

بررسی تغییرات فرآیندهای هیدرولوژیکی با استفاده از معیاره موجک-آنتروپی مطالعه موردی: دریاچه ارومیه

وحید نورانی^{۱*}، سویل رنجبر^۲ و فرانک توتونچی^۲

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از نقشه‌های زمینی و عکس‌های ماهواره‌ای برای بررسی تغییرات هیدروژئومورفولوژیکی حوضه‌ها مرسوم گشته است. لیکن این روش‌ها اغلب بر هزینه و زمان‌بر بوده و یا به دلیل وسعت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه، بررسی همه جانبه تغییرات کاربری اراضی امکان پذیر نیست؛ لذا معیار پیچیدگی که در تحلیل سری‌های زمانی مطرح است می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی و سنجش میزان تغییرات فرایندهای هیدرولوژیکی موجود در یک حوضه باشد. با محاسبه مقدار پیچیدگی حوضه می‌توان بی‌نظمی موجود در حوضه را به دست آورد که تغییرات بی‌نظمی و یا پیچیدگی حوضه نشان‌دهنده تغییرات هیدرولوژیکی به وجود آمده در حوضه است. در این تحقیق برای سنجش میزان پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از روش جدیدی به نام روش موجک-آنتروپی استفاده شده است. در این روش ابتدا سری‌های زمانی فرایندهای هیدرولوژیکی مورد نظر به بازه‌های زمانی کوچک‌تر تقسیم شده و هرکدام از این زیرسری‌ها با استفاده از تبدیل موجک تجزیه و در نهایت معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی برای هر یک از بازه‌های زمانی محاسبه شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن هستند که علاوه بر کاهش تراز آب در دریاچه ارومیه، نوسانات سطح آب نیز در حال کاهش است، بنابر این الگوی نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه در حال تغییر است که این تغییر الگو سبب کاهش پیچیدگی تراز آب دریاچه شده است. کاهش پیچیدگی تراز آب می‌تواند در اثر عوامل طبیعی نظیر تغییر نوسانات بارش، دما، رطوبت و یا عوامل انسانی باشد. عوامل انسانی نظیر افزایش جمعیت، توسعه شهرسازی و ... تأثیر مستقیم در کاهش نوسانات سری زمانی رواناب دارد. طبق نتایج حاصل از بررسی تغییرات پیچیدگی سری‌های زمانی بارش، دما، رطوبت و رواناب، پیچیدگی سری زمانی رواناب منطقه در دوره زمانی مورد مطالعه کاهش بیشتری (۵۷/۹۲٪) نسبت به پیچیدگی سری‌های زمانی بارش (۱/۹٪) و دما (۷/۰۵٪) داشته است و این نشان می‌دهد که دلیل اصلی کاهش پیچیدگی تراز آب دریاچه ارومیه مربوط به کاهش پیچیدگی رواناب می‌باشد. بنابر این نقش عوامل انسانی در کاهش پیچیدگی تراز آب دریاچه ارومیه به مراتب بیشتر از عوامل طبیعی بوده است.

واژگان کلیدی: فرآیندهای هیدرولوژیکی، معیار پیچیدگی، موجک-آنتروپی، حوضه دریاچه ارومیه.

۱- مقدمه

جبران نشده و تراز آب سیر نزولی داشته، بلکه نوسانات سطح آب به شدت کاهش یافته و در نتیجه الگوی تغییرات سطح آب دریاچه تغییر کرده است. این تغییر الگوی سطح آب و خارج شدن از حالت طبیعی را می‌توان نوعی بیمار شدن دریاچه تصور کرد. هیدرولوژیست‌ها همواره با چالش نحوه تعیین میزان تغییرات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه‌های آبریز روبه‌رو هستند. میزان تغییرات موجود در هر حوضه متناسب با عوامل مؤثر انسانی و همچنین تغییرات طبیعی نظیر تغییر اقلیم^۱ در آن منطقه می‌باشد. عوامل مؤثر انسانی، فعالیت‌هایی هستند که به وسیله آن انسان محیط را تغییر داده و بر اقلیم تأثیر می‌گذارد. لذا نیاز به ابزاری است که بتواند تغییرات هیدروژئومورفولوژیکی

با توجه به مشکلات پیش آمده برای دریاچه ارومیه که عمدتاً از عدم اجرای مدیریت یکپارچه منابع آب در این حوضه آبریز نشأت گرفته است، انجام مطالعات جامع با رویکردی همه جانبه در این حوضه آبریز ضروری به نظر می‌رسد. کاهش شدید تراز آب دریاچه ارومیه در چند سال اخیر ناشی از عوامل مختلفی است که در این بین خشکسالی، سدسازی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب حوضه دریاچه و کاهش مقدار ورودی به دریاچه نسبت به جریانات خروجی از دریاچه از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد. عوامل ذکر شده باعث تغییر شرایط طبیعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه شده است و در نتیجه تراز آب این دریاچه کاهش بی‌سابقه‌ای را تجربه می‌کند. از سال ۱۳۷۵ به بعد نه تنها کاهش سطح آب

1- Climate change

نوسانات و در نتیجه کاهش پیچیدگی سیگنال‌های فیزیولوژیکی می‌شود. Burioka و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۳ برای محاسبه مقدار پیچیدگی سیگنال EEG^۷ و همچنین پیچیدگی تغییرات تنفس انسان طی مراحل مختلف خواب، از آنتروپی تقریبی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که آنتروپی این دو سیگنال با هم مرتبط بوده و پیچیدگی هر دو با عمیق‌تر شدن خواب، کاهش پیدا می‌کند.

استفاده از روش‌های اشاره شده در بعضی مواقع باعث به وجود آمدن تناقض‌هایی می‌شود؛ به طوری که ممکن است برای یک فرایند پاتولوژیک^۸ معین میزان پیچیدگی نسبت به فرایند سالم، مقدار بیشتری داشته باشد. تناقض‌های به وجود آمده به این دلیل می‌باشد که روش‌های مذکور مقدار پیچیدگی را بدون در نظر گرفتن مقیاس‌های زمانی متفاوت محاسبه می‌کنند. Costa و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۲ در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که میزان آنتروپی با افزایش درجه بی‌نظمی افزایش پیدا می‌کند و برای سیستم‌های تصادفی^۹ مقدار آنتروپی بیشینه است؛ ولی افزایش آنتروپی، همیشه به معنی افزایش پیچیدگی دینامیکی نمی‌باشد. برای رفع این مشکل آن‌ها روش آنتروپی چند مقیاسی^{۱۰} یا MSE را ارائه کردند. با استفاده از این روش، سیگنال‌های پاتولوژیک و سالم به طور کامل قابل تشخیص می‌باشند. مشابه مطالعات فیزیولوژیکی، می‌توان از مفهوم تبیین میزان پیچیدگی سری‌های زمانی در مباحث هیدرولوژی نیز استفاده کرد؛ لیکن تحقیقات بسیار محدودی در این زمینه انجام شده است. به طور مثال Li و Zhang [۷] از روش MSE استفاده کرده و تغییرات پیچیدگی حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی^{۱۱} را طی ۱۳۱ سال با استفاده از داده‌های رواناب بررسی کردند. آن‌ها دبی رودخانه می‌سی‌سی‌پی را از سال ۱۸۷۳ تا ۲۰۰۴ به دو قسمت تقسیم کردند و به این نتیجه رسیدند که پیچیدگی حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی از سال ۱۹۴۰ شروع به کاهش کرده است و دلیل این کاهش را تغییرات زیاد پوشش گیاهی و کاربری زمین عنوان کردند. Chou [۸] برای بررسی میزان پیچیدگی، روش آنتروپی چند مقیاسی را بر سری‌های زمانی بارش و رواناب اعمال کرد و مشاهده نمود که نتایج به دست آمده در مقیاس‌های زمانی بالاتر با نتایج به دست آمده در مقیاس‌های زمانی پایین متفاوت می‌باشد.

به وجود آمده را به صورت کمی ارزیابی کند. تغییرات اعمال شده در طبیعت، مانند فعالیت‌های انسانی و همچنین تغییرات طبیعی موجود مانند تغییر اقلیم، باعث ایجاد تغییرات هیدروژئومورفولوژیکی^۱ در حوضه آبریز منطقه می‌شود. برای نشان دادن تأثیر تغییراتی مانند شهرسازی، سدسازی، توسعه کارخانجات صنعتی، تغییر روند رشد جمعیت در حوضه آبریز و همچنین تغییرات اقلیم و پوشش گیاهی روی فرایندهای هیدرولوژیکی، می‌توان از معیارهای متفاوتی استفاده کرد که یکی از این معیارها، معیار پیچیدگی^۲ است. این معیار می‌تواند شاخص مناسبی را در تخمین شرایط آبی جهت بهره‌گیری بهتر از منابع آب با استفاده از مدیریت صحیح منابع آب ارائه کند. تغییر مقدار پیچیدگی حوضه طی زمان مشخص، نشان‌دهنده میزان تغییرات هیدروژئومورفولوژیکی حوضه می‌باشد. در این تحقیق از یک ابزار جدید به نام موجک-آنتروپی^۳ جهت سنجش پیچیدگی و به تبع آن تعیین تغییرات هیدرولوژیکی روی داده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، استفاده شد. در این راستا، داده‌های هیدرولوژیکی ایستگاه منتخب واقع در حوضه دریاچه ارومیه از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ مورد استفاده قرار گرفت.

در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی برای محاسبه مقدار پیچیدگی سیگنال‌های مختلف صورت گرفته و یافتن معیار مناسب برای اندازه‌گیری پیچیدگی، یکی از بحث‌های مهم دانشمندان بوده است. Shannon [۱] در سال ۱۹۴۸ نظریه آنتروپی^۴ (محتوای اطلاعاتی) را ارائه کرد و آنتروپی را به عنوان شاخص سنجش اطلاعات، گزینش یا عدم قطعیت معرفی کرد. در علوم مختلف (از جمله مباحث پزشکی) محاسبه پیچیدگی سیگنال‌ها مبحث بسیار داغی است. Pincus [۲] در سال ۱۹۹۱، آنتروپی تقریبی^۵ را به عنوان معیاری برای پیچیدگی معرفی کرد. آنتروپی تقریبی در آنالیز میزان پیچیدگی سری‌های زمانی کوتاه مدت مؤثر است. Richman و Moorman [۳] در سال ۲۰۰۰ با انجام اصلاحاتی بر روی آنتروپی تقریبی، روش جدیدی به نام آنتروپی نمونه^۶ را معرفی کردند.

Goldberger و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۲ ثابت کردند با بروز بیماری، میزان پیچیدگی کاهش می‌یابد؛ چرا که بیماری باعث کاهش فعالیت‌های بدن و به تبع آن پایین آمدن دامنه

7- Electroencephalogram
8- pathologic
9- Random
10- Multiscale entropy
11- Mississippi

1 Hydrogeomorphological
2- Complexity
3- Wavelet entropy
4- Entropy
5- Approximate entropy
6- Sample entropy

های بیولوژیکی استفاده می‌شود، با اعمال تغییرات و تصحیحاتی در هیدرولوژی و مطالعه سیستم‌های هیدرولوژیکی و بررسی پیچیدگی آن‌ها استفاده نمود. تداخل اثر عوامل مختلف نظیر عوامل انسانی و عوامل محیطی در سیستم مورد نظر سبب پیچیده شدن سیستم می‌شود. همان‌طور که در بخش (۱) اشاره شد، روش‌های متعددی برای سنجش پیچیدگی وجود دارد. در این تحقیق برای سنجش میزان پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی از روش جدیدی به نام روش موجک-آنتروپی استفاده گردید. در بررسی پیچیدگی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، به دلیل ماهیت فصلی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده از روش موجک برای در نظر گرفتن مقیاس‌های زمانی متفاوت موجود در سری زمانی هیدرولوژیکی رویکرد مناسبی می‌باشد. در ادامه این بخش به بررسی تبدیل موجک، معیار آنتروپی و در نهایت معیار موجک-آنتروپی که از تلفیق مفاهیم موجک و آنتروپی حاصل شده است، پرداخته و سپس مطالعه موردی معرفی می‌شود.

۲-۱- معیار موجک-آنتروپی

تبدیل موجک یک روش جدید برای تحلیل زمان-فرکانس سیگنال‌های غیر ایستا می‌باشد. این تبدیل انعطاف‌پذیری بین مقیاس زمان و فرکانس را که در تبدیل فوریه وجود نداشت، فراهم می‌کند. موجک‌ها امکان تحلیل سیگنال‌ها در سطوح مختلف از مقیاس زمان را فراهم می‌آورند. موجک یک تابع زمانی است که طبیعت پرموج یا نوسانی دارد و انرژی آن به یک مدت متناهی از زمان محدود شده است. اگر $\Psi(x)$ جهت مشخص کردن موجک مادر استفاده شود، آن‌گاه تبدیل موجک پیوسته توسط عبارت زیر مشخص می‌شود [۱۳]:

$$w(a,b) = \int f(t) \times (1/\sqrt{a}) \times \Psi(t-b/a) dt \quad (1)$$

پارامتر a به عنوان مقیاس در نظر گرفته می‌شود و میزان کشش یا مدت زمان موجک را بیان می‌کند. مقادیر بالای مقیاس، اتساع موجک و در نتیجه کاهش قابلیت تفکیک زمانی و افزایش مقیاس فرکانس را باعث می‌گردد. بالعکس، مقدار پایین مقیاس متناظر با مقیاس زمانی بالا و مقیاس فرکانسی کم می‌باشد. پارامتر b پارامتر انتقال بوده و موقعیت موجک را بر روی محور زمان بیان می‌کند. این پارامتر تمرکز زمانی مورد نیاز را فراهم می‌کند. از آنجایی که در کارهای هیدرولوژیکی اغلب

عموماً سری‌های زمانی فرایندهای هیدرولوژیکی نایستا بوده لذا نظر به قابلیت تحلیل موجک در مواجهه با نوسانات فصلی فرایندهای هیدرولوژیکی، تبدیل موجک توسط هیدرولوژیست‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۹ تا ۱۱]. با ترکیب مفاهیم موجک و آنتروپی ابزار جدیدی به نام موجک-آنتروپی برای محاسبه پیچیدگی به دست آمده است. با استفاده از این روش می‌توان تشخیص داد که سیگنال اصلی در چه مقیاس زمانی بررسی شود. Rosso و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۶ سیگنال EEG را با استفاده از این ابزار بررسی و مشاهده کردند که با گذشت زمان و ایجاد بیماری، میزان پیچیدگی کاهش یافته و سیستم به رفتار منظم‌تری گرایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که در بررسی پیچیدگی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، به دلیل ماهیت فصلی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده از روش موجک-آنتروپی می‌تواند به نتایج مطلوبی منجر گردد که در تحقیق حاضر برای اولین بار از این معیار در بررسی پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده شده است.

۲-۲- مواد و روش‌ها

سیستم‌های پیچیده، پدیده‌هایی هستند که به علت ارتباط بین اجزای آن و همچنین ارتباط با دیگر پدیده‌ها، از پیچیدگی بالایی برخوردار بوده و رفتار جمعی متفاوتی از خود بروز می‌دهند. بدین معنی که با مطالعه تک تک اجزای یک سیستم پیچیده نمی‌توان به رفتار جمعی آن دست یافت. بنابر این درک پیچیدگی در سیستم‌ها نیازمند درک ماهیت این سیستم‌ها و ساختار و اجزای تشکیل دهنده آن خواهد بود و هدف از گرایش به مطالعه پیچیدگی، توسعه ابزار ریاضی، محاسباتی و یا شبیه‌سازی با تکیه بر فهم رفتارهای فیزیکی حاکم بر آن‌ها، به منظور توصیف و پیش‌بینی این گونه پدیده‌ها می‌باشد. سیستم‌های انسانی مانند علوم روانشناختی، اجتماعی و اقتصادی، در عصر حاضر که سرعت و حجم ارتباطات و اطلاعات به طور باور نکردنی افزایش یافته است، با مسائل پیچیده‌ای دست و پنجه نرم می‌کند. روش‌های کلاسیک در پاسخ به این دست از پرسش‌ها بسیار ناتوان هستند. چنین عواملی باعث گرایش به سمت مطالعات و تحقیقات میان رشته‌ای شده است. در این رویکردها معمولاً از روش‌های معمول در یک رشته و پدیده برای توصیف و درک بهتر پدیده‌ها و مدل‌سازی آن‌ها در رشته‌ای دیگر استفاده می‌شود. همچنین مرز بین سیستم‌ها از بین رفته و به تبع آن علوم میان رشته‌ای اصالت بیشتری پیدا کرده‌اند. لذا دور از ذهن نیست که بتوان از رویکردها و روش‌هایی که در مطالعه سیستم-

زمانی جزئی^۴ از مراتب $m = 1, 2, 3, \dots, M$ هستند. به بیان دیگر، دیگر، هر یک از زیرسری‌ها، یک دوره تناوب از سری اصلی را شامل می‌شوند که خواص همان دوره را بیان می‌کنند. از این رو در انتخاب تعداد زیرسری‌ها و یا به عبارتی درجه تجزیه یک سری بایستی تعداد الگوهای تناوب موجود و یا محتمل در سری زمانی را ملاک انتخاب قرار داد.

انرژی موجک که آن را با E نشان می‌دهند، برای هر کدام از زیرسری‌های زمانی به صورت جداگانه محاسبه می‌شود که برابر است با:

$$E_m = |W_m(t)|^2 \quad (۸)$$

برای کمی کردن میزان نوسانات انرژی سیگنال و همچنین به دست آوردن میزان پیچیدگی با استفاده از انرژی‌های به دست آمده می‌توان از آنتروپی استفاده کرد. شانون در سال ۱۹۴۸، آنتروپی (محتوای اطلاعاتی) را به صورت ریاضی و با استفاده از توزیع احتمالاتی داده‌ها فرمول‌بندی کرده و آن را به عنوان معیار سنجش بی‌نظمی، آشفتگی، عدم قطعیت و اطلاعات معرفی کرد [۱]. اگر X متغیر تصادفی گسسته با مقادیر x_1, x_2, \dots, x_N و احتمالات متناظر P_1, P_2, \dots, P_N باشد، آنتروپی شانون از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$H(x) = H(p) = -\sum_{i=1}^N p(x_i) \log[p(x_i)] \quad (۹)$$

که در این رابطه:

$H(X)$ آنتروپی X است که تابع آنتروپی شانون نیز نامیده می‌شود.

$P = \{p_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ توزیع احتمال است و به صورت تعریف می‌شود.

احتمال وقوع یک پدیده، عدم قطعیت آن و میزان آنتروپی یا اطلاعات با هم مرتبط هستند. اگر احتمال وقوع پدیده‌ای زیاد باشد، میزان آنتروپی آن کم است و بالعکس. به عبارت بهتر، برای تبیین پدیده‌ای با احتمال وقوع کم و عدم قطعیت زیاد اطلاعات (آنتروپی) زیادی لازم است.

با ترکیب مفاهیم موجک و آنتروپی، ابزار جدیدی به نام موجک-آنتروپی برای محاسبه پیچیدگی به دست می‌آید. با استفاده از این روش می‌توان سیگنال اصلی را در مقیاس‌های

سری‌های زمانی گسسته مورد نظر می‌باشند، برای تجزیه سری زمانی می‌توان از فرم گسسته تبدیل موجک (DWT) استفاده کرد. ضرایب موجک در هر نقطه از سیگنال (b) و برای هر مقدار از مقیاس (a) با رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left[\frac{x-b}{a}\right] \quad (۲)$$

در DWT، پارامترهای انتقال و مقیاس به صورت غیر پیوسته و با بهره‌گیری از روند دودویی^۲ انتخاب می‌شوند، به نحوی که:

$$a = 2^m, b = 2^m n \quad (۳)$$

که m و n اعداد صحیح هستند. در نتیجه با جایگذاری a و b در رابطه (۲):

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \psi[2^{-m} x - n] \quad (۴)$$

برای سری زمانی گسسته x_i تبدیل دودویی موجک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} \psi(2^{-m} i - n) x_i \quad (۵)$$

که در این رابطه، N طول سری زمانی و $T_{m,n}$ ضریب موجک برای a و b منتخب است و معکوس آن به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$x_i = \bar{T}(t) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{M-m-1} T_{m,n} 2^{-m/2} g(2^{-m} i - n) \quad (۶)$$

که در آن M طوری انتخاب شده که $N = 2^M$. رابطه فوق به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$x_i = \bar{T}(t) + \sum_{n=1}^M W_m(t) \quad (۷)$$

که در رابطه اخیر، \bar{T} زیرسری تخمین^۳ (که دوره تناوب فصلی غالب سری زمانی اصلی را دارد) از مرتبه M و W_m ها زیرسری

سهند، میشوداغ، مهاباد، تخت سلیمان و ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه واقع شده است. این دریاچه در مغرب فلات آذربایجان از شمال به جنوب کشیده شده است که آب‌های حوضه‌ای به مساحت ۳۵۰۰۰ کیلومتر مربع از فلات آذربایجان را به خود اختصاص داده است. دریاچه ارومیه از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۷ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۶ درجه طول شرقی قرار گرفته است. این دریاچه ۱۴۰ کیلومتر طول و در پهن‌ترین نقطه ۴۰ کیلومتر عرض دارد. مساحت کلی آن بالغ بر ۶۰۰۰ کیلومتر مربع و محیط آن ۴۶۳ کیلومتر است. میزان بارندگی سالانه در حوضه حدوداً ۳۰۰ میلی‌متر و درجه حرارت حوضه بین ۱۷- و ۳۶+ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. ایستگاه دبی‌سنجی انتخاب شده در منطقه ونیاری روی آجی‌چای، در قسمت غربی دریاچه ارومیه قرار دارد. ایستگاه هواشناسی برای سنجش بارش، دما و رطوبت، ایستگاه تبریز واقع در شهر تبریز می‌باشد. داده‌های روزانه تراز آب دریاچه، بارش، دما، رطوبت و دبی در بازه زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی و سازمان هواشناسی تبریز دریافت شدند. موقعیت جغرافیایی ایستگاه دبی-سنجی ونیاری و هواسنجی تبریز در شکل (۱) نشان داده شده است که مشخصات جغرافیایی این ایستگاه و ایستگاه باران‌سنجی تبریز در جدول (۱) آورده شده است. شکل‌های (۲) تا (۶) به ترتیب نشان دهنده سری زمانی داده‌های رواناب در ایستگاه ونیاری، بارش، رطوبت، دما در ایستگاه تبریز و تراز آب دریاچه ارومیه می‌باشد.

برای بررسی تغییرات پیچیدگی بهتر است ایستگاهی که حوضه بالادست آن دستخوش تغییرات عمده بوده است انتخاب شود. ایستگاه ونیاری یکی از ایستگاه‌هایی است که حوضه مربوطه آن در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات فاحشی بوده است و در این منطقه ده‌ها سد در سال‌های اخیر ساخته شده است. بنابراین، معیار برای انتخاب این ایستگاه بیشتر بودن تغییرات انسانی در این منطقه بوده است. همچنین کیفیت و طول داده‌ها در این تحقیق از اهمیت بالایی برخوردار است و داده‌های این ایستگاه نسبت به ایستگاه‌های مجاور مناسب‌تر و کامل‌تر بودند.

در این مطالعه، علاوه بر محاسبه پیچیدگی سری زمانی دبی در سه بازه زمانی متفاوت، پیچیدگی سری‌های زمانی بارش، دما و رطوبت نیز محاسبه و مقایسه گردید. جدول (۲) مشخصات آماری سری‌های زمانی مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۵۰-۱۳۹۲ را نشان می‌دهد.

زمانی متفاوت بررسی کرد. در بررسی پیچیدگی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، به دلیل دارا بودن ماهیت فصلی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده از روش موجک-آنتروپی می‌تواند به نتایج مناسبی منتهی گردد. در این روش، سری زمانی به وسیله تبدیل موجک به چندین زیرسری در مقیاس‌های زمانی متفاوت تفکیک و سپس آنتروپی با استفاده از ضرایب زیرسری‌ها و انرژی موجود در زیر سری‌های حاصل محاسبه می‌شود.

در روش موجک-آنتروپی برای سنجش معیار پیچیدگی و میزان تغییرات از زیرسری‌های زمانی جزئیات در مقیاس زمانی مورد نظر، برای در نظر گرفتن تغییرات و نوسانات جزئی استفاده می‌شود. در این روش، پس از تجزیه سری به زیرسری‌های تقریب و جزئیات در مقیاس مورد نظر و به دست آوردن ضرایب جزئی، انرژی موجود در هر زیرسری جزئی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

$$E_m = \|r_m\|^2 = \sum_n |C_m|^2 \quad (10)$$

در این رابطه m مقیاس تفکیک سیگنال اصلی، C_m ضرایب جزئی موجود، و n تعداد ضرایب موجود در مقیاس m است. انرژی کل از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$E_{tot} = \sum_m \sum_n |C_m(n)|^2 = \sum_m E_m \quad (11)$$

انرژی موجود در زیرسری جزئیات، به صورت زیر نرمال‌سازی می‌شود:

$$\rho_m = \frac{E_m}{E_{tot}} \quad (12)$$

و در نهایت با استفاده از آنتروپی شانون (رابطه (۹)) معیار مورد نظر با عنوان (معیاره) موجک-آنتروپی، SWS برای محاسبه پیچیدگی به دست می‌آید:

$$SWS = -\sum_m \rho_m \cdot \ln[\rho_m] \quad (13)$$

۲-۲- مطالعه موردی

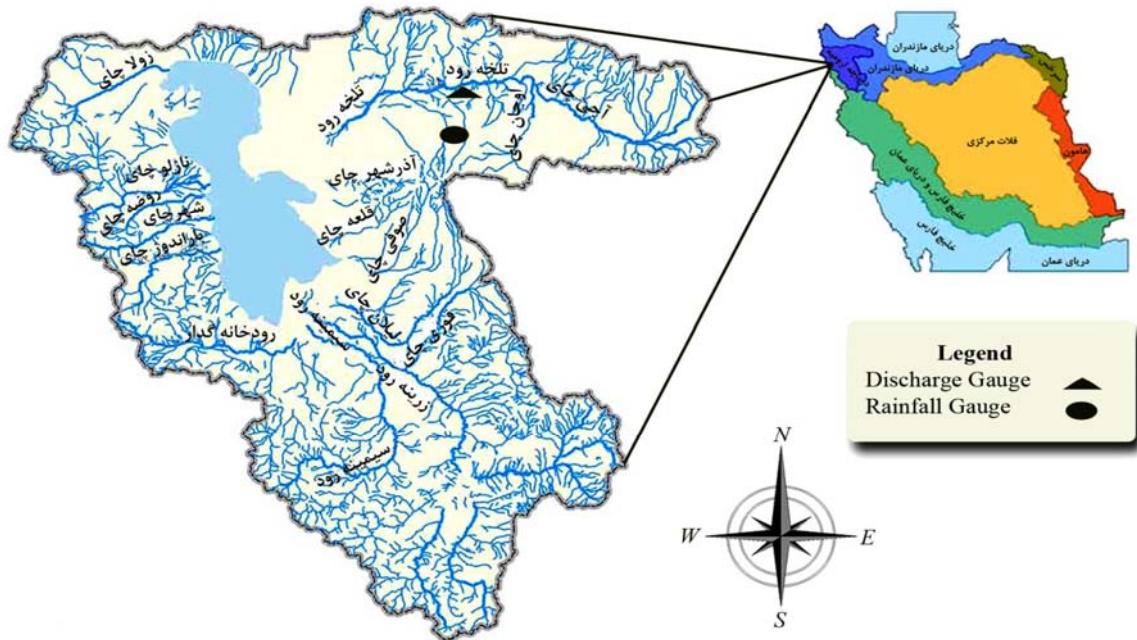
دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران بزرگترین و مرتفع‌ترین دریاچه ایران است. این دریاچه بین استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی در گودترین بخش آن، میان کوه‌های سیلان،

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

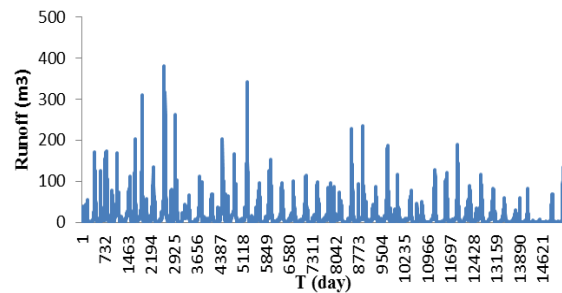
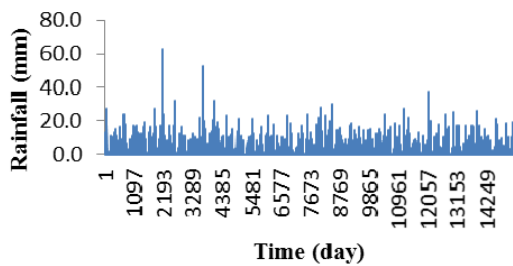
ایستگاه	کد ایستگاه	سال تأسیس	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع جغرافیایی
هیدرومتری ونبار	۳۱۰۱۵	۱۳۲۸	۴۶-۲۶	۳۸-۰۷	۱۴۶۰
هواشناسی تبریز	۳۱۰۴۱	۱۳۲۹	۴۶-۲۲	۳۸-۰۴	۱۴۹۰

جدول ۲- مشخصات آماری سری‌های زمانی مورد مطالعه

سری زمانی ۴۲ ساله	بیشینه	کمینه	میانگین	ضریب تغییرات
دبی (متر مکعب بر ثانیه)	۳۸۱/۰۰	۰/۰۰	۱۲/۳۹	۲۳/۸۴
بارش (میلی‌متر)	۶۳/۰۰	۰/۰۰	۳۶۷۰۸/۰۰	۲/۵۱
دما (درجه سلسیوس)	۳۴/۰۰	-۱۷/۹	۴۲۱۳۶/۰۰	۱۰/۵۱
رطوبت (/)	۹۸/۰۰	۱۰/۰۰	۵۲/۰۰	۴۲۰۸۱/۰۰
تراز آب (متر)	۱۲۷۸/۴۱	۱۲۷۰/۴	۱۲۷۵/۱۲۹	۴۲۲۱۷/۰۰



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه (برگرفته از آرشیو سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی)



شکل ۳- نمودار بارش از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲

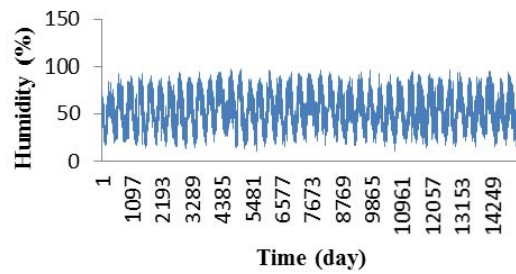
شکل ۲- نمودار دبی از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲

آب پرداخت. همان طور که اشاره شد، پیچیدگی توانایی خود- سازماندهی سیستم و دستیابی به مرزی بهینه از تعامل و پاسخگویی به شرایط محیط در سیستم‌های پیچیده است. در مورد دریاچه ارومیه با توجه به این کاهش بی سابقه سطح آب، کاهش نوسانات سطح آب به معنی بیمار شدن دریاچه بوده به طوری که نمی‌تواند کاهش تراز آب را جبران کرده و خود را سامان‌دهی کند. بیمار شدن دریاچه می‌تواند ناشی از دلایل انسانی و طبیعی باشد. یکی از روش‌های بررسی تغییرات پیچیدگی حوضه آبریز، مطالعه و بررسی تغییرات نوسانات فرایندهای هیدرولوژیکی و به خصوص تراز آب دریاچه می‌باشد. در این مطالعه، برای این منظور از روش معیار موجک-آنتروپی بر روی داده‌های تراز آب، دبی، بارش، رطوبت و دما در ایستگاه منتخب حوضه آبریز دریاچه استفاده شده است. با استفاده از این داده‌ها می‌توان میزان تأثیر عوامل محیطی و انسانی را در کاهش این پیچیدگی و ارتباط آنها با هم را مشاهده کرد.

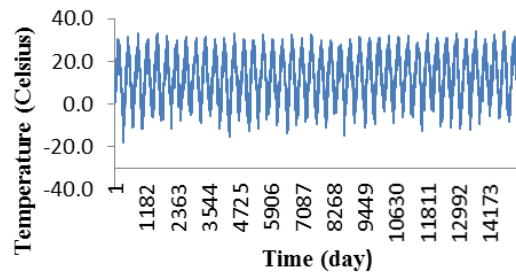
۳-۱- بررسی تغییرات پیچیدگی تراز آب دریاچه ارومیه

شکل (۶) نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه را در ۴۲ سال گذشته نشان می‌دهد. از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۹ چیزی حدود ۷ متر کاهش تراز اتفاق افتاده است. میانگین تراز آب سطح دریاچه ارومیه در سال ۱۳۴۶ معادل ۱۲۷۴ متر بوده است؛ لیکن تراز آب در سال ۱۳۷۴ به ۱۲۷۸/۴۸ متر رسیده است. در این سال اکثر تأسیسات موجود در سواحل دریاچه به زیر آب رفت. پس از این تاریخ، سطح آب دریاچه به شدت کاهش یافت. آمارها نشان می‌دهند از سال ۱۳۷۴ تاکنون تراز آب دریاچه ارومیه سیر نزولی داشته به طوری که در مرداد ماه ۱۳۸۸ به ارتفاع ۱۲۷۱/۴ متر از سطح آب‌های آزاد رسیده است که این میزان ۲/۷ متر کمتر از سطح تراز اکولوژیکی دریاچه، ۶/۹ متر کمتر از تراز حداکثری و ۴/۳ متر کمتر از متوسط درازمدت ۴۰ ساله آن است.

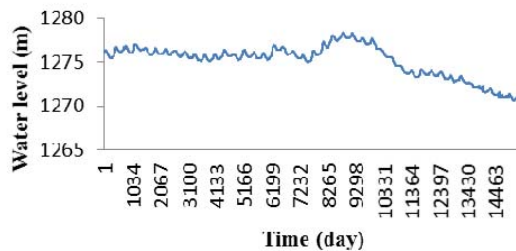
در حال حاضر در دریاچه ارومیه دو اتفاق در حال رخ دادن است. نخست این که میانگین ارتفاع سطح آب هر ماه نسبت به ماه مشابه در سال قبل در حال کاهش می‌باشد و دیگر آن که الگوی نوسانات تراز آب در حال تغییر است. در این تحقیق برای بررسی تغییرات رخ داده در میزان نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی، ابتدا سری زمانی روزانه تراز آب از سال ۱۳۵۰ تا سال ۱۳۹۲ به ۳ زیرسری ۱۴ ساله به شرح زیر تقسیم شده و سپس هر کدام از زیر سری-های ۱۴ ساله با استفاده از تبدیل موجک و موجک مادر db2 در مرتبه ۵ تجزیه شد.



شکل ۴- نمودار رطوبت از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲



شکل ۵- نمودار دما از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲



شکل ۶- نمودار تراز آب دریاچه ارومیه از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ (برگرفته از آمار آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی)

۳- نتایج و بحث

یکی از علایم وقوع تغییرات در یک حوضه آبریز، تغییر میزان نوسانات و به عبارتی پیچیدگی سری‌های زمانی فرایندهای مختلف هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد. Li و Zhang [۷] به این نتیجه رسیدند که می‌توان حوضه آبریز را مانند بدن انسان در نظر گرفت؛ زیرا همان طور که کاهش پیچیدگی سیگنال‌های فیزیولوژیکی به معنی بیمار شدن بدن انسان است، کاهش پیچیدگی سیگنال‌های هیدرولوژیکی نیز نشان‌گر بیمار شدن حوضه آبریز است، به طوری که حوضه آبریز بیمار قادر به سازمان‌دهی خود نبوده و نمی‌تواند برای اکوسیستم مفید واقع شود. در سال‌های اخیر سطح آب دریاچه ارومیه کاهش بی-سابقه‌ای را تجربه می‌کند. لیکن با استفاده از معیار موجک-آنتروپی می‌توان به بررسی تغییرات رخ داده در نوسانات سطح

طبق نتایج حاصل در جدول (۳)، بیشترین مقادیر انرژی موجک برای سری زمانی تراز آب در مرتبه ۵ که همان مقیاس زمانی ماهانه ($۲^5=۳۲$) می‌باشد، نهفته شده است. بیشتر بودن مقادیر انرژی در این مقیاس نشان دهنده این است که فاکتور تراز آب به تغییرات زمانی ماهانه وابسته‌تر می‌باشد.

همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، معیار SWS یا موجک-آنتروپی به خصوص در بازه زمانی مورد مطالعه دوم (۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸)، کاهش چشمگیری (۷۲/۵٪) داشته است که این کاهش نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه میزان پیچیدگی تراز آب دریاچه ارومیه در این بازه زمانی می‌باشد. کاهش پیچیدگی تراز آب دریاچه یا کاهش نوسانات سطح دریاچه ارومیه، بیمار شدن دریاچه تحت عوامل مختلف انسانی یا محیطی را نشان می‌دهد که بیمار شدن دریاچه نهایتاً خشک شدن را در پی دارد. همان‌طور که ایجاد بیماری در بدن ابتدا با نشانه‌هایی همراه است، در مورد حوضه آبریز نیز این نشانه‌ها همان کاهش نوسانات ریزمقیاس سطح آب و در نتیجه کاهش پیچیدگی تراز آب است که از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ ایجاد شده و اثر آن کاهش تراز آب دریاچه که در سال‌های بعدی به وقوع پیوسته و تا حال ادامه داشته و روز به روز در حال تشدید است. این در حالی است که در این دوره سطح آب دریاچه بیشترین مقدار را تجربه می‌کرد که این بالا بودن سطح آب علی‌رغم شروع بیماری سیستم دریاچه ارومیه به صورت یک عامل گمراه کننده، مانع از اتخاذ تصمیمات پیشگیرانه گردید. با استفاده از ابزار پیچیدگی کاهش نوسانات و واکنش دریاچه ارومیه نسبت به تغییرات روی داده در حوضه، در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ قابل تشخیص بوده و با اقدامات لازم و به موقع جهت بهبود شرایط دریاچه، امکان جلوگیری از پیشرفت بیماری دریاچه در آن زمان وجود داشت.

در این تحقیق، برای بررسی ارتباط بیمار شدن دریاچه با عوامل محیطی، تغییرات روی داده در نوسانات سری‌های زمانی بارش، دما و رطوبت که مربوط به اقلیم منطقه مورد نظر می‌باشد و به عوامل انسانی بستگی ندارد، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین جهت بررسی عوامل انسانی نظیر توسعه کارخانجات، توسعه شهرسازی، افزایش جمعیت و تغییرات پوشش گیاهی در بیمار شدن دریاچه ارومیه، سری زمانی رواناب در ایستگاه انتخابی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل در ادامه آورده می‌شوند.

سری زمانی تراز آب از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ $W=$
 زیرسری زمانی تراز آب از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۴ $W_1=$
 زیرسری زمانی تراز آب از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ $W_2=$
 زیرسری زمانی تراز آب از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۲ $W_3=$
 تشابه فرم تابع موجک مادر با شکل سری‌های زمانی، مهمترین راهنما جهت انتخاب مناسب‌ترین تابع موجک مادر است [۱۶، ۱۷]. در این مطالعه تابع Daubechies-2 برای تجزیه سری‌های زمانی استفاده شده است که به صورت اختصاری db2 نامیده می‌شود. مرتبه تجزیه تمامی سری‌های زمانی در این تحقیق، ۵ انتخاب شده است. با این انتخاب دوره-های تناوب در حدود یک ماه در نظر گرفته می‌شوند [۱۷]. یعنی در مرحله تجزیه به وسیله موجک، هر کدام از سری‌های زمانی اصلی مورد بررسی به ۶ زیرسری زمانی (یک زیرسری تخمین و ۵ زیرسری جزئی) تجزیه می‌شوند. با استفاده از تبدیل دودویی موجک و برای سری‌های زمانی روزانه، با انتخاب مرتبه تجزیه ۵ می‌توان زیرسری‌های زمانی با دوره تناوب ۲ روز تا یک ماه را بررسی کرد. بعد از تجزیه سری زمانی، ضرایب جزئی برای هر ۵ زیرسری جزئی به دست آمد. با استفاده از ضرایب جزئی، انرژی موجک در هر مرتبه محاسبه شده و نرمال سازی شده و در نهایت با استفاده از انرژی‌های نرمال شده در هر مرتبه معیار SWS طبق رابطه (۱۳) برای هر زیرسری محاسبه گردید. انرژی زیرسری‌های جزئی حاصل از تجزیه سری زمانی اصلی در مرتبه ۵ و همچنین معیار SWS برای زیرسری‌های ۱۴ ساله تراز آب در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS برای زیرسری‌های ۱۴ ساله تراز آب و درصد تغییرات SWS

زیرسری‌های زمانی ۱۴ ساله	W3	W2	W1
E1	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۲
E2	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۲
E3	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶۲
E4	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۴۳
E5	۰/۰۰۷۱	۰/۰۱۰۴	۰/۰۳۰۱
E total	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۴۹	۰/۰۵۸
SWS	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵۱
درصد تغییرات	-۷/۱۴۲۹	-۷۲/۵۴۹	-

همان طور که مشاهده می‌شود درصد تغییرات معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی برای سری زمانی بارش بسیار ناچیز بوده و در نتیجه الگوی نوسانات بارش در طی ۴۲ سال اخیر دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشد. بنابر این این تغییرات جزئی در نوسانات بارش نمی‌تواند دلیل اصلی کاهش ۷۲ درصدی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه باشد.

با توجه به مقادیر انرژی در مراتب ۱ تا ۵ مشاهده می‌شود که مؤثرترین مقیاس زمانی در تغییرات انرژی موجود در زیرسری‌های جزئی سری زمانی بارش مرتبه اول یا مقیاس زمانی روزانه می‌باشد.

تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های محیطی است که جهان امروز به واسطه افزایش دما، از آن متأثر شده و در نتیجه آن الگوهای آب و هوایی تغییر کرده است. آمار ثبت شده، میانگین جهانی دمای هوا را در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی، ۱۴ درجه سلسیوس نشان می‌دهد؛ اما پس از آن، روند افزایش دما ادامه یافته به طوری که این میانگین در سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ به ۱۴/۲۹ درجه و از ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ به ۱۴/۴۴ درجه سلسیوس رسیده است [۱۸].

در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، میانگین دما در بازه زمانی ۱۳۵۰-۱۳۶۴، برابر ۱۱/۸ درجه سلسیوس، در بازه زمانی ۱۳۶۴-۱۳۷۸ برابر ۱۲/۴ درجه سلسیوس و نهایتاً در بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۹۲ این مقدار برابر ۱۳/۴ درجه سلسیوس بوده است. برخلاف تغییرات موجود در میزان دمای این منطقه، نوسانات دما در بازه‌های زمانی مورد مطالعه تغییرات جزئی داشته به طوری که این تغییرات جزئی می‌توانند نقش اندکی در کاهش شدید نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه ایفا کنند.

جدول ۵- انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS برای

زیرسری‌های ۱۴ ساله دما و درصد تغییرات SWS

T3	T2	T1	زیرسری‌های زمانی ۱۴ ساله
۰/۲۲۰۲	۰/۲۱۸۵	۰/۲۲۳۵	E1
۰/۴۰۹	۰/۴۵۵۲	۰/۴۵۲۵	E2
۰/۶۰۶۱	۰/۵۸۶۷	۰/۶۲۲۱	E3
۰/۵۱۲۲	۰/۵۴۴۴	۰/۵۵۱۶	E4
۰/۳۲۳۹	۰/۴۳۵۶	۰/۵۹۸۳	E5
۱/۷۴۷۴	۱/۸۰۴۸	۱/۸۴۹۸	E total
۰/۱۱۹۹	۰/۱۲۰۱	۰/۱۲۹	SWS
-۰/۱۶۶۵	-۶/۱۸۹۹۲	-	درصد تغییرات

۲-۳- بررسی تغییرات پیچیدگی بارش، دما و رطوبت و ارتباط آن با تغییرات پیچیدگی تراز آب

مفهوم تغییر اقلیم با نوسان‌های اقلیمی تفاوت اساسی دارد. نوسان‌های اقلیمی دوره‌ای است و انحراف مؤلفه‌های اقلیمی نظیر بارش، رطوبت و دما از میانگین را بیان می‌کند و می‌تواند در دوره‌های زمانی مختلف رخ دهد؛ ولی تغییر اقلیم، نوسان کلی و گسترده در آب و هوای یک منطقه است. برای ارزیابی نوسان‌های اقلیمی از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲، سری‌های زمانی روزانه بارش، رطوبت و دما به سه بازه ۱۴ ساله مورد نظر تقسیم و معیار موجک-آنتروپی در هر سه بازه زمانی محاسبه شد. پس از تقسیم سری‌های زمانی اصلی بارش، رطوبت و دما به سه زیرسری ۱۴ ساله، هر کدام از زیرسری‌ها با تبدیل موجک و موجک مادر db2 در مرتبه ۵ تجزیه شده و به دو دسته زیرسری (که شامل یک زیرسری تقریب و ۵ زیرسری جزئی می‌باشند) تقسیم شدند. ضرایب زیرسری‌های جزئیات در هر ۵ مرتبه به دست آمده و با استفاده از این ضرایب، انرژی موجک در هر ۵ مرتبه برای هر زیرسری ۱۴ ساله بارش، رطوبت و دما محاسبه شدند. نتایج حاصل در جداول (۴) تا (۶) ارائه شده‌اند. با توجه به آمار سازمان هواشناسی تبریز، متوسط بارش سالیانه در بازه زمانی ۱۳۵۰-۱۳۶۴ برابر ۳۰۰/۶ میلی‌متر، در بازه زمانی ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ برابر ۲۵۱/۷۵ میلی‌متر و در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۲ برابر ۲۳۸/۶۸ میلی‌متر می‌باشد. کاهش متوسط بارش مبحثی کاملاً متفاوت با کاهش نوسانات بارش است. برخلاف کاهش در میزان بارش سالیانه در بازه زمانی مورد مطالعه، میزان نوسانات بارش، طبق نتایج حاصل در جدول (۴) تقریباً ثابت بوده و کاهش جزئی داشته است.

جدول ۴- انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS برای زیرسری-

های ۱۴ ساله بارش و درصد تغییرات SWS

P3	P2	P1	زیرسری‌های زمانی ۱۴ ساله
۳۹/۶۶۲۸	۳۹/۸۳۲۲	۳۷/۵۷۸۲	E1
۲۱/۵۳۷۸	۲۰/۳۴۷۶	۲۲/۸۱۸۱	E2
۱۲/۷۲۰۶	۱۲/۰۷۸۴	۱۳/۷۸۳۹	E3
۸/۱۹۹۸	۷/۸۳۶۵	۶/۹۳۵	E4
۲/۷۷۳۸	۴/۴۴۹۸	۳/۸۶۰۴	E5
۸۲/۱۲۱	۸۰/۰۹۴۷	۸۱/۱۱۵۲	E total
۱/۲۶۴۳	۱/۲۸۴	۱/۲۸۸۸	SWS
-۱/۵۳۴۳	-۰/۳۷۲۴	-	درصد تغییرات

پیچیدگی سری زمانی رواناب در بازه زمانی مورد مطالعه کاهش یافته است.

بیشترین مقادیر انرژی موجک در مقیاس زمانی روزانه و مرتبه اول حاصل شده است و مقیاس زمانی روزانه مؤثرترین مقیاس در بررسی پارامتر رواناب می‌باشد.

برخی از عوامل تأثیرگذار در کاهش پیچیدگی رواناب عبارتند از:

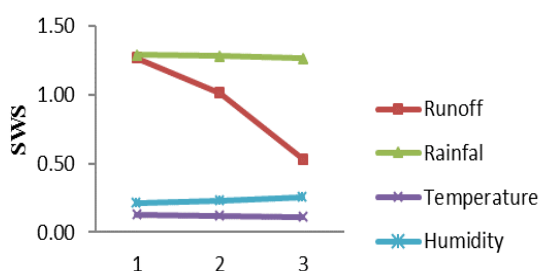
- افزایش جمعیت
- استفاده بی‌رویه و نادرست از آب
- تغییر کاربری زمین
- توسعه کشاورزی و افزایش مصارف مازاد
- تغییر الگوی کشت به سمت کاشت گیاهان پرمصرف

در شکل (۷) تغییرات معیار موجک-آنتروپی در ۳ بازه زمانی مورد مطالعه برای هر کدام از پارامترهای مورد بررسی (بارش، دما، رطوبت و دبی) نشان داده شده است. مطابق با این نمودار کاهش پیچیدگی سری زمانی رواناب نسبت به سری‌های زمانی بارش و دما بیشتر است. بنابر این سهم رواناب در کاهش پیچیدگی سری زمانی تراز آب به مراتب بیشتر است.

جدول ۷- انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS برای

زیرسری‌های ۱۴ ساله رواناب و درصد تغییرات SWS

Q3	Q2	Q1	زیرسری‌های ساله ۱۴
۶/۴۸۵۴	۱۲/۰۱۱۲	۱۸/۶۱۳۵	E1
۴/۴۹۵۵	۹/۲۸۱۸	۱۶/۰۸۷۳	E2
۲/۳۱۹	۷/۸۴۳۳	۱۱/۴۲۳۵	E3
۱/۴۵۲۳	۵/۶۹۷۴	۱۱/۳۸۱۲	E4
۱/۶۹۳	۶/۳۰۷۹	۵/۹۹۹۹	E5
۱۶/۴۴۵۱	۴۱/۱۴۱۶	۶۳/۵۰۵۴	E total
۰/۵۳۴۷	۱/۰۱۲۴	۱/۲۷۰۹	SWS
-۴۷/۱۸	-۲۰/۳۳	-	درصد تغییرات



بازه های زمانی ۱۴ ساله

شکل ۷- تغییرات معیار موجک-آنتروپی در ۳ بازه زمانی مورد مطالعه

بنا به نتایج مندرج در جدول (۵) درصد تغییرات معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی برای سری زمانی دما بسیار ناچیز بوده و در نتیجه الگوی نوسانات دما در طی ۴۲ سال اخیر دارای تغییرات جزئی بوده است.

مطابق با نتایج به دست آمده در مورد پارامتر دما، غالب‌ترین مقیاس زمانی، مرتبه ۳ یا مقیاس زمانی هفتگی می‌باشد.

همچنین با توجه به نتایج مندرج در جدول (۶)، درصد تغییرات معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی برای سری زمانی رطوبت بسیار ناچیز بوده و همچنین سیر صعودی دارد. یعنی تغییرات نوسانات رطوبت و نوسانات تراز آب مطابق با هم نمی‌باشند.

جدول ۶- انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS برای زیرسری-های ۱۴ ساله رطوبت و درصد تغییرات SWS

H3	H2	H1	زیرسری‌های زمانی ۱۴ ساله
۰/۹۵۰۹	۰/۸۴۶۷	۰/۷۵۴۸	E1
۱/۲۲۶۶	۱/۱۶۸۳	۱/۰۵۹۴	E2
۱/۳۶۰۹	۱/۱۲۳۲	۱/۰۱۶۷	E3
۱/۱۹۹۳	۱/۰۷۱۴	۱/۰۱۵۸	E4
۰/۸۶۴۳	۰/۷۰۹۵	۰/۷۱۰۹	E5
۴/۷۳۷۷	۴/۲۰۹۶	۳/۸۴۶۷	E total
۰/۲۵۰۸	۰/۲۲۶۵	۰/۲۱۳۵	SWS
۱۰/۷۲۸	۶/۰۸۹	-	درصد تغییرات

با توجه به جدول (۶)، انرژی موجک در مراتب ۲، ۳ و ۴ تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. بنابر این تغییر مقیاس زمانی در بررسی پارامتر رطوبت تأثیر چندانی نداشته است.

۳-۳- بررسی تغییرات پیچیدگی رواناب در حوضه دریاچه ارومیه

به طور مشابه محاسبات پیچیدگی برای سری زمانی دبی روزانه در بازه زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ صورت گرفته که نتایج حاصل در جدول (۷) درج شده‌اند.

همان طور که در جدول (۷) نشان داده شده است، میزان تغییر نوسانات رواناب در ۳ بازه زمانی مورد بررسی مقدار قابل توجهی است. به عبارت دیگر پیچیدگی سری زمانی رواناب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در حال کاهش است. عوامل مختلف انسانی به طور مستقیم بر میزان دبی تأثیر می‌گذارند، در نتیجه

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، برای بررسی تغییرات پیچیدگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از روش معیار موجک-آنتروپی بر روی داده-های تراز آب، دبی، بارش، رطوبت و دما در ایستگاه منتخب حوضه آبریز دریاچه استفاده شده است. نتایج کلی حاصل از تحقیق را می توان به طور اجمالی به صورت زیر عنوان کرد:

با توجه به تحلیل داده های انجام شده بر اساس داده های ایستگاه ونیار، علاوه بر کاهش تراز آب در دریاچه ارومیه، نوسانات سطح آب نیز در حال کاهش است؛ بنابر این الگوی نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه در حال تغییر می باشد. این تغییر الگو سبب کاهش پیچیدگی سری زمانی تراز آب شده است. پیچیدگی سری زمانی رواناب منطقه در دوره زمانی مورد مطالعه کاهش بیشتری (۵۷/۹۲٪) نسبت به پیچیدگی سری های زمانی بارش (۱/۹٪) و دما (۷/۰۵٪) داشته است. در مرجع [۱۹] تأثیر تغییر اقلیم در این ۶۵٪ و سد سازی ۲۵٪ گزارش شده است. این مرجع تأثیر تغییر اقلیم را بیشتر از بقیه عوامل عنوان کرده است؛ اما با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق مشاهده می شود که دلیل اصلی کاهش پیچیدگی سری زمانی تراز آب دریاچه ارومیه مربوط به کاهش پیچیدگی رواناب می باشد. در نتیجه نقش عوامل انسانی و پدیده های انسان ساخت در کاهش تراز آب و همچنین کاهش پیچیدگی تراز آب و بیمار شدن این حوضه آبریز بسیار مهم تر از تغییرات عوامل طبیعی و اقلیمی بوده است.

برای تکمیل تحقیق حاضر می توان پیشنهادات زیر را برای مطالعات مطرح نمود:

پیشنهاد می شود روش ارائه شده بر روی داده های سالانه و ماهیانه نیز اعمال شود تا نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از داده های روزانه مقایسه شود. برای بررسی سری های زمانی مختلف در مقیاس های زمانی متفاوت می توان از سایر موجک-های مادر برای تحلیل داده ها استفاده کرد [۲۰].

می توان تغییرات پیچیدگی حوضه مورد نظر را با عکس های ماهواره ای حوضه برای مشاهده تغییرات پوشش گیاهی و کاربری اراضی منطقه مورد نظر مقایسه نمود.

همچنین پیشنهاد می شود برای تأیید (یا رد) نتایج حاصل در این تحقیق، روش ارائه شده بر روی داده های بعضی از ایستگاه-های موجود در استان های مجاور دریاچه ارومیه نیز اعمال شود.

۵- مراجع

- [1] Shannon, C. E., "A Mathematical Theory of Communications I and II. Bell", System Technical Journal, 1948, 27, 379-443.
- [2] Pincus, S. M., "Approximate Entropy as a Measure of System Complexity", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 15, 2297-2301.
- [3] Richman, J. S., Moorman, J. R., "Physiological Time-Series Analysis Using Approximate Entropy and Sample Entropy", American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278, 2039-2049.
- [4] Goldberger, A. I., Peng, C. K., Lipsitz, L. A., "Fractal Dynamics in Physiology: Alterations with Disease and Aging", Neurobiology of Aging, 2002, 23, 1-11.
- [5] Burioka, N., Cornelissen, G., Halberg, F. T. Kaplan, D., Suyama H., Sako, T., Shimizu, E., "Approximate Entropy of Human Respiratory Movement during Eye-Closed Walking and Different Sleep Stages", Chest, 2003, 123, 80-86.
- [6] Costa, M., Goldberger, A. L., Peng, C. K., "Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series", Physical Review Letters, 2002, 89 (6), 068102.
- [7] Li, Z., Zhang, Y. K., "Multi-Scale Entropy Analysis of Mississippi River Flow", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2008, 22, 507-512.
- [8] Chou, M., "Complexity Analysis of Rainfall and Runoff Time Series Based on Sample Entropy in Different Temporal Scales", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28, 1401-1408.
- [9] Nourani, V., Zanardo, S., "Wavelet-Based Regularization of the Extracted Topographic Index from High-Resolution Topography for Hydro - Geomorphic Applications", Hydrological Processes, 2013, 28, 1345-1357.
- [10] Nourani, V., Komasi, M., Mano, A., "A Multivariate ANN-Wavelet Approach for Rainfall-Runoff Modelling", Water Resources Management, 2009, 23, 2877-2894.
- [11] Partal, T., Kisi, O., "Wavelet and Neuro-Fuzzy Conjunction Model for Precipitation Forecasting", Journal of Hydrology, 2007, 342, 199-212.
- [12] Rosso, O. A., Martin, M. T., Figliola, A., Keller, K., Plastino, A., "EEG Analysis Using

- Wavelet-Based Information Tools", *Journal of Neuroscience Methods*, 2006, 153, 163-182.
- [13] Addison, P. S., Murraray, K. B., Watson, J. N., "Wavelet Transform Analysis of Open Channel Wake Flows", *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, 127, 58-70.
- [14] Singh, V. P., "Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory", *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16, 421-433.
- [15] Rosso, O. A., Blanco, S., Yordanova, J., Kolev, V., Figliola, A., Schurmann, M., "Wavelet Entropy: A New Tool for the Analysis of Short Duration Brain Electrical Signals", *Journal of Neuroscience Methods*, 2001, 105, 65-75.
- [16] Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S. C., Das, P., "Application of Wavelet Transform Signal Processor to Ultrasound", *Proceedings of Ultrasonic Symposium*, 1994, 2, 1147-1152.
- [17] Nourani, V., Kisi, O., Komasi, M., "Two Hybrid Artificial Intelligence Approaches for Modeling Rainfall-Runoff Process", *Journal of Hydrology*, 2011, 402, 41-59.
- [۱۸] ترابی آزاد، م.، جعفری، ا.، سهرابی، ش.، "بررسی رابطه خطی (رگرسیون) افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم جهانی بر میانگین سالانه دمای سطحی آب در سواحل هرمزگان"، *مجله علوم و فناوری دریا*، ۱۳۸۹، ۵۴، ۶۹-۸۲.
- [19] Hassanzadeh, E., Zarghami, M., Hassanzadeh, Y., "Determining the Main Factors in Declining The Urmia Lake Level By Using System Dynamics Modeling", *Water Resources Management*, 2012, 26, 129-145.
- [20] Nourani, V., Baghanam, A. H., Adamowski, J., Kisi, O., "Applications of Hybrid Wavelet-Artificial Intelligence Models in Hydrology: A Review", *Journal of Hydrology*, 2014, 514, 358-377.

EXTENDED ABSTRACT

Change Detection of Hydrological Processes Using Wavelet-Entropy Complexity Measure Case Study: Urmia Lake

Vahid Nourani *, Sevil Ranjbar , Faranak Tootoonchi

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 19 November 2014; **Accepted:** 02 June 2015

Keywords:

Hydrological processes, Complexity measure, Wavelet-entropy, Urmia Lake watershed

1. Introduction

Since hydrological processes are affected by occurred changes in the watershed, it is important to detect these changes which gradually result in land cover/use conversions. These conversions are resulted from human industrial activities and/or urbanization which ultimately lead to alterations in the natural pattern of the environment. A complexity criterion can be considered as a robust tool to detect and examine relative alterations of a watershed, relying only on the collected numerical data. Complexity variations in the watershed demonstrate the disorderliness of the watershed and thus hydrological changes can be measured by complexity changes.

In the past decades, several methods have been presented to measure the complexity. Shannon entropy is the most commonly and effectively used entropy [1]. The conjunction of entropy and wavelet concepts has been used to develop a new complexity measure of wavelet-entropy [2].

In this study, multiscale wavelet-entropy method is applied to temperature, humidity, rainfall and runoff time series of selected stations in Urmia Lake to detect the relationship between the hydrological changes of system and the complexity of the aforementioned time series. Thereafter, the results are compared to verify the developed wavelet-entropy complexity measure as a representative of hydrological changes in order to find the most dominant reason in water level decrease.

2. Methodology

As a complexity criterion, in this paper wavelet-entropy is used to measure complexity, which as a multiscale analysis is able to handle different time scales at different resolutions in time series with different spatiotemporal characteristics.

2.1. Wavelet-entropy

For computing wavelet-entropy, time series are decomposed in same level using wavelet transform, then Shannon wavelet-entropy and related energies in each level are obtained. Finally the multiscale entropy is measured. The energy at each resolution level $m = 1, 2, 3, \dots, M$, will be the energy of the detail signal [2]:

$$E_m = \|r_m\|^2 = \sum_n |C_m(n)|^2 \quad (1)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: nourani@tabrizu.ac.ir (Vahid Nourani), sevilranjbar@yahoo.com (Sevil Ranjbar), faranak.tootoonchi@gmail.com (Faranak Tootoonchi).

And the total energy will be [2]

$$E_{tot} = \|x\|^2 = \sum_{m<0} \sum_n |C_m(n)|^2 = \sum_m E_m \quad (2)$$

Wavelet energy can be normalized as below which represent the relative wavelet energy [2]:

$$\rho_m = E_m / E_{tot} \quad (3)$$

Shannon entropy has been considered as a criterion of the degree of uncertainty, tranquility and redundancy. In static signals, it is possible to use the entropy concept for measuring relative complexity. If the entropy of time series are high and they contain more random values and have more irregularity, they have higher complexity. Shannon entropy has been used to define SWS or the *Shannon wavelet-entropy* [3].

$$SWS = -\sum_m \rho_m \cdot \ln[\rho_m]$$

(4)

where ρ_m is defined in Eq. (3). Thus the SWS is a measure of the degree of order/disorder the signal, giving adequate information about the underlying dynamical process associated with the signal [4].

2.2. Case Study

Two stations in Urmia watershed are selected for further analysis in order to gain hydrological time series. Table 1. represents these stations and their geographical details.

Table 1. Geographical details of used stations

Station name	Code	Longitude	Latitude	Altitude
Vanyar	31015	46-26	38-07	1460
Tabriz	31041	46-22	38-04	1490

3. Results and discussion

In recent years, water level in Urmia Lake faces unprecedented decrease. It is possible to study occurred changes in hydrological time series using wavelet entropy measure and to examine urbanization and environmental factors and their interactions in complexity decrease.

Since 1995, water level in Urmia Lake is experiencing significant decrease. In August 2009 water elevation was 1271.4m which is 2.7m less than ecological water level of the lake, 6.9m less than maximum water level and 4.3m less than the average in 40 year. Wavelet entropy measure in second time period (1985 to 1999), faces significant decrease which represents complexity decrease in water level of Urmia Lake.

For climate fluctuations in 42 years, humidity, precipitation and temperature time series are divided in three sub-series and wavelet entropy measure is computed for each period. Sub series are consisted of 14 years of daily data, each decomposed in level 5, using db2 mother wavelet.

It could be deduced that rainfall wavelet entropy measure is not facing significant changes thus can not be the dominant reason of water level decrease in Urmia Lake (72%). Despite significant changes in temperature in the studied area, vibration in temperature time series is not considerable therefore cannot be considered a primary index for water level decrease. Similarly, wavelet entropy measure fluctuations for humidity does not change in divided sub-series significantly and can not be considered as the dominant reason of water elevation decrease; But runoff vibration rate in 3 sub series shows significant wavelet entropy measure changes. In other words, discharge complexity is decreasing. Different human activities such as dam constructions and irrigation result into discharge flow reduction, therefore complexity changes are decreased along time.

In Fig. 1, wavelet entropy measure changes in 3 sub series is shown for each studied parameter. It can be deduced that runoff complexity change is more significant than other factors, thus has more effect on complexity decrease in water level time series.

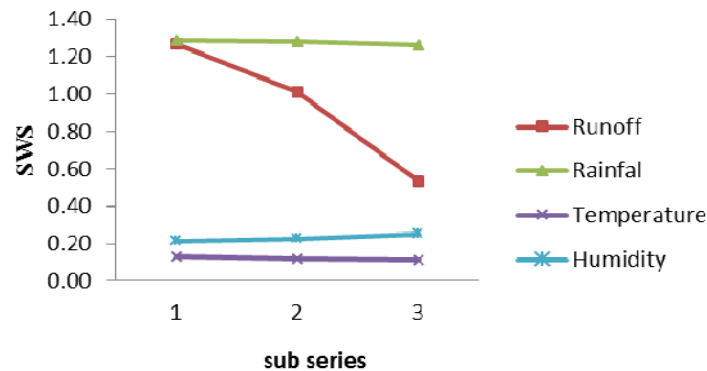


Fig. 1. wavelet entropy changes in 3 sub series

4. Conclusions

In this study it is concluded that:

4-1- In addition to the water level decrease in Urmia Lake, water level fluctuations are decreasing too. Decrease in fluctuations shows that fluctuation pattern in Urmia Lake is changing and results in changes in complexity fluctuation patterns of water level.

4-2- Complexity changes in runoff time series of the studied area is more significant (57%) compared to the complexity of the time series of rainfall (1.9%) and temperature (7.05%). Therefore, it can be deduced that water level complexity decrease is more related to complexity reduction in runoff. The principal reason for water level decrease and complexity decrease seems to be human activity and urbanization compared to climate change.

5. References

- [1] Shannon, C. E., "A Mathematical Theory of Communications I and II. Bell", System Technical Journal, 1948, 27, 379-443.
- [2] Rosso, O. A., Martin, M. T., Figliola, A., Keller, K., Plastino, A., "EEG Analysis Using Wavelet-Based Information Tools", Journal of Neuroscience Methods, 2006, 153, 163-182.
- [3] Rosso, O. A., Blanco, S., Yordanova, J., Kolev, V., Figliola, A., Schurmann, M., "Wavelet Entropy: a New Tool for the Analysis of Short Duration Brain Electrical Signals", Journal of Neuroscience Methods, 2001, 105, 65-75.
- [4] Rosso, O. A., Mairal, M. L., "Characterization of Time Dynamical Evolution of Electroencephalographic Records", Physica A, 2002, 312, 469-504.