

هیدروژنومورفولوژی، شماره ۹، زمستان ۱۳۹۵، صص ۸۶-۶۳

وصول مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۸/۱۰

شناسایی عوامل مؤثر بر کاهش تراز آب زیرزمینی با بهره‌گیری از معیار موجک-آنتروپی (مطالعه‌ی موردی: آبخوان دشت سیلاخور)

مهدی کماسی^{۱*}

سروش شرقی^۲

وحید نورانی^۳

چکیده

تحلیل سری زمانی فرایندهای هیدرولوژیکی نقش بسزایی را در شناخت دقیق رفتار این فرایندها ایفا می‌کند. معیار موجک-آنتروپی شاخصی نوین جهت بررسی نوسانات سری‌های زمانی می‌باشد. در این مقاله با بهره‌گیری از معیار موجک-آنتروپی ترتیب عوامل مؤثر در کاهش تراز آب زیرزمینی در دشت سیلاخور مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی کاهش معیار موجک-آنتروپی یا کاهش پیچیدگی سری زمانی یک پدیده، بیانگر کاهش میزان نوسانات طبیعی سری زمانی و در نتیجه نشان‌دهنده‌ی رخداد یک روند نامطلوب در سری زمانی است. در این راستا جهت شناسایی عامل مؤثر در افت سطح آبخوان ابتدا سری‌های زمانی ماهانه‌ی بارش، دما و دبی رودخانه‌های این دشت به بازه‌های زمانی کوچک‌تر تقسیم‌شدند و سپس هرکدام از این سری‌ها تحت تبدیل موجک به چندین زیرسری با مقیاس‌های زمانی مختلف تجزیه شد و نهایتاً پس از محاسبه انرژی موجک نرمال شده برای این زیرسری‌های زمانی، معیار موجک-آنتروپی برای هر یک از این

۱- استادیار گروه مهندسی عمران-دانشگاه آیتاله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران (نویسنده مسئول)

Email: komasi@abru.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد-مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه آیتاله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

بازه‌های زمانی محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تغییرات معیار موجک-آنتروپی گویای این واقعیت است که کاهش ۷۱ درصدی پیچیدگی دبی رودخانه‌های خروجی از این منطقه بیشتر از تغییرات بارش و دما با کاهش پیچیدگی به ترتیب به اندازه‌ی ۱۳ و ۱۰/۵ درصد بر کاهش پیچیدگی تراز آب‌زیرزمینی تأثیر گذاشته است و این موضوع گویای تقدم تأثیر عوامل انسانی بر عامل تغییر اقلیم در کاهش تراز سطح آب‌زیرزمینی در این دشت است.

کلمات کلیدی: تراز متوسط آب زیرزمینی، دشت سیلاخور، تبدیل موجک، معیار موجک-آنتروپی.

مقدمه

رشد و نمود اثرات حاصل از خشکسالی به قیمت از دست رفتن سرمایه‌های زیستی و اکوسیستمی منحصربه‌فرد ایران تمام شده و دسترسی به منابع آب شیرین که حساس‌ترین آن آب‌های زیرزمینی است به‌سرعت در حال کاهش است (آبوداویلی^۱ و همکاران، ۲۰۰۸؛ حسین‌پور و همکاران، ۲۰۱۰). در بسیاری از مناطق کشور، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی نه تنها بهره‌برداری از این آب‌ها را محدود ساخته بلکه منجر به وقوع پدیده‌ی فرونشست زمین و خسارات جانی و مالی سنگینی شده است. پژوهش‌های متعددی در راستای شناسایی علل افت سطح آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است. به عنوان نمونه اکبری و همکاران (۱۳۸۸) افت سطح آب‌های زیرزمینی را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در آبخوان دشت مشهد بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها گویای این موضوع بود که مهم‌ترین عوامل افت آب زیرزمینی در دشت مشهد پدیده خشکسالی، برداشت بی‌رویه، ازدیاد

1- Abuduwaili

جمعیت، افزایش سطح زیر کشت و تعداد زیاد چاه‌های برداشت می‌باشد. فرامرزی و همکاران (۱۳۹۳) اثر تغییرات کاربری اراضی روی افت تراز آب زیرزمینی را در منطقه دشت دهلران استان ایلام مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که همبستگی مثبتی بین افزایش اراضی دیمی، اراضی آبی، جنگل دست کاشت با افت سطح ایستابی وجود دارد. به طور کلی بحث‌هایی که در ارتباط با بحران خشکسالی و کم‌آبی در ایران صورت گرفته در تضاد با یکدیگر بوده و هنوز به یک جامعیت و هدفی روشن دست پیدا نکرده است. برخی معتقدند که بحران کم‌آبی، ناشی از تغییر اقلیم گسترده در ایران است (وحیدی، ۱۳۹۰؛ ربانی و علیخانی، ۱۳۸۹) و برخی دیگر آن را نتیجه‌ی بهره‌گیری بی‌رویه انسان از منابع آبی و عدم مدیریت درست منابع آب می‌دانند (نورانی و همکاران، ۱۳۹۴، فسخودی و میرزایی، ۱۳۹۲). در سال‌های اخیر در آبخوار تراز آب زیرزمینی کاهش قابل ملاحظه‌ای را داشته است. همچنین الگوی نوسانی تراز آب زیرزمینی در این منطقه دچار تغییر شده و نوسانات آن کاهش یافته است. این کاهش نوسانات تراز آب زیرزمینی را می‌توان به نوعی بیمار شدن آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد نظر دانست. در این میان نکته‌ی اساسی شناسایی عامل بروز این تغییرات در تراز آب زیرزمینی می‌باشد. برای نشان دادن تأثیر تغییرات اقلیمی از متغیرهای دما و بارش منطقه استفاده شده است. همچنین جهت رصد نمودن تأثیرات انسانی نظیر حفر چاه‌های غیرمجاز، توسعه‌ی بی‌رویه‌ی کشاورزی و ایجاد کارخانه‌های صنعتی می‌توان از متغیر دبی آب خروجی حوضه بهره‌گیری نمود و جهت رتبه‌بندی عوامل و درصد تأثیر هر یک می‌توان از شاخص‌های مختلفی از جمله معیار نوین موجک- آنتروپی استفاده نمود. برای اولین بار شانون^۱ (۱۹۴۸) مفهوم آنتروپی را به عنوان ابزاری برای سنجش محتوای اطلاعات سیگنال معرفی کرد. پژوهشگران دیگری نیز

1- Shannon

در عرصه‌های مختلف از این ابزار جهت آنالیز سیگنال و سری زمانی استفاده نمودند (چن و لی^۱، ۲۰۱۴؛ و وارانیس و پدیروا^۲، ۲۰۱۵). پنکاس^۳ (۱۹۹۱) مدلی دیگر را از مفهوم آنتروپی که آنتروپی تقریبی^۴ نام دارد جهت تعیین پیچیدگی سری‌های زمانی کوتاه‌مدت طراحی نمود. از سویی ریچمن و مورمن^۵ (۲۰۰۰) با ایجاد تغییری جزئی در ساختار آنتروپی تقریبی، مفهومی اصلاح‌شده را به نام آنتروپی نمونه^۶ معرفی کردند. میشر^۷ و همکاران (۲۰۰۹) به وسیله‌ی مفهوم آنتروپی به بررسی تغییرات مکانی و زمانی سری زمانی بارش در ایالت تگزاس آمریکا پرداختند. آن‌ها به کمک این معیار مشخصه‌های متعددی از جمله تعداد روزهای بارانی را از سری زمانی بارش استخراج نمودند. در پژوهش دیگری مینگ‌چو^۸ (۲۰۱۱) با استفاده از معیار آنتروپی چند مقیاسه، به آنالیز سری زمانی بارش پرداخت. او سری زمانی بارش چهار حوضه را تحت تبدیل موجک قرارداد و از معیار آنتروپی جهت تشخیص درجه‌ی تجزیه‌ی سری‌های زمانی تجزیه‌شده استفاده نمود. از آنجایی که سری زمانی فرایندهای هیدرولوژیکی بسیار پیچیده بوده بنابراین استفاده از تبدیل موجک و تجزیه سری زمانی به چند زیرسری موجب درک بهتر و درست‌تر از رفتار کوتاه و بلندمدت سری زمانی داده‌ها می‌شود (نورانی و همکاران، ۲۰۱۲). با رویداشت به نکات یادشده می‌توان گفت که معیار موجک- آنتروپی^۹ یک شاخص جدید و کارا در محاسبه‌ی پیچیدگی سری زمانی بخصوص سری زمانی داده‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. در این تحقیق از معیار موجک- آنتروپی جهت محاسبه‌ی

1- Chen & Li

2- Varanis & Pederiva

3- Pincus

4- Approximate entropy

5- Richman & Moorman

6- Sample entropy

7- Mishra

8- Ming Chou

9- Wavelet-Entropy (WE)

میزان تأثیر تغییرات دما، بارش و دبی بر کاهش تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت سیلاخور استفاده شده است.

ویژگی‌های محدوده‌ی مورد مطالعه

دشت سیلاخور با وسعتی به اندازه‌ی ۸۱۹ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین زمین هموار استان لرستان در غرب ایران است (شکل ۳). این دشت وسیع که شامل مساحت شهرستان‌های بروجرد و دورود نیز می‌باشد از قطب‌های مهم کشاورزی و باغداری منطقه هم به شمار می‌رود. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۳۷ متر، مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده‌ی ۳۸۴۵ متر از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده می‌باشد.

مواد و روش

معیار آنتروپی

جهت محاسبه‌ی معیار آنتروپی ابتدا می‌بایست انرژی موجک یا به عبارت دیگر انرژی سیگنال را که با نماد E_m نشان داده می‌شود از رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود:

$$E_m = |W_m(t)|^2 \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

$W_m(t)$ زیرسری زمانی جزئی^۱ از مراتب $M=1, 2, 3, \dots, m$ است. 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 رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود (سینک^۲، ۲۰۱۱):

$$H(X) = H(P) = -\sum_{i=1}^N p(x_i) \log[p(x_i)] \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

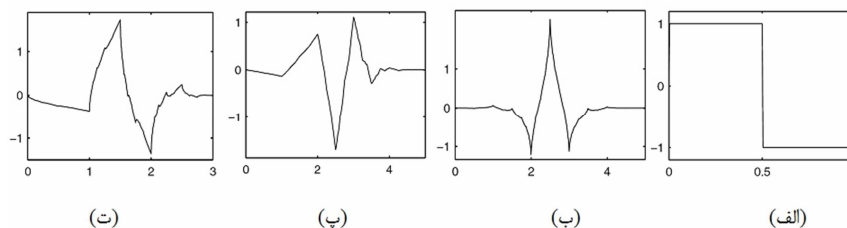
1- Detailed

2- Singh

که در این رابطه $H(X)$ آنتروپی X است که تابع آنتروپی شانون نیز نامیده می‌شود. P توزیع احتمال است و به صورت $P=\{p_i, i=1,2,3,\dots,N\}$ تعریف می‌شود. احتمال وقوع یک پدیده، عدم قطعیت آن و میزان آنتروپی یا اطلاعات باهم مرتبط هستند. اگر احتمال وقوع پدیده‌ای زیاد باشد، میزان آنتروپی آن کم است و بالعکس. به عبارت دیگر، برای تبیین پدیده‌های با احتمال وقوع کم و عدم قطعیت زیاد، اطلاعات آنتروپی زیادی لازم است.

معیار موجک-آنتروپی

تابع تبدیل موجک قابلیت تجزیه سری زمانی به چندین زیر سری زمانی با مقیاس‌های مختلف را دارا است و با مطالعه زیرسری‌های زمانی حاصل از سری زمانی کلی، رفتار کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس یک فرایند هیدرولوژیکی را مورد آنالیز قرار می‌دهد. توابع موجک دارای انواع بسیاری هستند که تابع مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است (مالات^۱، ۱۹۹۸):



شکل (۱) نمودار (الف) تابع موجک Haar؛ (ب) تابع موجک Coif1؛ (پ) تابع موجک Sym3؛ (ت) تابع موجک db2

با ترکیب مفاهیم موجک و آنتروپی، ابزار جدیدی به نام موجک-آنتروپی برای محاسبه‌ی پیچیدگی به دست می‌آید. با بهره‌گیری از این روش می‌توان سری زمانی

را به تعدادی زیرسری تجزیه و انرژی موجک هر کدام از زیرسری‌ها و در نتیجه معیار موجک-آنتروپی را برای هرکدام از آن‌ها محاسبه نمود. معیار آنتروپی در واقع گویای میزان نوسانات سری زمانی است و مقدار این معیار با شدت نوسان سری رابطه‌ی مستقیم دارد. انرژی موجک موجود در هر زیرسری از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود (سینک، ۲۰۱۱).

$$E_m = r_m^2 = \sum_n |C_m|^2 \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در این رابطه m مقیاس تفکیک سیگنال اصلی و C_m ضرایب جزئی موجود می‌باشد و n تعداد ضرایب موجود در مقیاس m است. انرژی کل سیگنال (E_{total}) از رابطه‌ی (۴) به‌دست می‌آید (سینک، ۲۰۱۱):

$$E_{total} = \sum_m \sum_n |C_m(n)|^2 = \sum_m E_m \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

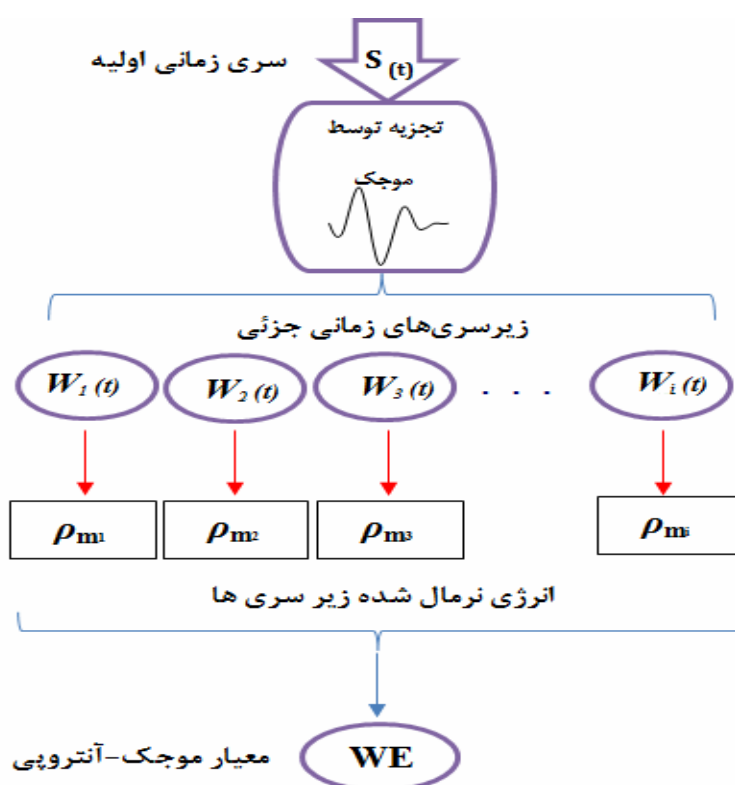
با استفاده از رابطه‌ی (۵)، انرژی موجک نرمال شده هرکدام از زیرسری‌ها محاسبه می‌شود.

$$\rho_m = \frac{E_m}{E_{total}} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

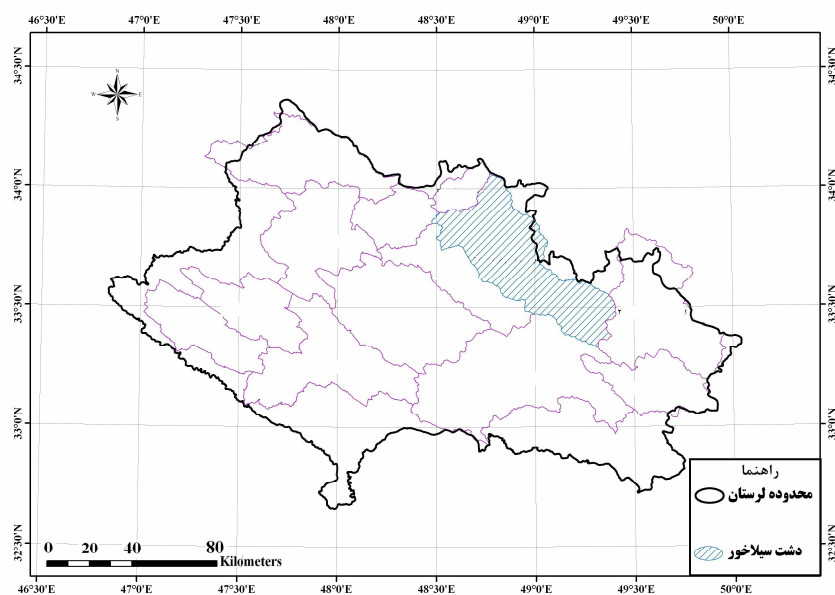
پس از محاسبه‌ی انرژی نرمال شده هر کدام از زیرسری‌ها در نهایت معیار موجک-آنتروپی با استفاده از رابطه‌ی (۶) به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$WE = -\sum_m \rho_m \cdot \ln[\rho_m] \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

شکل (۲) روند محاسبه‌ی معیار موجک-آنتروپی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل ابتدا سری زمانی توسط تبدیل موجک به چند زیرسری زمانی تجزیه و سپس انرژی نرمال هر کدام از زیرسری‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (۶) معیار موجک-آنتروپی از انرژی‌های نرمال شده به دست می‌آید.



شکل (۲) ساختار شماتیک محاسبه‌ی معیار موجک-آنتروپی

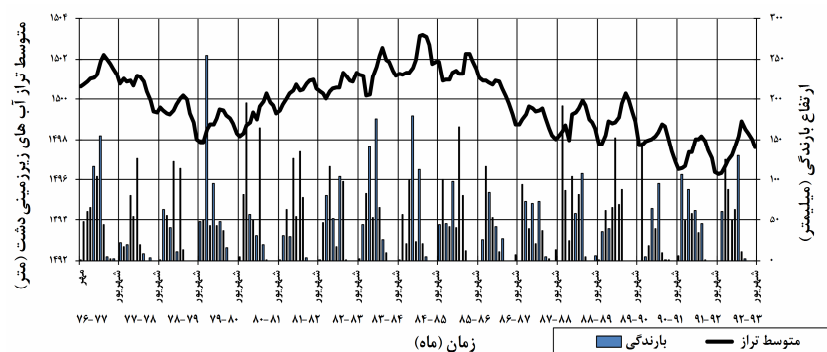


شکل (۳) محدوده‌ی مطالعاتی دشت سیلاخور (دورود-بروجرد)

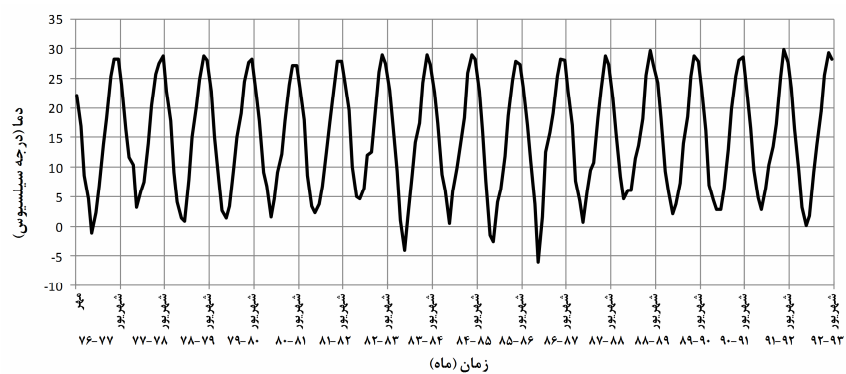
جدول (۱) ویژگی‌های آماری منطقه‌ی موردنظر را نشان می‌دهد. شکل (۴) سری زمانی ماهانه ۲۰۴ ماهه مقایسه بارندگی و تغییرات تراز متوسط آب زیرزمینی دشت سیلاخور از سال آبی (۱۳۷۶-۱۳۷۷) تا (۱۳۹۲-۱۳۹۳) نشان می‌دهد. شکل ۵ و ۶ نیز تغییرات دما و دبی آب خروجی را در بازه‌ی زمانی یاد شده نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آبخوان دشت سیلاخور از نوع آبخوان تحت فشار می‌باشد. در این دشت تعداد ۱۱ منطقه‌ی مختلف موجود است که در هر منطقه سطح پیزومتری آبخوان توسط یک چاه پیزومتری (مجموعاً ۱۱ چاه پیزومتری) اندازه‌گیری شده است (شکل ۷) و نهایتاً میانگین تراز آبخوان در این مناطق، سری زمانی متوسط تراز آب زیرزمینی را در دست داده است.

جدول (۱) ویژگی‌ها آماری سری زمانی دشت سیلاخور

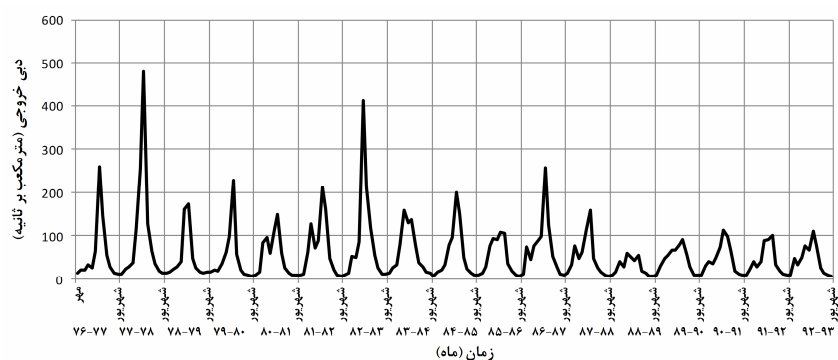
سری زمانی ماهانه (۲۰۴ ماه)	بیشینه	کمینه	میانگین
تراز متوسط آب زیرزمینی (متر)	۱۵۰۳/۲۰۹	۱۴۹۶/۲۹	۱۴۹۹/۷۴
بارش (میلی‌متر)	۲۵۵/۲۵	۰	۴۲/۷۶
دما (درجه سلسیوس)	۲۹/۹	-۶	۱۵/۰۵۳
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	۴۸۲/۱۶	۶/۳۷۵	۵۷/۳۹۵



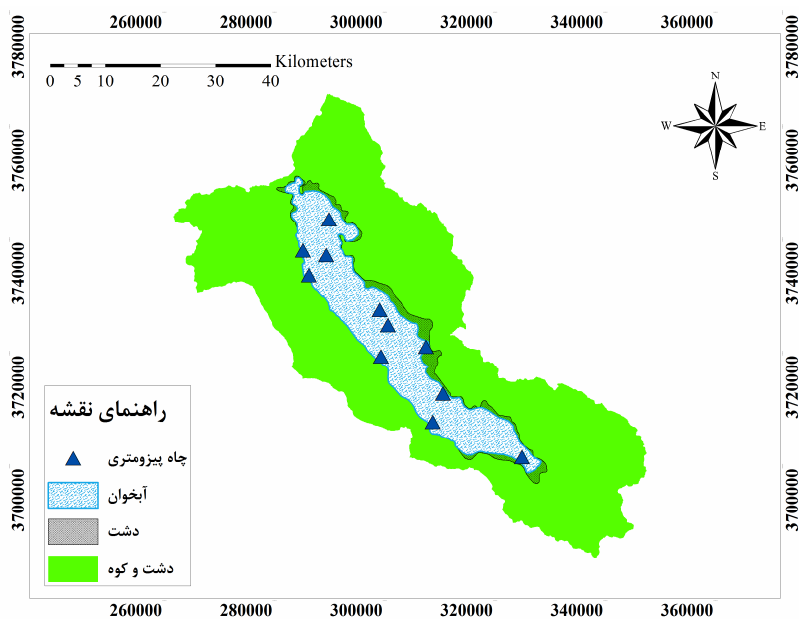
شکل (۴) مقایسه‌ی سری زمانی تغییرات بارش و تراز متوسط آب زیرزمینی در دشت سیلاخور



شکل (۵) سری زمانی تغییرات دما در دشت سیلاخور



شکل (۶) سری زمانی تغییرات دبی آب خروجی از دشت سیلاخور



شکل (۷) نقشه‌ی GIS چاه‌های پیزومتر در دشت سیلاخور

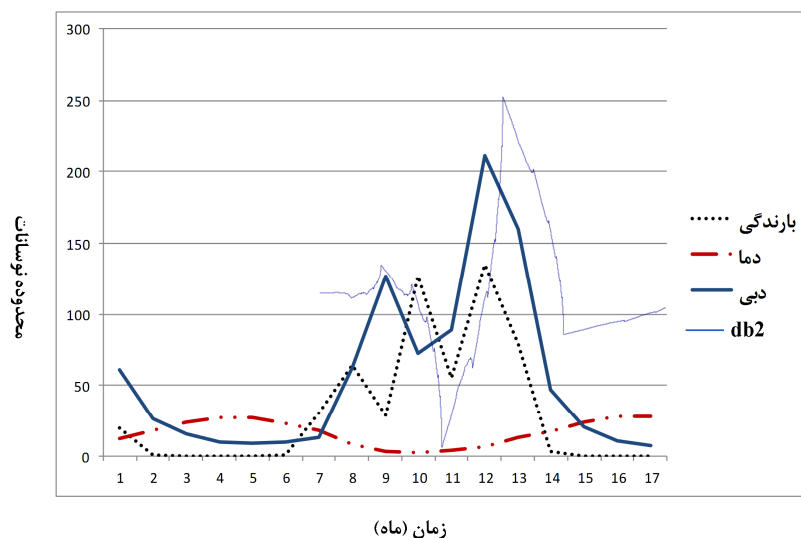
بحث و نتایج

آنالیز سری زمانی تراز متوسط آب زیرزمینی

با رویداشت به شکل (۴) می‌توان دریافت که سری زمانی تراز متوسط آب‌های زیرزمینی دشت سیلاخور در ابتدا (سال ۱۳۷۶) با میزان تراز ۱۵۰۰/۶۴ متر شروع و نهایتاً به تراز ۱۴۹۷/۶۳ متر در پایان بازه‌ی ۲۰۴ ماهه (سال ۱۳۹۳) ختم می‌شود. واضح است که سطح آب زیرزمینی در این منطقه‌ی وسیع، تحت تاثیر عوامل متعدد اقلیمی و انسانی، در حدود ۳ متر کاهش یافته است. اما سری زمانی داده‌های هیدرولوژیکی نایستا بوده و دربردارنده‌ی مشخصه‌های متعددی است. بنابراین قضاوت در ارتباط با تغییرات تراز آب زیرزمینی و وضعیت آن در منطقه‌ی مورد مطالعه صرفاً با بررسی مقادیر ابتدایی، انتهایی و متوسط سری زمانی تراز متوسط آب زیرزمینی نمی‌تواند قضاوتی دقیق و درست باشد. در نتیجه در گام نخست، هدف استفاده از مفاهیم و معیارهایی است که بتوان به دیدگاه صریحی در ارتباط با سری زمانی تراز آب زیرزمینی و سایر سری‌های زمانی هیدرولوژیکی منطقه دست یافت.

در این تحقیق ابتدا از تبدیل و تجزیه سری زمانی به وسیله‌ی تبدیل موجک استفاده می‌شود. در این راستا سری زمانی ۲۰۴ ماهه تراز متوسط آب زیرزمینی به سه بازه زمانی ۶۸ ماهه تقسیم شده و سپس هرکدام از این سری‌های زمانی تحت تبدیل موجک db2 با درجه‌ی تجزیه‌ی ۱ تا ۵ قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که بعد از درجه تجزیه ۵، مقادیر انرژی نرمال به طور ناگهانی به عدد یک بسیار نزدیک شده و عبارت $Ln[\rho m]$ صفر می‌شود و در نتیجه مقادیر انرژی نرمال از درجه تجزیه ۵ به بعد تاثیری بر مقدار معیار موجک آنتروپی نخواهند داشت. در نتیجه در پژوهش حاضر به ارائه نتایج تبدیل موجک با درجه‌ی تجزیه‌ی ۱ تا ۵ بسنده شده است. همچنین دلیل استفاده از این تابع موجک شباهت زیاد شکل تابع موجک

db2 به سری‌های زمانی هیدرولوژیکی از جمله تراز متوسط آب زیرزمینی و همچنین سری زمانی بارش، دما و دبی می‌باشد. به عنوان نمونه در شکل (۸) قسمتی تصادفی از تغییرات سری‌های زمانی بارش، دما و دبی دشت سیلاخور نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نحوه‌ی نوسانات این سری‌های زمانی با شکل تغییرات تابع موجک db2 شباهت نسبی زیادی نسبت به توابع موجک Haar، Coif1 و Sym3 (شکل ۱) دارد.



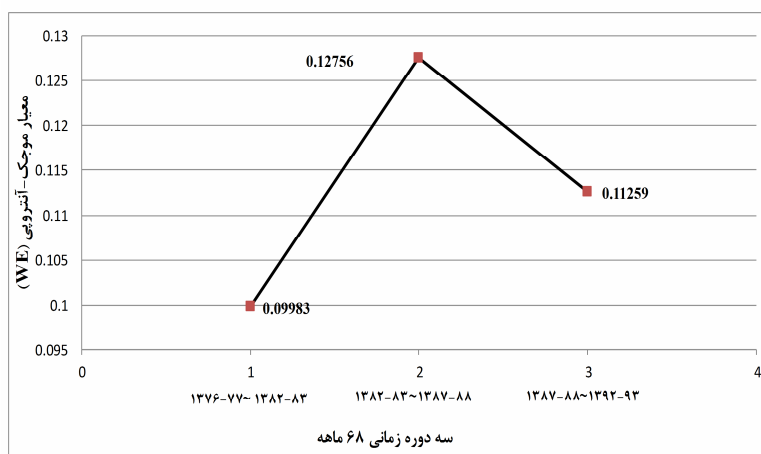
شکل (۸) شباهت تابع موجک db2 به نوسانات سری‌های زمانی بارش، دما و دبی

جهت آنالیز سری زمانی تراز آب زیرزمینی و رصد نمودن تغییرات بی‌نظمی در روند سری زمانی از معیار موجک-آنتروپی استفاده می‌شود. در این راستا انرژی نرمال شده (ρ_n) برای هرکدام از زیرسری‌های به دست آمده از تبدیل موجک محاسبه و نهایتاً معیار موجک-آنتروپی (WE) در هر سه بازه‌ی زمانی محاسبه

می‌شود (جدول ۲). شکل (۹) نمودار تغییرات معیار موجک-آنتروپی در سه دوره‌ی زمانی ۶۸ ماهه است.

جدول (۲) محاسبه معیار موجک-آنتروپی برای سری زمانی تراز متوسط آب زیرزمینی

زیر سری‌های ۶۸ ماهه			انرژی نرمال شده زیرسری‌ها
دوره‌ی سوم	دوره‌ی دوم	دوره‌ی اول	
۰/۰۰۰۲۱۷	۰/۰۰۰۳۱۹	۰/۰۰۰۱۲۵	ρ_1
۰/۰۰۱۱۶۵	۰/۰۰۲۴۴۱	۰/۰۰۰۷۲۲	ρ_2
۰/۰۰۹۳۴۸	۰/۰۰۸۳۳۶	۰/۰۰۳۴۲۸	ρ_3
۰/۰۰۹۴۸۹	۰/۰۱۰۷۶۵	۰/۰۰۳۷۵۱	ρ_4
۰/۹۷۹۷۸	۰/۹۷۸۱۴	۰/۹۹۱۹۷	ρ_5
۰/۱۱۲۵۹	۰/۱۲۷۵۶	۰/۰۹۹۸۳	معیار موجک-آنتروپی (WE)
٪ -۱۱/۷۳	٪ ۲۷/۷۷	***	درصد تغییرات

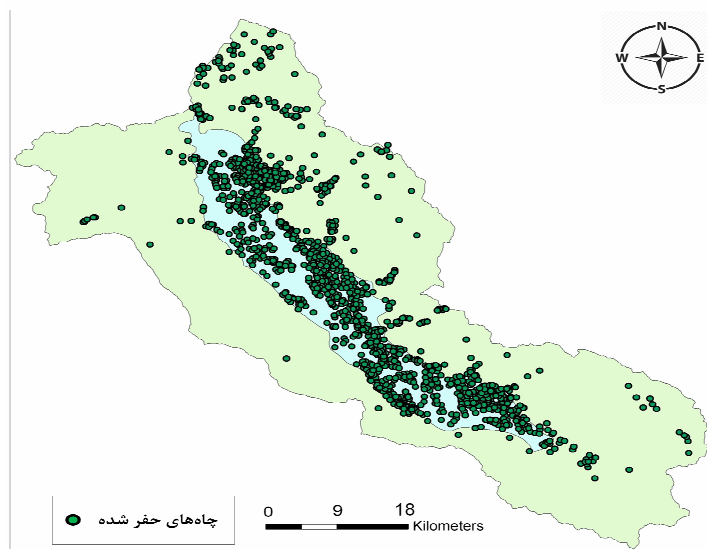


شکل (۹) نمودار تغییرات معیار موجک-آنتروپی برای تراز میانگین آب زیرزمینی در ۳ بازه‌ی مختلف

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، معیار موجک-آنتروپی در بازه‌ی زمانی سوم به میزان ۱۱/۷۳ درصد کاهش یافته است. کاهش معیار موجک-آنتروپی نشانه‌ی مطلوبی نیست. به عبارت دیگر کاهش این معیار گویای کاهش میزان پیچیدگی یا درواقع کاهش نوسانات سری زمانی در بازه‌ی زمانی سوم است. همان‌طور که اشاره شد، کاهش میزان نوسانات سری زمانی هیدرولوژیکی نشان دهنده‌ی بیمار شدن آن مشخصه‌ی هیدرولوژیکی است (نورانی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین تراز آب زیرزمینی دشت سیلاخور در بازه‌ی زمانی سوم دچار بیماری شده و هدف اصلی شناسایی عامل وقوع این بیماری از میان عوامل اقلیمی و انسانی است.

بررسی میزان تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی بر کاهش تراز متوسط آب زیرزمینی

در سال‌های اخیر با گسترش صنعت، برداشت بی‌رویه و غیراصولی از آب‌های جاری، تغییر الگوی کشت و در نتیجه کاشت محصولاتی همانند برنج که متناسب با شرایط آبی منطقه نبوده و آب زیادی مصرف می‌کنند، منجر به ایجاد نیاز آبی وافر در منطقه مورد نظر شده و در نتیجه بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی با حفر چاه‌های متعدد به طور مستقیم و بهره‌برداری از آب‌های سطحی به صورت غیرمستقیم بر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر گذاشته است. شکل (۱۰) تراکم زیاد چاه‌های حفر شده در دشت مطالعاتی را نشان می‌دهد. باتوجه به این نقشه GIS، تعداد ۱۶۷۹ حلقه چاه در منطقه دشت سیلاخور حفر شده است. روشن است که برداشت آب‌های زیرزمینی به وسیله‌ی این تعداد چاه نقشی اساسی و مستقیم در کاهش تراز سطح این آب‌ها داشته است.



شکل (۱۰) محل چاه‌های حفر شده در منطقه‌ی دشت سیلاخور

در این بخش هدف بررسی میزان تأثیر هرکدام از عوامل اقلیمی و انسانی می‌باشد که به صورت غیرمستقیم بر بحرانی شدن وضعیت تراز آب زیرزمینی دشت سیلاخور در سال‌های اخیر تأثیر گذاشته است. افزایش بهره‌گیری انسان از آب‌های سطحی ناشی از موارد یاد شده موجب کاهش دبی آب‌های خروجی از این منطقه شده است. بنابراین دبی آب‌های خروجی از حوضه‌ی بارزترین مصداق عوامل انسانی می‌باشد. از این روی جهت در نظر گرفتن عوامل اقلیمی از سری زمانی بارش و دما و جهت بررسی تأثیر عوامل انسانی از سری زمانی دبی آب خروجی از حوضه استفاده شده است. در این راستا سری زمانی ۲۰۴ ماهه بارش، دما و دبی به سه بازه‌ی زمانی ۶۸ ماهه تقسیم و سپس تحت تابع موجک db2 و درجه‌ی تجزیه‌ی ۱ تا ۵ قرار داده می‌شود. سپس انرژی نرمال شده برای هر زیرسری تجزیه‌شده محاسبه و نهایتاً معیار موجک-آنتروپی برای هر بازه زمانی برای بارش، دما و دبی

به‌دست می‌آید (جداول ۳ تا ۵). تغییرات این معیار مربوط به سه بازه‌ی زمانی مورد نظر برای بارش، دما و دبی در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است.

جدول (۳) محاسبه معیار موجک-آنتروپی برای سری زمانی بارش

زیر سری‌های ۶۸ ماهه			انرژی نرمال‌شده زیرسری‌ها
دوره‌ی سوم	دوره‌ی دوم	دوره‌ی اول	
۰/۰۱۹۷۴	۰/۰۲۴۰۳۱	۰/۰۲۳۸۰۳	ρ_1
۰/۰۳۶۹۶۵	۰/۰۴۵۶۷۷	۰/۰۱۳۰۸۹	ρ_2
۰/۰۷۲۸۱۳	۰/۰۹۸۱۶۵	۰/۰۵۶۱۳۱	ρ_3
۰/۰۲۸۴۸۳	۰/۰۲۸۰۸۷	۰/۰۱۵۵۰۶	ρ_4
۰/۸۴۲	۰/۸۰۴۰۴	۰/۸۹۱۴۷	ρ_5
۰/۶۳۶۳	۰/۷۳۴۱۲	۰/۴۷۴۴۱	معیار موجک-آنتروپی (WE)
-۱۳	%۵۵	***	درصد تغییرات

جدول (۴) محاسبه معیار موجک-آنتروپی برای سری زمانی دما

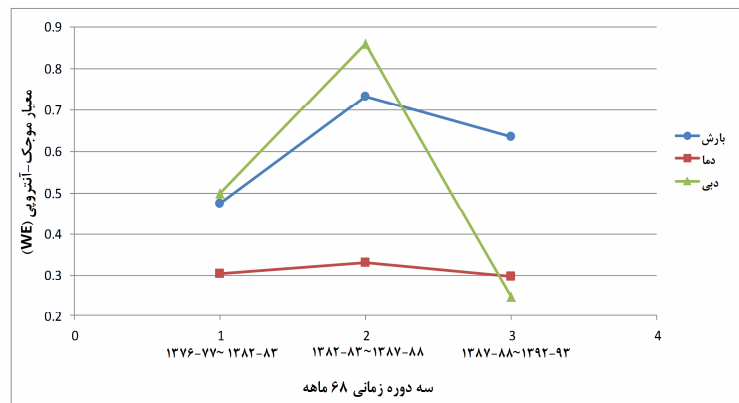
زیر سری‌های ۶۸ ماهه			انرژی نرمال‌شده زیرسری‌ها
دوره‌ی سوم	دوره‌ی دوم	دوره‌ی اول	
۰/۰۰۰۴۱۹	۰/۰۰۰۷۶۲	۰/۰۰۰۴۹۷	ρ_1
۰/۰۰۶۰۰۶	۰/۰۰۶۲۸	۰/۰۰۶۱۳۸	ρ_2
۰/۰۳۸۰۲۲	۰/۰۳۹۵۶۴	۰/۰۵۲۶۹	ρ_3
۰/۰۱۹۳۸۲	۰/۰۲۶۳۳	۰/۰۱۰۲۱۶	ρ_4
۰/۹۳۶۱۷	۰/۹۲۷۰۶	۰/۹۳۰۴۶	ρ_5
۰/۲۹۶۴۸	۰/۳۳۱۰۷	۰/۳۰۴۰۲	معیار موجک-آنتروپی (WE)
%-۱۰/۵	% ۹	***	درصد تغییرات

جدول (۵) محاسبه معیار موجک-آنتروپی برای سری زمانی دبی خروجی حوضه

زیر سری های ۶۸ ماهه			انرژی نرمال شده زیرسری ها
دوره ی سوم	دوره ی دوم	دوره ی اول	
۰/۰۰۲۷۰۵	۰/۰۱۳۵۵۲	۰/۰۱۴۷۰۵	$\rho 1$
۰/۰۱۱۳۸۹	۰/۰۴۲۸۱	۰/۰۲۲۴۰۴	$\rho 2$
۰/۰۱۵۶۵۵	۰/۱۰۶۶۴	۰/۰۴۴۶۴۸	$\rho 3$
۰/۰۱۷۳۵۲	۰/۰۸۷۳۸۱	۰/۰۱۲۵۱۲	$\rho 4$
۰/۹۵۲۹	۰/۷۴۹۶۲	۰/۹۰۵۷۳	$\rho 5$
۰/۲۴۸۳۶	۰/۸۶۰۹	۰/۴۹۹۴۶	معیار موجک-آنتروپی (WE)
٪ -۷۱	٪ ۷۲	***	درصد تغییرات

لازم به ذکر است که برای تجزیه هر کدام از سری های زمانی مانند مرحله ی قبل از تابع موجک db2 استفاده شده زیرا همانطور که اشاره شد شکل نوسانات سری های زمانی داده های هیدرولوژیکی نیز شباهت زیادی به شکل تابع موجک db2 دارد (شکل ۸). در جدول (۳) با توجه به درصد تغییرات میزان معیار موجک-آنتروپی برای سری زمانی بارش، این معیار ابتدا در بازه ی زمانی دوم به اندازه ی ۵۵٪ افزایش داشته و سپس به اندازه ۱۳٪ کاهش می یابد. در نتیجه در بازه ی زمانی سوم ۱۳٪ کاهش نوسانات سری زمانی بارش رخ داده است. اما تا قبل از آنکه میزان کاهش نوسان این سری زمانی نسبت به تغییرات سیگنال سایر سری های زمانی دما و دبی مقایسه نشده است نمی توان در مورد میزان تأثیر بارش بر تراز آب زیرزمینی قضاوتی علمی نمود. با توجه به درصد تغییرات میزان معیار موجک-آنتروپی مربوط به سری زمانی دما در جدول (۴) (۹٪ افزایش و ۱۰/۵٪ کاهش به ترتیب در بازه ی زمانی دوم و سوم) به نظر می رسد تأثیرات سیگنال دما بر تغییرات تراز آب زیرزمینی قابل توجه نمی باشد. در جدول ۵ تغییرات معیار موجک-آنتروپی در سه بازه زمانی برای سری زمانی دبی نشان داده شده است و همان طور که مشخص است

نوسانات این سری زمانی در بازه‌ی زمانی سوم به میزان ۷۱٪ کاهش یافته و این بیشترین کاهش معیار موجک-آنتروپی در مقایسه با سری‌های زمانی بارش و دما است. برای درک بهتر تغییرات این معیار نمودار تغییرات آن برای هر سه سری زمانی در شکل (۱۱) رسم شده است.



شکل (۱۱) نمودار تغییرات معیار موجک-آنتروپی برای بارش، دما و دبی در ۳ بازه‌ی مختلف

طبق نمودار شکل (۱۱)، میزان کاهش معیار موجک-آنتروپی که بیانگر میزان کاهش نوسانات سیگنال است در بازه‌ی زمانی سوم (بین سال‌های ۸۷ تا ۹۳) برای دبی آب‌های خروجی از دشت سیلاخور از سایر سری‌های زمانی بیشتر است. با به وجود آمدن این معضل، روندی نامطلوب در نوسانات تراز آب‌های زیرزمینی که به میزان نفوذ آب‌های جاری در این منطقه نیز وابسته است رخ می‌دهد و پیچیدگی آن در همین بازه کاهش می‌یابد (شکل ۹) و از آنجایی که کاهش پیچیدگی سیگنال دبی در منطقه از سایر سری‌های زمانی بیشتر بوده این نتیجه حاصل می‌شود که سری زمان دبی بیشترین تأثیر را در وقوع نوسانات نامطلوب در تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت سیلاخور داشته است. از سویی همان‌طور که اشاره شد دخالت

انسان در محیط زیست منطقه، عدم مدیریت در استفاده از منابع آب‌های جاری، ایجاد سد و بهره‌برداری غلط و سنتی از این آب‌ها، افزایش جمعیت، تغییر کاربری زمین‌ها و تغییر الگوی کشت منجر به کاهش نوسانات دبی (کاهش پیچیدگی) به میزان قابل‌توجهی در سال‌های اخیر شده است. بنابراین چون تغییرات دبی مهم‌ترین مصداق عامل تأثیرات انسانی در این منطقه است در نتیجه‌ی عامل انسانی بر عامل تغییر اقلیم در بیمار شدن یا به عبارتی وقوع روندی نامطلوب در نوسانات آب زیرزمینی دشت سیلاخور مقدم می‌باشد. ثبات تقریبی متوسط بارندگی منطقه مورد نظر با توجه به شکل (۴) (خط نقطه چین) گواه دیگری بر این مدعاست.

نتیجه‌گیری

شناخت عوامل و یا مهم‌ترین عاملی که اثرات ناشی از خشکسالی را تشدید می‌کند بسیار مورد اهمیت است. در این پژوهش جهت آنالیز سری زمانی ماهانه، تراز متوسط آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت دورود بروجد (دشت سیلاخور) ابتدا این سری به سه بازه‌ی زمانی تقسیم شد و نهایتاً معیار موجک-آنتروپی برای هر بازه‌ی زمانی سری تراز آب زیرزمینی به دست آمد. نتایج گویای این بود که در بازه‌ی زمانی سوم (بین سال‌های ۸۷-۹۳) معیار موجک-آنتروپی کاهش ۱۱/۷۳ درصدی داشته است. کاهش این معیار بیانگر کاهش میزان نوسانات سری زمانی و نهایتاً نشان‌دهنده‌ی وقوع روندی نامطلوب در تغییرات تراز آب زیرزمینی منطقه‌ی مطالعاتی است. پس از بررسی تغییرات معیار موجک-آنتروپی در همان سه بازه‌ی زمانی برای سری زمانی بارش، دما و دبی به این نتیجه دست پیدا شد که در بازه‌ی زمانی سوم معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی برای سری زمانی دبی به اندازه‌ی ۷۱ درصد کاهش داشته و این موضوع تأثیر به سزای تغییرات دبی نسبت بارش و دما را بر بیمار شدن یا در واقع وقوع روندی نامطلوب در نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت

سیلاخور به اثبات رساند. بنابراین عوامل انسانی تأثیر بیشتری در بیماری و کاهش آب زیرزمینی در منطقه‌ی مورد نظر نسبت به تغییرات اقلیم دارد. امید است مسئولان و ارگان‌های ذیربط بیش از پیش بر مدیریت بهره‌برداری از منابع طبیعی تأکید عملی داشته باشند تا عواقب کاهش تراز آب آبخوان روند افزایشی خود را متوقف سازد و از رخداد پدیده‌های مخربی همچون فرونشست زمین در آینده جلوگیری گردد.

منابع

- اکبری، مرتضی؛ جرگه، محمدرضا و حمید مدنی سادات (۱۳۸۸)، بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه‌ی موردی: آبخوان دشت مشهد)، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، شماره ۴، صص ۶۳-۷۸.
- فسخودی، عباس، میرزایی، مهرانوش (۱۳۹۲)، پیامدهای بحران کم‌آبی و خشک شدن زاینده‌رود در مناطق روستایی (مطالعه‌ی موردی: جلگه براآن در شرق اصفهان)، مجله‌ی توسعه محلی، شماره ۲، صص ۱۵۷-۱۸۰.
- فرامرزی، مرزبان؛ یعقوبی، ثریا و کامران کریمی (۱۳۹۳)، اثر تغییرات کاربری اراضی روی افت تراز آب زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی: دشت دهلران، استان ایلام)، فصلنامه‌ی مدیریت آب در مناطق خشک، شماره ۲، صص ۵۵-۶۴.
- نورانی، وحید؛ رنجبر، سویل و فرانک توتونچیان (۱۳۹۴)، بررسی تغییرات فرآیندهای هیدرولوژیکی با استفاده از معیاره‌ی موجک-آنتروپی (مطالعه‌ی موردی: دریاچه‌ی ارومیه)، نشریه‌ی مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۵، شماره ۸۰، صص ۷۵-۸۶.
- وحیدی، علیرضا (۱۳۹۰)، تأثیر تغییر اقلیم و خشکسالی بر منابع آب ایران، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.
- Abuduwaili, J., Gabchenko, M.V. & Xu, J., (2008), **Eolian Transport of Salts: A Case Study in the Area of Lake Ebinur (Xinjiang, Northwest China)**, Journal of Arid Environments, No.10, PP. 1843-1852.
- Chen, J., & Li, G., (2014), **Tsallis Wavelet Entropy and Its Application in Power Signal Analysis**, Entropy, Vol. 16, No. 6, PP. 3009-3025.

- Hoseinpour, M., Fakheri Fard, A. & Naghili, R., (2010), **Death of Urmia Lake, a Silent Disaster Investigating of Causes, Results and Solutions of Urmia Lake Drying**, The 1 st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University- Mashad Branch, Iran, PP. 26-28.
- Mallat, S.G., (1998), **A Wavelet Tour of Signal Processing**, Second ed. Academic Press, San Diego.
- Ming Chou, C., (2011), **Wavelet-Based Multi-Scale Entropy Analysis of Complex Rainfall Time Series**, *Entropy*, No. 1, PP. 241-253.
- Mishra, A.K., Özger, M., & Singh, V.P., (2009), **An Entropy-Based Investigation Into the Variability of Precipitation**, *Journal of Hydrology*, No. 1-4, PP. 139-154.
- Nourani, V., Komasi, M., & Taghi Alami, M., (2012), **Hybrid Wavelet-Genetic Programming Approach to Optimize Artificial Neural Network Modeling of Rainfall-Runoff Process**, *Journal of Hydrologic Engineering*, No. 6, PP. 724-741.
- Nourani, V., Sharghi, E. & Ranjbar, S., (2015), **Change Detection of Hydrological Processes Using Wavelet-Entropy Complexity Measure (Case Study: Urmia Lake Watershed)**, *Symposium on Regional Floods: Regional Effects of Changes in the River System*, Vienna, Austria.
- Pincus, S.M., (1991), **Approximate Entropy as a Measure of System Complexity**, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, No. 6, PP. 2297-2301.
- Rajaei, T., Mirbagheri, S.A., Nourani, V., & Alikhani, A., (2010), **Prediction of Daily Suspended Sediment Load Using Wavelet and Neuro-Fuzzy Combined Model**, *Journal of Environmental Science and Technology*, No. 1, PP. 93-110.
- Richman, J.S., & Moorman, J.R., (2000), **Physiological Time-Series Analysis Using Approximate Entropy and Sample Entropy**, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, No. 6, PP. 2039-2049.

- Shannon, C.E., (1948), **A Mathematical Theory of Communications I and II. Bell**, System Technical Journal, No. 3, PP. 379-443.
- Singh, V.P., (2011), **Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory**, Journal of Hydrologic Engineering, No. 5, PP. 421-433.
- Varanis, M., & Pederiva, R., (2015), **Wavelet Packet Energy-Entropy Feature Extraction and Principal Component Analysis for Signal Classification**, Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, No. 1, PP. 1-7.