهومی $IWC_{xy}(a, \tau)$ تابع وابستگی متقابل موجکی (REF) توصیه کردند. پس وابستگی متقابل موجکی

به صورت زیر تعریف شد:

$$WR_{XY}(a, u) = \frac{RWC_{XY}(a, u)}{\sqrt{RWC_{XX}(a, 0)RWC_{YY}(a, 0)}} \quad (۵)$$

لابات^۷ و همکاران (۲۰۰۵) تنها استفاده از قسمت حقیقی تبدیل موجک را برای وابستگی متقابل موجکی پیشنهاد کردند و ضریب وابستگی محلی موجکی $WLCC(a, u)$ بر اساس طیف متقابل موجکی^۸ $W_{XY}(a, u)$ تعریف شد:

$$WLCC(a, u) = \frac{Real(W_{XY}(a, u))}{|W_{XX}(a, u)||W_{YY}(a, u)|} \quad (۶)$$

ضریب وابستگی محلی موجکی $WLCC(a, u)$ در معادله ۶ بر اساس رابطه بین وابستگی متقابل کلاسیک و قسمت حقیقی طیف متقابل موجکی در فرمول ۷ تعریف می‌شود:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t)dt = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Real(W_{XY}(a, \tau))dad\tau \quad (۷)$$

روش وابستگی موجکی^۹

به‌طور کلی مفهوم ارتباط موجکی (وابستگی موجکی) در پردازش سیگنال شامل اندازه‌گیری ارتباط بین دو سیگنال، یا بین دو نماینده از این سیگنال‌ها است. در بررسی دو سیگنال پیوسته با انرژی محدود $x(t)$ و $y(t)$ ، ارتباط متقابل کلاسیک که در بخش قبلی تعریف شد، می‌تواند به‌عنوان ارتباط (همبستگی) بین دو سیگنال در نظر گرفته شود. با

بارش، رطوبت نسبی و تبخیر با دوره‌های زمانی مؤثر کمتر و با متوسط ارتباط موجکی در اولویت‌های بعدی نسبت به رواناب قرار دارد. نکته‌ای که وجود دارد این است که در بین مطالعات انجام‌گرفته از معیار ارتباط موجکی برای بررسی ارتباط پارامترهای هیدرولوژیکی استفاده نشده است. مطالعه حاضر در نظر دارد تأثیر پارامتر بارش را روی رواناب با استفاده از معیار ارتباط موجکی بررسی کند. که به‌عنوان یک نوآوری استفاده از یک ابزار جدید ریاضی جهت بررسی روند و اندرکنش فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌تواند باشد.

مواد و روش‌ها

همبستگی متقابل موجکی

با توجه به تحلیل فوریه، ارتباط متقابل موجکی^۱ گاهی اوقات بر ارتباط متقابل کلاسیک^۲ ترجیح داده می‌شود. این روش به‌طور مؤثر دید جدیدی را نسبت به مقیاسی که دو سیگنال در آن باهم ارتباط دارند، فراهم می‌آورد (لابات^۳ و همکاران، ۲۰۰۲، اونوراتو^۴ و همکاران، ۱۹۹۷). ارتباط متقابل کلاسیک برای بیان درجه ارتباط بین دو سیگنال $x(t)$ و $y(t)$ ، به‌صورت کمی بکار می‌رود. ارتباط متقابل R_{xy} بین دو فرآیند استوکستیک^۵ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{C_{xx}C_{yy}}} \quad (۱)$$

که سه پارامتر C_{xy} ، C_{xx} و C_{yy} به‌صورت $C_{xy} = E[x(t)y(t)]$ ، $C_{xx} = E[x(t)^2]$ و $C_{yy} = E[y(t)^2]$ تعریف می‌شود. R_{xy} تحت فرضیات ایستا بودن و تصادفی بودن می‌تواند بازنویسی شود:

$$E[x(t)y(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int x(u)y(u)du \quad (۲)$$

R_{xy} با بیان یک تأخیر زمانی بین دو سیگنال به‌صورت کلی زیر نوشته می‌شود:

$$R_{xy}(t_1 - t_2) = \frac{C_{xy}(t_1 - t_2)}{\sqrt{C_{xx}(0)C_{yy}(0)}} \quad \text{با} \quad C_{xy}(t_1 - t_2) = E[X(t - t_1)Y(t - t_2)] \quad (۳)$$

معادله (۳) بیانگر این است که تحلیل وابستگی متقابل مقداری کمی را برای میزان ارتباط دو سیگنال با تأخیر زمانی نسبت به همدیگر فراهم می‌آورد. اگر سیگنال‌ها شامل

^۶Li and Nozaki

^۷Labat

^۸Wavelet cross-spectrum

^۹Wavelet Transform Coherence (WTC)

^۱Wavelet Cross-Correlation

^۲Classical Cross-Correlation

^۳Labat

^۴Onorato

^۵Stochastic

$$S_{XY}(a, \tau) = \int_{t-\delta/2}^{t+\delta/2} W_{XX}^*(a, \tau) W_{YY}(a, \tau) da d\tau \quad (11)$$

اسکالر δ بیان کننده اندازه فیلتر دوبعدی است (لاچوکس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۲) که یک پارامتر مهم از وابستگی موجکی است و باید مقدار کافی را برای داشتن تخمین قابل قبولی از همبستگی موجکی دارا باشد. پس وابستگی موجکی به صورت آنالوگی از وابستگی فوریه^{۱۱} به صورت زیر تعریف شد (لابات^{۱۲}، ۲۰۰۵).

$$WC(a, \tau) = \frac{|S_{XY}(a, \tau)|}{\sqrt{|W_{XX}(a, \tau)| |W_{YY}(a, \tau)|}} \quad (12)$$

WC مقداری بین صفر و یک اختیار می کند. وابستگی موجکی با شناسایی پیوندها و تناوب های موجود می تواند مقایسه ای بین پدیده ها و ارتباط بین آن ها انجام دهد؛ اما از آنجاکه این روش دارای ماهیتی خطی می باشد، برای بررسی ارتباط غیرخطی بین فرآیندها می توان از روش آنتروپی که ذاتی غیرخطی دارد، استفاده کرد.

منطقه مورد پژوهش

منطقه مورد مطالعه، دشت اردبیل است که در شمال غربی ایران واقع شده است. این دشت به طور تقریبی، در عرض جغرافیایی $38^{\circ}03'$ تا $38^{\circ}27'$ شمالی و طول جغرافیایی $47^{\circ}55'$ تا $48^{\circ}20'$ شرقی واقع شده است. دشت اردبیل مشرف بر ارتفاعات بخش غربی رشته کوه البرز (ارتفاعات تالش) و در امتداد دامنه شرقی سبلان قرار دارد. مساحت آن در حدود 990 Km^2 است. متوسط بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک^{۱۳} اردبیل در دوره زمانی ۱۳۹۱-۱۳۵۰ حدود 304 mm می باشد. پرباران ترین ماه سال ماه اردیبهشت و کم باران ترین آن ماه مرداد است. میانگین دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل حدود 9° C است و یکی از نواحی سردسیر ایران محسوب می شود.

داده های بارش و رواناب در مقیاس ماهانه برداشت شده و در این پژوهش ۳ ایستگاه بارش (نام ایستگاهها: سامیان^{۱۴}،

توجه به تبدیل فوریه سیگنالها، وابستگی طیفی^۱ سیگنالهای $x(t)$ و $y(t)$ به صورت رابطه (۱) تعریف شد (گاردنر^۲، ۱۹۹۲).

$$\rho(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{|S_{xx}(f) S_{yy}(f)|}} \quad (8)$$

$S_{xy}(f)$ چگالی طیفی متقابل^۳ بین دو سیگنال $x(t)$ و $y(t)$ است. تحت مفروضات ایستا بودن طیف فوریه متقابل^۴ تعریف شد:

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{XY}(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (9)$$

به دلیل نابرابری Schwartz، $\rho(f)$ مقداری بین صفر و یک را اختیار می کند. اگر $\rho(f)$ برای هر فرکانس نزدیک به یک باشد، سپس $y(t)$ می تواند به صورت یک تبدیل زمانی ثابت خطی از $x(t)$ تقریب زده شود. در سری های زمانی هیدرولوژیکی که اغلب غیرایستا هستند، استفاده از بیانگرهای فرکانس زمانی سیگنالها پیشنهاد شده است. سپس وابستگی (coherence)، تغییرات زمانی ارتباط بین دو سیگنال را برجسته کرده و امکان تشخیص مقادیر زیاد کوواریانس های انتقالی را به وجود می آورد. برای غلبه بر مشکل ذاتی سیگنال های غیرایستا، وابستگی موجکی پیشنهاد شده است (تورنس و وبستر^۵، ۱۹۹۹؛ لاچوکس^۶ و همکاران، ۲۰۰۲). موضوع اصلی این است که با اعمال فرمول های آنالوگی به معادله (۲)، منجر به وابستگی برابر یک برای همه زمانها و مقیاسها می شود در صورتی که ممکن است بین دو سیگنال ارتباطی وجود نداشته باشد (لابات^۷ و همکاران، ۲۰۰۱). تلاش هایی برای اجتناب از این مشکل صورت گرفت و تورنس و وبستر^۸ (۱۹۹۹) وابستگی موجکی را با استفاده از تخمین نرم^۹ طیف موجکی پیشنهاد کردند و طیف موجک نرم و طیف متقابل، $S_{WX}(a, \tau)$ و $S_{WXY}(a, \tau)$ به صورت زیر تعریف شد.

$$S_{WX}(a, \tau) = \int_{t-\delta/2}^{t+\delta/2} W_{XX}^*(a, \tau) W_{XX}(a, \tau) da d\tau \quad (10)$$

^{۱۰}Torrence and Webster

^{۱۱}smooth estimate

^{۱۲}Lachaux

^{۱۳}Fourier Coherence

^{۱۴}Labat

^{۱۵}Synoptic

^{۱۶}Samian

^۱Spectral coherence

^۲Gardner

^۳cross-spectral density

^۴cross Fourier spectrum

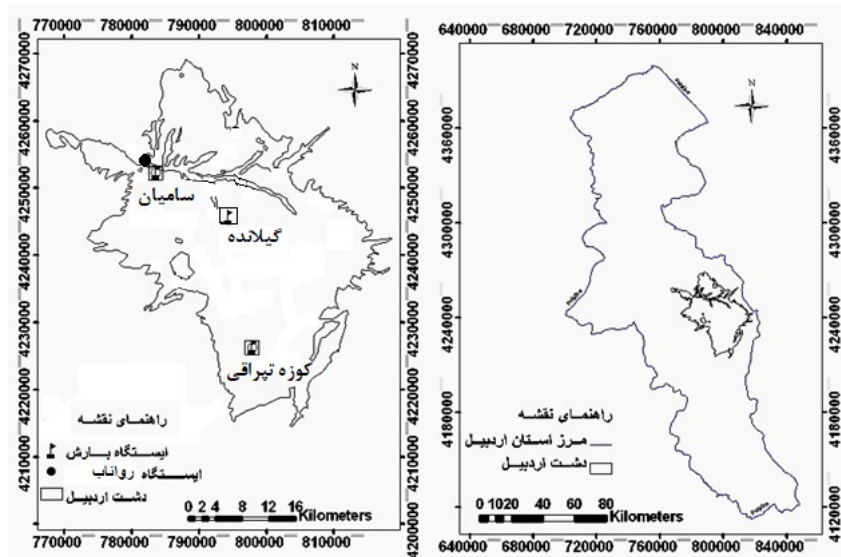
^۵Torrence and Webster

^۶Lachaux

^۷Labat

ماه از سال ۱۳۵۲/۷ تا ۱۳۹۴/۶ می باشد که از اداره آب منطقه‌ای اردبیل تهیه گردیده‌اند. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و رواناب حوضه‌ی جغرافیایی دشت اردبیل را نشان می‌دهد.

گیلانده^۱ و کوزه‌تپراقی^۲ که با حرف (P) و یک ایستگاه رواناب (سامیان) که با حرف (R) نشان داده شده است و مورد مطالعه قرار گرفته است. طول داده‌های استفاده شده برای بارش ۵۲۸ ماه، از سال ۱۳۵۰/۷ تا ۱۳۹۴/۶ می باشد که از سازمان هواشناسی استان اردبیل و برای رواناب ۵۰۴



شکل (۱): ایستگاه‌های باران‌سنجی و رواناب حوضه دشت اردبیل

- فاز ارتباط بین سری‌های زمانی، که با جهت پیکان‌ها توصیف می‌شود.

- مخروط نفوذ نشان‌دهنده مناطقی از طیف موجک است که تأثیرات لبه‌ها به خاطر طول محدود سری زمانی داده‌ها نباید نادیده گرفته شود.

وابستگی موجکی قابلیت‌ی شبیه ارتباط خطی را داشته و رنگ زرد نشان‌دهنده وابستگی بالا و رنگ آبی به معنای عدم وابستگی می‌باشد. پررودها و زمان‌هایی با وابستگی موجکی بالا در سطح معنی‌داری ۵٪ با خطوط مشکی پررنگ مشخص شده‌اند. وابستگی موجکی، ارتباط متقابل دو سری زمانی را به‌عنوان تابعی از فرکانس (در مقیاس‌های موجکی متفاوت) اندازه‌گیری می‌کند.

در ادامه موجک پیوسته و طیف توان موجکی برای یافتن دوره تناوب تأثیرگذار در سری‌های بارش ایستگاه سامیان، گیلانده و کوزه‌تپراقی و همچنین ایستگاه رواناب سامیان بکار رفت. شکل (۲) موجک پیوسته را برای سه ایستگاه بارش و رواناب خروجی را نشان می‌دهد. در سه ایستگاه بارش دوره‌های زمانی تقریباً ۶ و ۱۲ ماهه (باند‌های فرکانسی

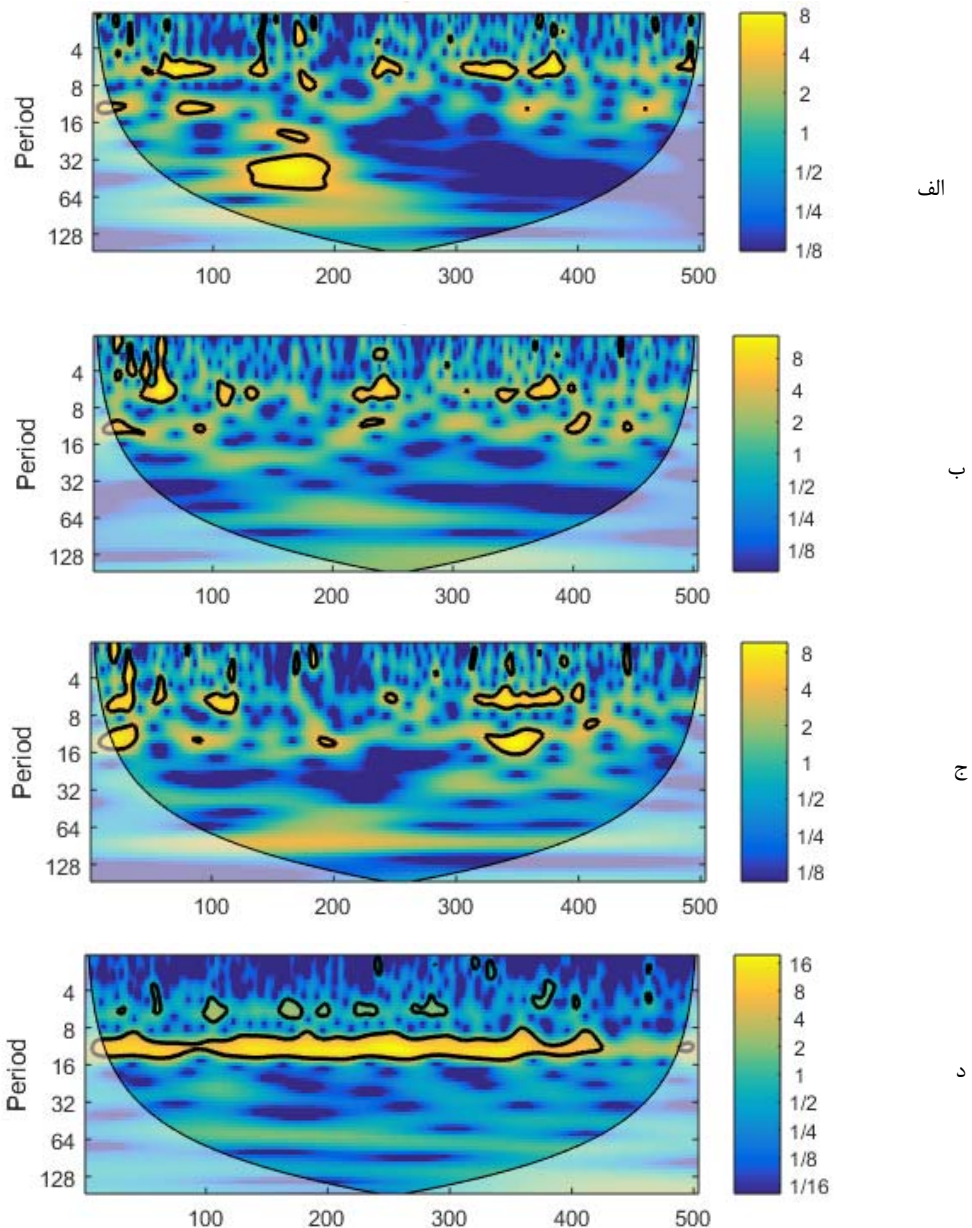
نتایج و بحث

آنالیزهای طیف موجک متقابل و ارتباط موجکی، روش‌های قدرتمندی برای بررسی ارتباط موجود بین دو سری زمانی می‌باشند. از تبدیل موجک پیوسته دو سری زمانی، تبدیل موجک متقابل محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده مناطق با قدرت مشترک بالا و فاز رابطه بین آن‌ها می‌باشد. همچنین، از تبدیل موجک پیوسته دو سری زمانی، ارتباط موجکی که بیانگر همبستگی موضعی (محلی) بین دو سری زمانی در فضای فرکانس-زمان است، مشخص می‌شود. جایی که تبدیل موجک متقابل قدرت مشترک بالایی دارد، ارتباط تبدیل موجکی فاز رفتار موضعی از خود نشان داده و یک خروجی قوی به‌دست می‌دهد که یک ابزار برای تشخیص رابطه احتمالی بین دو سری از داده‌های هیدرولوژیکی می‌باشد.

به‌طور کلی سه بخش اصلی در نمودار WTC وجود دارد:

- دوره تناوب ارتباط موجکی در سطح معنی‌داری ۵٪، که با خطوط ضخیم سیاه‌رنگ نشان داده می‌شود.

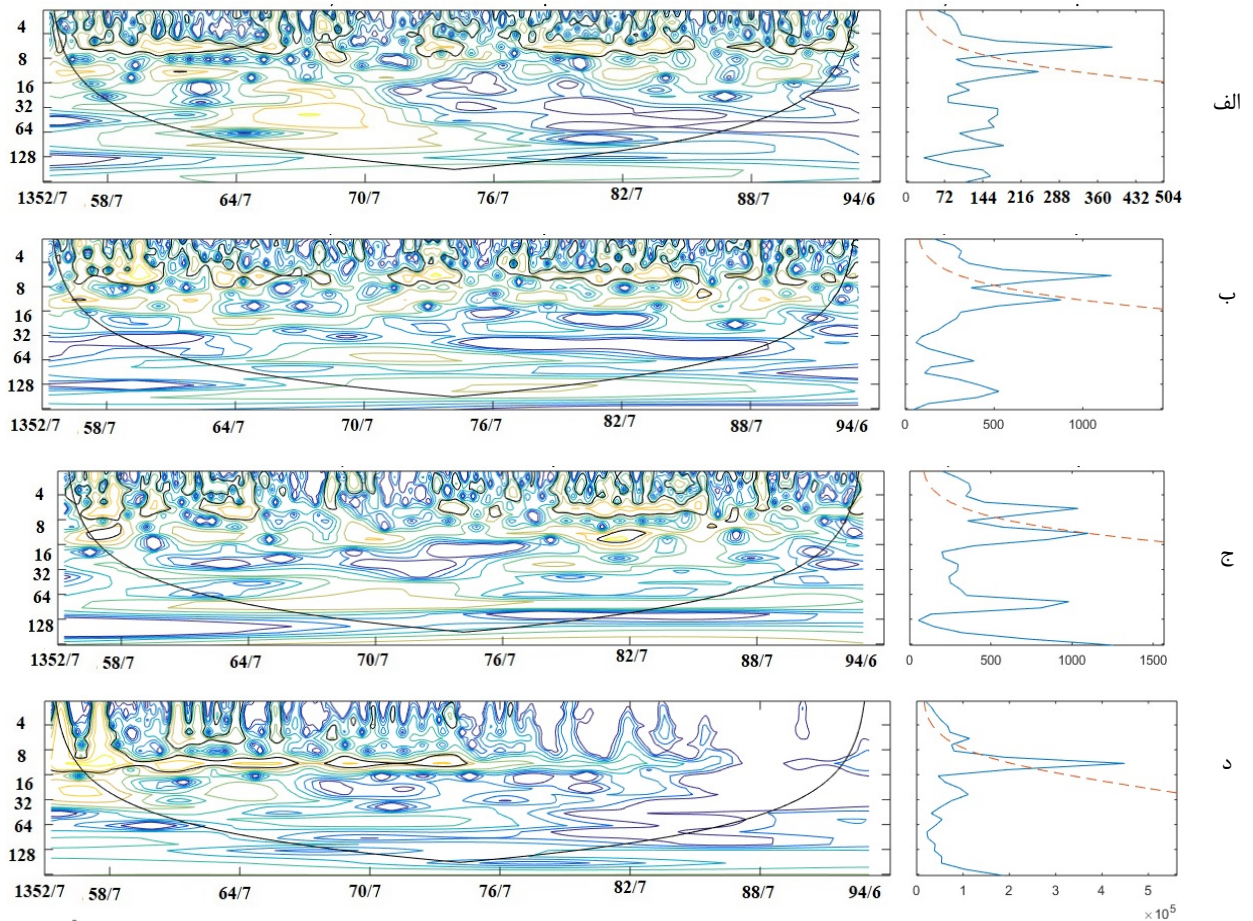
۴-۸ و ۸-۱۶ ماهه) در برخی سال‌ها جز تناوب‌های تأثیرگذار و معنی‌دار بودند؛ اما ایستگاه رواناب در اکثر سال‌ها دوره تناوب تقریباً ۱۲ ماه (باند فرکانسی ۸-۱۶) را به‌عنوان دوره زمانی مؤثر در روند خود نشان داد و دوره تناوب ۶ ماه (باندهای فرکانسی ۴-۸) خیلی کم و ضعیف‌تر از دوره ۱۲ ماه (باند فرکانسی ۸-۱۶) در بعضی ماه‌ها دیده می‌شود.



شکل (۲): موجک پیوسته الف) بارش ایستگاه سامیان، ب) بارش ایستگاه گیلانده، ج) بارش ایستگاه کوزه‌تپراقی و د) رواناب خروجی دشت.

شکل (۳) طیف توان موجک^۱ زیرسری‌های مؤثر را در ۳ ایستگاه بارش و رواناب خروجی دشت اردبیل نشان می‌دهد. در ایستگاه‌های بارش سامیان، گیلانده و کوزه تپراقی دوره-های ۶ ماهه دارای بالاترین توان موجکی نشان می‌دهد. بعد از دوره ۶ ماه، دوره ۱۲ ماهه بیشترین توان موجکی را تجربه می‌نماید. در ایستگاه رواناب سامیان تناوب ۱۲ ماهه دارای بالاترین میزان توان موجکی در دشت اردبیل می‌باشد (شکل (۳-د)).

^۱Wavelet Power Spectrum (WPS)



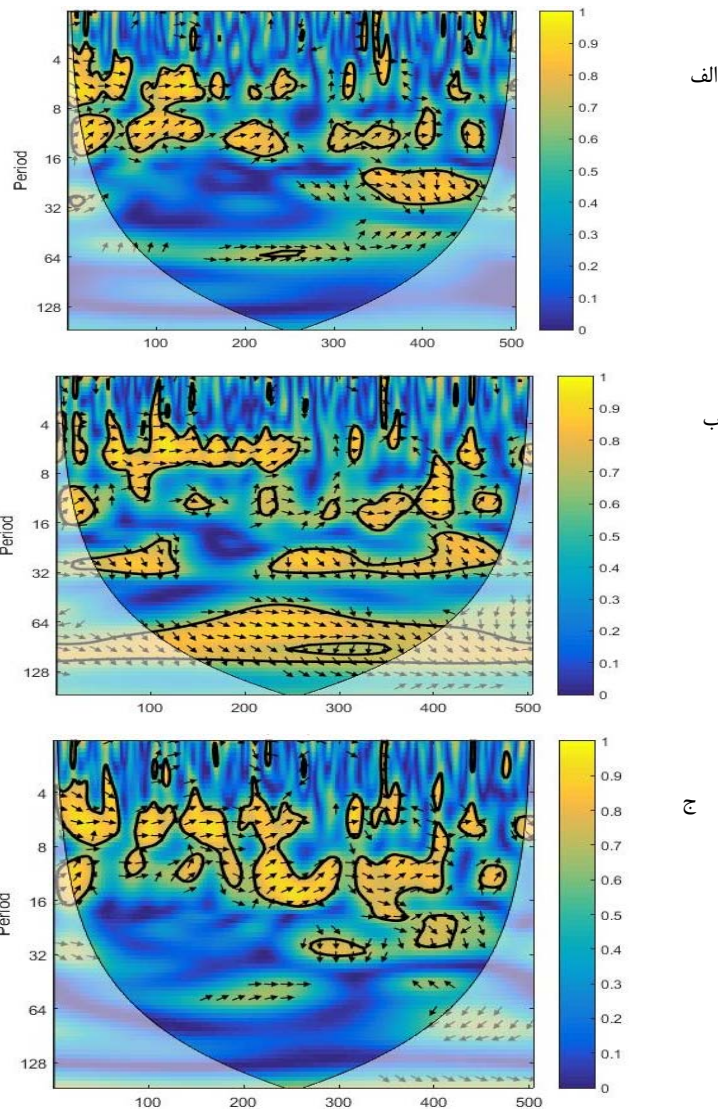
شکل (۳): طیف توان موجکی الف) بارش ایستگاه سامیان، ب) بارش ایستگاه گیلانده، ج) بارش ایستگاه کوزه تپراقی و د) رواناب خروجی دشت.

سمت چپ بیانگر غیرهم فاز بودن آن‌ها می‌باشد، پیکان‌های به سمت بالا یا پایین نیز یعنی یک سری زمانی با زاویه ۹۰ درجه به دیگری منجر می‌شود. جهت پیکان‌ها نشان‌دهنده تأخیر فازی بین هر یک از ایستگاه‌های بارش و رواناب خروجی دشت است. بدین معنی که آیا تغییرات ایجاد شده در پارامتر بارش ایستگاه‌های سامیان، گیلانده و کوزه تپراقی به صورت مستقیم روی رواناب خروجی دشت اثر می‌گذارند یا با یک تأخیر همراه خواهند بود. به طور کلی، غیرهمسوی بودن جهت پیکان‌ها با زاویه تقریبی، بیانگر این واقعیت است که با افزایش میزان بارش ایستگاه‌ها، نوسانات بدون تأخیر زمانی کاهش و با کاهش میزان این پارامترها، نوسانات رواناب افزایش می‌یابد. درحقیقت، پارامترهای هیدرولوژیکی بارش به طور مستقیم و به صورت عکس روی نوسانات رواناب دشت تأثیر می‌گذارند. طول محدود داده‌های سری زمانی خطاهایی در ابتدا و انتهای طیف توانی موجک ایجاد می‌کند؛ برای کاهش این خطاها از مخروط نفوذ استفاده می‌شود و منطقه‌ای از طیف موجک را مشخص می‌کند که ناپیوستگی

مطابق شکل‌های (۲) و (۳) دوره‌های فرکانسی ۸-۴ ماهه (پریود ۶ ماه) و ۱۶-۸ ماهه (پریود ۱۲ ماهه) درون پارامترهای هیدرولوژیکی بارش و رواناب مؤثر بودند. در بررسی ارتباط فرکانسی بین پارامترهای بارش و رواناب، ارتباط موجکی بین پارامترهای بارش و رواناب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل (۴) وابستگی موجکی را بین ایستگاه‌های بارش با رواناب خروجی دشت اردبیل را نشان می‌دهد. در هر سه قسمت الف، ب و ج شکل (۴)، مشاهده می‌شود که رابطه بین هر سه ایستگاه بارش با رواناب در دوره‌های ۶ ماهه و ۱۲ ماهه در برخی ماه‌ها قوی بوده و معنی‌دار می‌باشد. ایستگاه سامیان در دوره‌های دیگر از جمله دوره ۲ ساله مشاهده می‌گردد. در نمودار ارتباط موجکی نیز، معنی‌داری آماری در سطح ۵٪ با خطوط ضخیم سیاه‌رنگ و فاز ارتباط بین مناطق با جهت پیکان‌ها نمایش داده شده است. در حقیقت تأخیر نسبی بین سری‌های زمانی با استفاده از پیکان‌های فازی بررسی می‌شوند. پیکان‌های به سمت راست نشان‌دهنده هم‌فاز بودن دو سری زمانی و پیکان‌های به

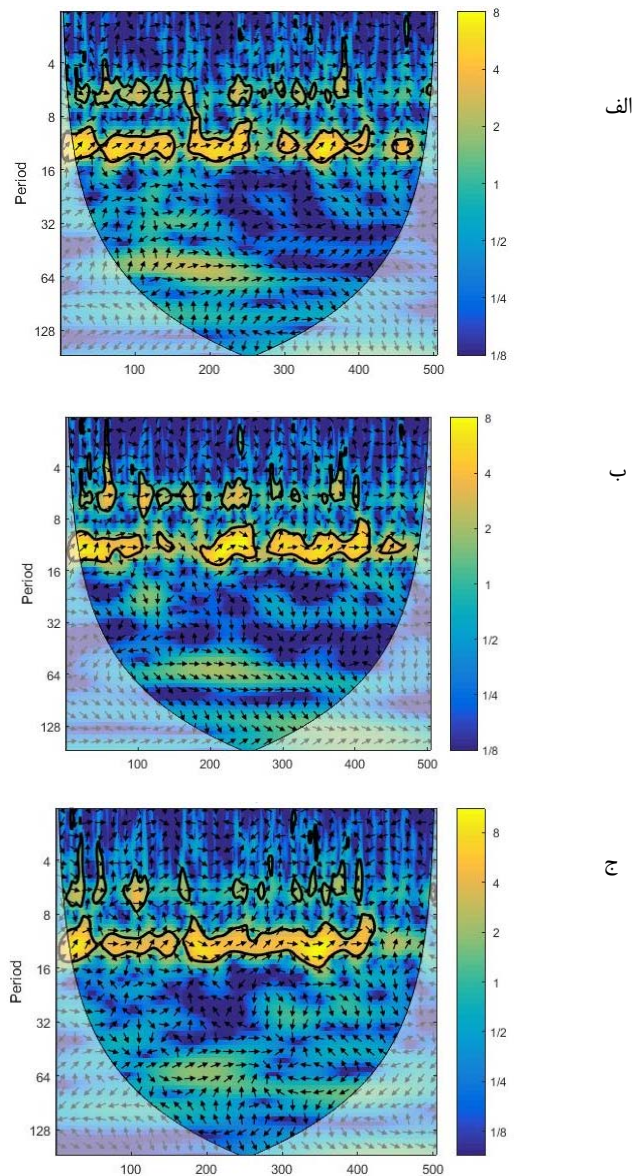
دو انتهای سری زمانی و تأثیرات لبه‌ها نمی‌تواند نادیده گرفته شود.



شکل (۴): وابستگی موجکی بین ایستگاه رواناب خروجی دشت اردبیل با الف) بارش ایستگاه سامیان، ب) بارش ایستگاه گیلانده و ج) بارش ایستگاه کوزه تپراقی

لازم به ذکر است که در این شکل، محیط‌های مشخص شده دارای واریانس واحد هستند و بردارها تفاوت فاز بین نوسانات بارش با رواناب را نشان می‌دهند، خطوط ضخیم سیاه‌رنگ نشان‌دهنده سطح معنی‌داری ۵٪ و خطوط نازک سیاه‌رنگ نشان‌دهنده مخروط نفوذ می‌باشند. همچنین، محیط‌های مشخص شده نشان‌گر مجذور ارتباط موجکی می‌باشند و بردارها، تفاوت فاز بین نوسانات بارش با رواناب را نشان می‌دهند.

شکل (۵) ارتباط موجکی متقابل را بین ایستگاه‌های بارش سامیان، گیلانده و کوزه تپراقی با رواناب خروجی دشت اردبیل (ایستگاه سامیان) را نشان می‌دهد. در این شکل نیز ارتباط موجکی متقابل تک‌تک ایستگاه‌های بارش با رواناب ایستگاه سامیان محاسبه می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد دوره‌های تناوب ۸-۴ ماه و ۱۶-۸ ماه بین پارامترهای بارش و رواناب مشهود است.



شکل (۵): ارتباط موجکی متقابل بین ایستگاه رواناب خروجی دشت اردبیل با (الف) بارش ایستگاه سامیان، (ب) بارش ایستگاه گیلانده و (ج) بارش ایستگاه کوزه تپراقی

نتیجه گیری و پیشنهادات

پارامترهای بارش با رواناب، تأثیر دوره‌های تناوب ۸-۴ ماهه و ۱۶-۸ ماهه بیشتر از دوره‌های فرکانسی دیگر بود.

در تکمیل پژوهش حاضر می‌توان پیشنهادهایی را برای مطالعات بعدی مطرح نمود. می‌توان از همین ابزار رویدادهای روزانه و سالانه نیز استفاده کرد تا نتایج به دست آمده با این نتایج مقایسه شود. به علاوه، امکان استفاده از سایر موجک‌های مادر برای تحلیل داده‌ها نیز وجود دارد. همچنین پیشنهاد می‌شود، این کار در مورد ارتباط دیگر پارامترهای هیدرولوژیکی از جمله ارتباط بارش و تراز آب زیرزمینی و نیز ارتباط رواناب با تراز آب زیرزمینی نیز استفاده گردد.

در مطالعه حاضر، مفهوم ارتباط موجکی بین سری‌های زمانی، همبستگی‌های موضعی بین دو سری زمانی معرفی شد. به منظور تعیین دوره زمانی مؤثر در ارتباط بین پارامترهای بارش سه ایستگاه با رواناب خروجی دشت اردبیل از معیار ارتباط موجکی استفاده شد. برای این منظور ارتباط موجکی سری زمانی رواناب در خروجی حوضه دشت اردبیل با بارش‌های ایستگاه‌های مختلف دشت در مقیاس ماهانه بررسی شدند. دوره‌های فرکانسی ۸-۴ ماهه و ۱۶-۸ ماهه در روند پارامترهای بارش و دوره فرکانسی ۱۶-۸ ماهه در روند پارامتر رواناب مؤثر بودند. با توجه به این مورد، در ارتباط

منابع

11. Labat D., Ababou R. and Mangin, A. (2001). Introduction of wavelet analyses to rainfall/runoffs relationships for a karstic basin: the case of Licq-Atherey karstic system (France). *Ground Water*, 39(4): 605–615.
12. Labat D., Ababou R. and Mangin A. (2002). Analyse multiresolution croisee de pluies et de bits de sources karstiques. *Comptes Rendus Geoscience*, 334: 551–556.
13. Labat D. (2005). Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology*, 314: 275-288.
14. Lachaux J.P., Lutz A., Rudrauf D., Cosmelli D., Le Van Quyen M., Martinerie J. and Varela, F. (2002). Estimating the time-course of coherence between single trial brain signals: an introduction to wavelet coherence. *Neurophysiology Clinic*, 32: 157–174.
15. Li, H. and Nozaki, T. (1997). Application of wavelet cross-correlation analysis to a plane turbulent jet. *JSME International Journal*, Series B 40 (1): 58–66.
16. Maraun D. and Kurths J. (2004). Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(4): 505-514.
17. Nourani V., Nezamdoost N., Samadi M. and Vousoughi F.D. (2015). Wavelet-based trend analysis of hydrological processes at different timescales. *Journal of Water and Climate Change*, 6(3): 414-435.
18. Nourani V. and Mousavi S. (2016). Spatiotemporal groundwater level modeling using hybrid artificial intelligence-meshless method. *Journal of Hydrology*, 536: 10-25.
19. Ng E.K. and Chan, J.C. (2012). Internal variations of tropical cyclone activity over the north Indian Ocean. *International Journal of Climatology*, 32(6): 819-830.
20. Onorato M., Salvetti M.V., Buresti G. and Petagna P. (1997). Application of a wavelet cross-correlation analysis to DNS velocity signals. *European Journal of Mechanics*, B 16(4): 575–597.
21. Percival D.B. and Walden A.T. (2006). *Wavelet methods for time series analysis* (Vol. 4). Cambridge university press.
22. Torrence C. and Webster P.J. (1999). Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *Journal of Climate*, 12: 2679–2690.
23. Walnut D.F. (2002). *An introduction to wavelet analysis*. Birkhauser, Basel, Switzerland.
1. قاسم‌زاده م، آزاد ن و شرقی، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر پارامترهای هیدروکلیماتولوژیکی روی سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از معیار ارتباط موجکی. *مجله پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست*، شماره ۱، صفحه‌های ۳۷ تا ۵۰.
2. Boggess A and Narcowich FJ. (2012). *A first course in wavelets with fourier analysis*. Prentice Hall, New York.
3. Fang Z, Bogena H., Kollet S., Koch J., and Vereecken H. (2015). Spatio-temporal validation of long-term 3D hydrological simulations of a forested catchment using empirical orthogonal functions and wavelet coherence analysis. *Journal of hydrology*, 529: 1754-1767.
4. Farge M. (1992). Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual review of fluid mechanics*, 24(1): 395-458.
5. Gardner W.A. (1992). A unifying view of coherence in signal processing. *Signal Processing*, 29: 113–140.
6. Gurley K. and Kareem A. (1999). Applications of wavelet transforms in earthquake, wind and ocean engineering. *Engineering structures*, 21(2): 149-167.
7. Grinsted A., Moore J.C. and Jevrejeva S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6): 561-566.
8. Henderson R.D., DayLewis F.D. and Harvey C.F. (2009). Investigation of aquifer estuary interaction using wavelet analysis of fiber optic temperature data. *Geophysical Research Letters*, 36(6).
9. Holman I.P., Rivas-Casado M., Bloomfield J.P. and Gurdak J.J. (2011). Identifying non-stationary groundwater level response to North Atlantic ocean-atmosphere teleconnection patterns using wavelet coherence. *Hydrogeology Journal*, 19(6):1269-1278.
10. Jevrejeva S., Moore J.C., and Grinsted A. (2003). Influence of the Arctic Oscillation and El Niño/Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21).

Measure The Effect of Rainfall Parameters on Runoff Using Wavelet Coherence Meas

Farnaz Daneshvar Vousoughi*⁴³

Abstract

In this research wavelet coherence measure is implemented for evaluating the relations and effect of rainfall parameters over many years on runoff fluctuations that is powerful method for testing proposed linkages between two time series. In this way, monthly Hydro climatological data such as 3 rainfall stations, one runoff in the outlet of Ardabil plain were used. The results illustrate that 8-12 and 8-16 month modes of variability were seen in most strongly in precipitation. The significance of shared 8-16 month periodicity with 95% confidence in runoff time series was confirmed through continuous wavelet transform and Wavelet Power Spectrum graphs. The results of wavelet coherence and cross wavelet transform showed that 8-16 month had significance periodicity between rainfall and runoff. Also, wavelet transform coherence and cross wavelet transform graphs showed 8-16 month periodicity was conceded as dominant period between rainfall and runoff parameters.

Keywords:

Wavelet transform coherence, Rainfall, Ardabil plain, effective period, Runoff.

⁴³ Department of Civil Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.
fdaneshvar.vousoughi@gmail.com