



بررسی علل کاهش سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان ارومیه)

سوسن افزلی^۱، محمودرضا ملایی‌نیا^۲، مهدی کماسی^۳، محمد سالخورده حقیقی^۴.

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶

مقاله پژوهشی

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش تقاضای آب، توسعه صنعتی، کشاورزی و عدم مدیریت صحیح باعث وارد شدن تنش به منابع آب به ویژه منابع آب زیرزمینی شده است. یکی از آبخوان‌هایی که در سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی روبه‌رو بوده است، آبخوان ارومیه می‌باشد. در این تحقیق با بررسی بارندگی، تبخیر، دما، جریان رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری و تخلیه چاه‌های بهره‌برداری، سعی شد سهم هر یک از این عوامل در میزان کاهش سطح آب‌های زیرزمینی آبخوان ارومیه تعیین شود. جهت بررسی تغییرات از ترکیب تبدیل موجک با روش آنتروپی بهره‌گرفته شد. در این مطالعه، از سری‌های زمانی ماهانه برای دوره آماری ۱۶ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۶) استفاده شد. سپس سری زمانی اصلی به سه دسته مساوی تقسیم و تغییرات پیچیدگی بر مبنای معیار پیچیدگی موجک-آنتروپی در این بازه‌های زمانی محاسبه شد. نتایج نشان داد که معیار موجک-آنتروپی (SWS) در تمام چاه‌های مشاهده‌ای منتخب در تمام بازه‌های زمانی کاهش داشته که نشان‌دهنده کاهش میزان پیچیدگی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان ارومیه و در نتیجه تنش‌های وارد بر آبخوان می‌باشد. براساس نتایج این تحقیق، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و دما به ترتیب دو عامل اصلی مؤثر بر افت آب‌های زیرزمینی آبخوان ارومیه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ارومیه، پیچیدگی، تراز آب زیرزمینی، موجک-آنتروپی.

^۱ ایمیل نویسنده مسئول: m_mollaienia@yahoo.com

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران، sousanafzali2015@gmail.com @gmail.com

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. m_mollaienia@yahoo.com

۳- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله عظمی بروجردی، بروجرد، ایران. komasi@abru.ac.ir

۴- مربی گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. M.salkhordeh.h@gmail.com

مقدمه

با توسعه‌ی طرح‌های کشاورزی و صنعتی، ازدیاد روزافزون جمعیت، گسترش شهرها و در پی آن بالا رفتن معیارهای کمی و کیفی زندگی، تقاضا برای آب، پیوسته افزایش یافته است. این در حالی است که منابع آب کشور محدود بوده و بسیاری از نقاط کشور، به ویژه مناطق کویری و بیابانی با مشکل کم آبی مواجه هستند. محدودیت تجدیدپذیری منابع آب، وقوع خشکسالی‌ها و عدم مدیریت به هنگام منابع آب سبب افت تراز سطح آب زیرزمینی شده است.

به همین منظور مطالعات زیادی بر روی آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره خواهد شد.

بیضایی و محمدی (۱۳۸۲)، علت اصلی افت سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور را برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی عنوان کردند. اکبری و همکاران (۱۳۸۸)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) را برای بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت مشهد استفاده کردند. آن‌ها مهم‌ترین عوامل کاهش سطح آب زیرزمینی این دشت را پدیده خشکسالی، برداشت بی‌رویه، ازدیاد جمعیت، افزایش سطح زیرکشت و تعداد زیاد چاه‌های برداشت دانستند.

Shahid and Hazarika, (2009) با بررسی اثر خشکسالی بر آب زیرزمینی در شمال غربی بنگلادش اعلام کردند که افزایش برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری در فصل‌های خشک و بازگشت خشکسالی‌ها از عوامل افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه می‌باشند. Lashkaripour and Ghafoori, (2011) اثر کاهش سطح آب بر کیفیت آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت تربت جام، واقع در شمال شرقی ایران را بررسی نمودند. تحقیق آن‌ها نشان داد برداشت بیش از حد مجاز آب با تغذیه کم منابع آب زیرزمینی، سطح آب را کاهش داده و منجر به از بین رفتن کیفیت آب در بیشتر بخش‌های دشت شده است.

زنگنه اسدی و شفیعی (۱۳۹۶)، به بررسی همزمانی خشکسالی و افت آب زیرزمینی دشت نورآباد ممسنی با استفاده از GIS پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیشترین وضعیت خشکسالی مربوط به سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ بوده و نقش عامل انسانی در کاهش میزان افت آب زیرزمینی آشکار است، به طوری که میزان حفر چاه‌ها از سال ۱۳۸۳ نسبت به سال ۱۳۸۸ به مراتب افزایش یافته است.

کماسی و شرقی (۱۳۹۶)، روندیابی و رده‌بندی عوامل مؤثر بر کاهش تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت سیلاخور را با بهره‌گیری از تبدیلات موجک متقابل و ارتباطی انجام دادند. برای این منظور سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی-دبی، تراز آب زیرزمینی-بارش و تراز آب زیرزمینی-دما به صورت زوجی وارد الگوریتم تبدیل موجک متقابل و ارتباطی شده و میزان تأثیر و ارتباط متقابل این سری‌های زمانی سنجیده شد. نتایج به دست آمده بیانگر آن بود که سری زمانی دبی که نماینده تأثیرات انسانی است با میانگین ضریب ارتباط موجکی $0/83$ از سری‌های زمانی بارش و دما که نماینده تغییرات اقلیم هستند با میانگین ضریب ارتباط موجکی به ترتیب $0/52$ و $0/58$ تأثیر بیشتری بر کاهش تراز سطح آبخوان دشت سیلاخور داشت.

دانشور و ثوقی و شاکر (۱۳۹۷) روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل را با روش ترکیبی من-کندال-تبدیل موجک بررسی کردند. نتایج بیانگر روند منفی در منطقه مورد مطالعه بود. در بیشتر سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی، زیر سری جزئی در سطح ۳ در ترکیب با زیرسری تقریبی، به عنوان مؤلفه زمانی تأثیرگذار شناخته شد.

روشنگر و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر بارش بر تغییرات تراز آب زیرزمینی را با استفاده از تبدیل موجک و آزمون من کندال در ایالت تگزاس بررسی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد سطح آب زیرزمینی دارای روند افزایشی بوده است. همچنین با توجه به نتایج نمودار



آن یکی از بحث‌های مهم دانشمندان بوده است. روش‌های ارزیابی مختلفی برای بررسی پیچیدگی سیستم‌ها وجود دارد که از بین آنها نظریه آنتروپی^۳ کاربرد فراوان تری دارد. نظریه آنتروپی (محتوای اطلاعاتی) را شانون^۴ در سال ۱۹۴۸ ارایه کرد و آنتروپی را به عنوان شاخص سنجش اطلاعات، گزینش یا عدم قطعیت معرفی کرد. آنتروپی درجه عدم قطعیت، میزان تصادفی بودن و میزان بی نظمی یک پدیده تصادفی را مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهد.

در زمینه پیچیدگی و تغییرات آن، به برخی از مطالعات صورت گرفته اشاره می‌شود:

Pincus, (1991) آنتروپی تقریبی^۵ را به عنوان معیاری برای پیچیدگی معرفی کرد. آنتروپی تقریبی در آنالیز میزان پیچیدگی سری‌های زمانی کوتاه موثر است. برای محاسبه و بحث در مورد میزان پیچیدگی پدیده مورد نظر می‌توان از روش‌های ترکیبی نیز استفاده کرد. به عنوان مثال می‌توان سری زمانی اصلی را به چند قسمت تقسیم کرده و مقدار آنتروپی را برای هر قسمت محاسبه کرد. سری زمانی جدید شامل آنتروپی‌های بدست آمده برای هر قسمت است، حال آنتروپی سری زمانی جدید قابل محاسبه است.

Mishra et al. (2009) تغییرات مکانی و زمانی سری زمانی بارش ایالت تگزاس آمریکا را با مفهوم آنتروپی بررسی کردند. آنها مشخصه‌های متعددی از جمله تعداد روزهای بارانی را از سری زمانی بارش استخراج نمودند.

Huang et al. (2011) با استفاده از تئوری آنتروپی نمونه، میزان پیچیدگی دبی جریان رودخانه یانگتزه^۶ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در بخش‌های بالایی این رودخانه به دلیل ساخت مخازن و بهره‌برداری از آنها و در نتیجه منظم شدن دبی جریان رودخانه، پیچیدگی جریان به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

های من کندال دنباله‌ای، از سال ۱۹۹۵ به بعد سطح آب زیرزمینی افزایش یافته است.

امروزه استفاده از تئوری موجک به عنوان روشی نوین و کارآمد در زمینه آنالیز سیگنال و سری‌های زمانی مؤثر واقع شده است (Kim and Valdes, 2003). تبدیل موجک به‌طور گسترده توسط هیدرولوژیست‌ها در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در زیر به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

Adamowski and Chan (2011) مدل شبکه عصبی موجکی را برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در ایالت کبک کانادا به کار بردند. آن‌ها نتایج این مدل را با مدل های شبکه عصبی مصنوعی و میانگین متحرک خود بازگشتی یکپارچه^۱ (ARIMA) مقایسه کردند و اعلام نمودند که نتایج بیانگر توانایی بالای مدل شبکه عصبی موجکی در مقایسه با دو مدل دیگر بوده است.

نورانی و همکاران (۱۳۸۷) برای مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه ليقوان چای از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-موجک استفاده کردند. آنها ابراز داشتند که عملکرد مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی-موجک بهتر از مدل شبکه عصبی مصنوعی بوده است.

طوفانی و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده مستقیم از نظریه موجک، میزان بارش ایستگاه زرینگل استان گلستان را پیش‌بینی و با نتایج حاصل از مدل سری زمانی خطی فصلی^۲ مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تجزیه سیگنال با موجک، همبستگی میان داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نسبت به روش‌های سری زمانی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و پیش‌بینی بارش با دقت بیشتری صورت می‌گیرد.

در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی برای محاسبه‌ی مقدار پیچیدگی سیگنال‌های مختلف صورت گرفته و یافتن معیار مناسب برای اندازه‌گیری

^۴-Shannon

^۵-Approximate Entropy

^۶-Yangtze

^۱-Autoregressive integrated moving average

^۲-Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average

^۳-Entropy

و میزان تأثیرگذاری پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژی و دیگر عوامل را مشخص نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخوان ارومیه به مساحت ۷۴۹ کیلومتر مربع در داخل محدوده مطالعاتی ارومیه (کد ۳۰۰۲) در غرب دریاچه ارومیه و بین طول شرقی ۴۶ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه قرار دارد. متوسط بارش این دشت ۳۰۴ میلی‌متر در سال و دارای اقلیم سرد و خشک می‌باشد. منابع آب‌های سطحی دشت ارومیه را چهار رودخانه به نام‌های نازلوچای، شهرچای، روضه چای و باراندوزچای با مجموع تخلیه متوسط سالانه ۸۳۰ میلیون مترمکعب، تشکیل می‌دهند (شکل ۱).

در شکل (۱) موقعیت آبخوان ارومیه، در کشور ایران و استان آذربایجان غربی به همراه موقعیت ایستگاه‌ها و چاه‌های مورد بررسی ارایه شده است.

مشخصات ایستگاه‌های استفاده شده در این پژوهش که شامل ایستگاه‌های هیدرومتری، باران‌سنجی و تبخیرسنجی هستند در جدول (۱) ارایه شده است. براساس اطلاعات موجود و قابل دسترسی، سری زمانی ۱۶ ساله نوسانات سطح آب زیرزمینی، بارش، دما، تبخیر، آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری و برداشت از آبخوان ارومیه در مقیاس ماهانه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ در نظر گرفته شده است. سری زمانی ۱۶ ساله (T) هر یک از پارامترهای ورودی، به سه دسته (T1، T2 و T3) تقسیم شد. دسته T1 تغییرات سری زمانی از ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶، دسته T2 تغییرات سری زمانی از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ و دسته T3 تغییرات سری زمانی از سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ بودند.

Liu et al. (2015) پیچیدگی سیستم آبخوانی در چین را با معیار آنتروپی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تغییرات در بارش و فعالیت‌های مرتبط با تولید محصولات کشاورزی به عنوان مهم‌ترین عوامل در بروز کاهش پیچیدگی آبخوان می‌باشند.

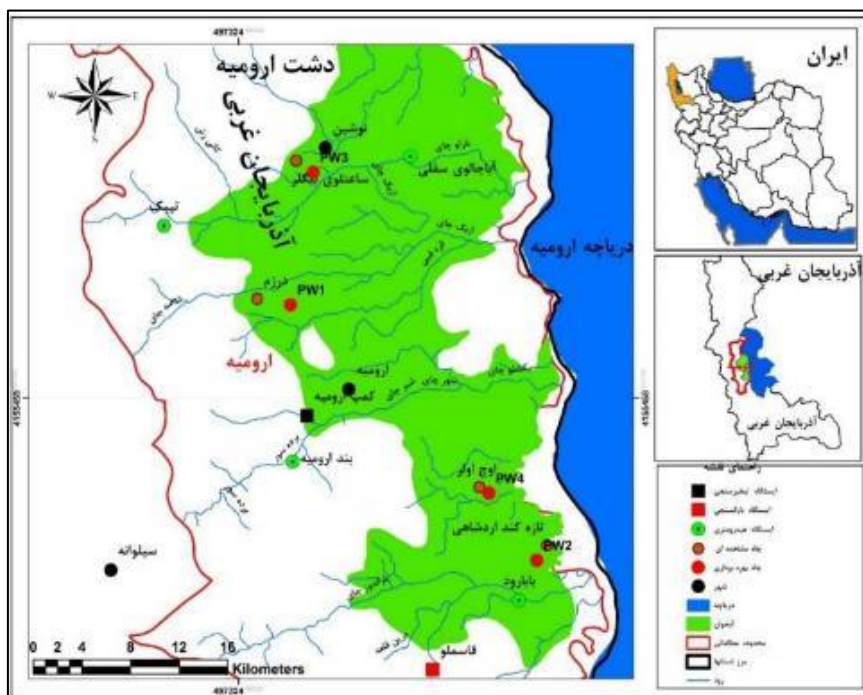
با ترکیب مفاهیم موجک و آنتروپی ابزار جدیدی به نام موجک-آنتروپی برای محاسبه پیچیدگی به دست آمده است. با استفاده از این روش می‌توان تشخیص داد که سیگنال اصلی در چه مقیاس زمانی بررسی شود. در این زمینه می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

Chou, (2014) روش آنتروپی چندمقیاسی را برای بررسی پیچیدگی، بر سری بارش و رواناب اعمال کرد و مشاهده نمود که نتایج در مقیاس‌های زمانی بالاتر با نتایج به دست آمده در مقیاس‌های زمانی پایین متفاوت است.

نورانی و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی تغییرات فرآیندهای هیدرولوژیکی با استفاده از معیار موجک-آنتروپی در دریاچه ارومیه پرداختند. آنها با استفاده از این معیار، کاهش نوسانات سری زمانی دبی آب در حوضه دریاچه ارومیه را مهم‌ترین علت کاهش تراز سطح آب این دریاچه اعلام نمودند.

ایجاد هر گونه تغییر در شرایط طبیعی یک سیستم هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی سالم سبب کاهش میزان پیچیدگی سیستم مورد نظر می‌شود. این تغییر می‌تواند در اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی باشد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، دیده می‌شود که مؤلفه برداشت از آب زیرزمینی کمتر در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است، در این مطالعه ضمن در نظر گرفتن دیگر عوامل تأثیرگذار بر افت آب زیرزمینی از مؤلفه برداشت از آب زیرزمینی نیز استفاده گردید. تا بتوان درک درستی از موضوع افت آب زیرزمینی داشته و دلیل اصلی افت را بررسی نمود. همچنین بتوان نقش



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	کد ایستگاه	سال تأسیس	موقعیت جغرافیایی (متر)		
				طول	عرض	ارتفاع از سطح دریا
آباجالوی سفلی	هیدرومتری	۳۳-۰۳۵	۱۳۴۳	۵۱۱۴۵۷	۴۱۷۴۷۵۷	۱۲۹۰
بابارود	هیدرومتری	۰۷-۳۵	۱۳۲۸	۵۲۰۳۵۷	۴۱۳۹۲۷۲	۱۲۸۵
بند ارومیه	هیدرومتری	۱۱-۳۵	۱۳۲۸	۵۰۱۷۶۸	۴۱۵۰۳۴۲	۱۳۹۰
تپیک	هیدرومتری	۳۱-۳۵	۱۳۶۱	۴۹۱۱۸۱	۴۱۶۹۲۰۷	۱۴۵۰
قاسملو	بارانسنجی	۰۱-۳۵	۱۳۶۱	۵۱۳۲۸۵	۴۱۳۳۷۱۱	۱۳۸۰
کمپ ارومیه	تبخیر سنجی	۱۰۰-۳۵	۱۳۵۸	۵۰۲۹۴۵	۴۱۵۴۰۴۰	۱۳۸۱

جدول (۲): مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه

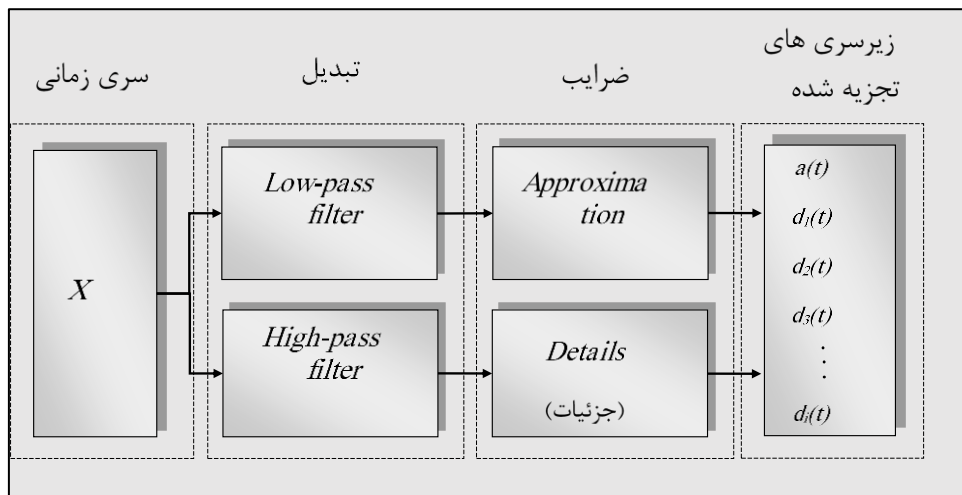
نام چاه	نوع چاه	موقعیت جغرافیایی (متر)	
		طول	عرض
درزم	مشاهده‌ای	۴۹۸۸۶۰	۴۱۶۳۳۷۸
ساعتلوی بیگلر	مشاهده‌ای	۵۰۲۰۵۷	۴۱۷۴۴۱۰
اوج اولر	مشاهده‌ای	۵۱۷۱۱۷	۴۱۴۸۳۲۰
تازه کند اردشاهی	مشاهده‌ای	۵۲۲۶۸۸	۴۱۴۳۶۵۵
PW1	بهره‌برداری	۵۰۱۵۹۱	۴۱۶۲۹۰۴
PW2	بهره‌برداری	۵۲۱۸۴۶	۴۱۴۲۴۶۵
PW3	بهره‌برداری	۵۰۳۴۴۹	۴۱۷۳۴۸۵
PW4	بهره‌برداری	۵۱۷۹۱۰	۴۱۴۷۸۳۱

تبدیل موجک

تبدیل موجک یکی از تبدیل‌های ریاضی کارآمد در زمینه پردازش سیگنال است. تبدیل موجک تبدیلی است که سیگنال را به یک مجموعه از توابع اساسی سیگنال تجزیه می‌کند و در حقیقت یک مجموعه تابع اساسی از تأخیر و تغییر در مقیاس موجک مادر بدست می‌آید (شفاعی و همکاران، ۱۳۹۲).

زمانی که از تابع موجک استفاده می‌شود زیرسری زمانی به تعدادی زیرسیگنال تقسیم می‌شود. این

زیرسیگنال‌ها به دو صورت می‌باشد: زیرسیگنال تقریب a که بیانگر اطلاعات کلی و زیرسیگنال‌های جزئیات d_1, d_2, \dots, d_n که خواص با دامنه کوتاه مدت سری زمانی را بیان می‌کنند (شکل (۲)). تعداد زیرسیگنال‌های جزئیات برابر با درجه تجزیه می‌باشد به عبارت دیگر در صورتی که درجه تجزیه برابر i باشد تعداد زیر سیگنال‌های جزئیات برابر i می‌باشد. به عبارت دیگر تعداد کل زیرسیگنال‌ها (تقریب و جزئیات) برابر $i+1$ می‌باشد.



شکل (۲): نمودار تبدیل موجک برای یک سری زمانی

داده‌های سطح آب زیرزمینی و برداشت از چاه‌های بهره‌برداری با موجک نوع db4 که نتایج بهتری نسبت به سایر موجک‌ها از قبیل Haar, db2, و db3 ارائه داده به‌عنوان تابع موجک مادر استفاده می‌شود. همچنین از تابع موجک db2 برای تجزیه سری‌های زمانی تراز سطح دریاچه، بارش، تبخیر، دما و رواناب استفاده می‌گردد.

با تعیین مناسب‌ترین تابع موجک مادر، مشخص کردن میزان سطح تجزیه سری زمانی بسیار مهم است که می‌بایست بازه زمانی استفاده شده و بازه نوسانات عوامل مؤثر بر سری زمانی در تعیین آن مدنظر قرار گیرد. از روش‌های تعیین سطح تجزیه علاوه بر روش سعی و خطا استفاده از رابطه (۱) است.

$$l = \text{INT}[\log(a)] \quad (1)$$

خاطر نشان می‌گردد که انتخاب مناسب‌ترین تابع موجک مادر اغلب با توجه به ماهیت داده‌های اولیه و تشابه رفتاری آن‌ها با یک تابع موجک به‌خصوص صورت می‌گیرد. بدین معنی که تشابه فرم تابع موجک مادر با شکل سری‌های زمانی، مهم‌ترین راهنما جهت انتخاب مناسب‌ترین تابع موجک مادر است (Nourani et al., 2011; Abbate et al., 1994). در این راستا Nourani et al. (2011) طی یک کار پژوهشی نشان دادند که بهترین تابع موجک مادر به منظور حل مسئله طی فرایند سعی و خطا و پس از امتحان چندین تابع موجک مادر و مقایسه نتایج به دست آمده، شناسایی می‌شود. اما براساس سایر تحقیقات صورت گرفته (Nourani et al., 2011; Raghavendra and Deka., 2015; Yu et al., 2018)



هیدرولوژی، می‌توان آن‌تروپی شانون را به عنوان معمول‌ترین آن‌تروپی بیان کرد (Singh, 2011).
برای مطالعه بیشتر در این بخش به منبع (Shannon, 1948) مراجعه شود.

موجک-آن‌تروپی

با ترکیب مفاهیم موجک و آن‌تروپی، ابزار جدیدی به نام موجک-آن‌تروپی برای محاسبه پیچیدگی بدست 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 هر کدام از آن‌ها محاسبه نمود. معیار آن‌تروپی در واقع گویای میزان نوسانات سری زمانی است و مقدار این معیار با شدت نوسان سری رابطه مستقیم دارد. انرژی موجود در هر زیرسری از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Singh, 2011).

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

در رابطه (۲)، m : مقیاس تفکیک سیگنال اصلی، C_m : ضرایب جزئی موجود و n : تعداد ضرایب موجود در مقیاس m است. انرژی کل سیگنال (E_{total}) از رابطه (۳) بدست می‌آید (Singh, 2011):

$$E_{total} = \sum_m \sum_n |C_m(n)|^2 = \sum_m E_m \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (۴)، انرژی نرمال شده هر کدام از زیرسری‌ها محاسبه می‌شود.

$$\rho_m = \frac{E_m}{E_{total}} \quad (4)$$

پس از محاسبه انرژی نرمال شده هر کدام از زیرسری‌ها در نهایت معیار موجک-آن‌تروپی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$WE = SWS = - \sum_m \rho_m \cdot \ln[\rho_m] \quad (5)$$

در روش موجک-آن‌تروپی برای ارزیابی معیار پیچیدگی و همچنین محاسبه‌ی میزان تغییرات و

در رابطه (۱)، a : روند کلی تغییرات سری زمانی، و l : سطح تجزیه می‌باشد.

مثلاً در آب زیرزمینی روند کلی تغییرات به صورت سالانه می‌باشد حال اگر بازه زمانی سری زمانی به صورت ماهانه باشد چون تعداد بازه زمانی (ماه) در روند کلی تغییرات (سال) ۱۲ می‌باشد و عدد ۱۲ مابین ۲^۳ و ۲^۴ می‌باشد مقدار سطوح پیشنهادی تجزیه سیگنال مادر ۳ و ۴ می‌باشد. به همین ترتیب برای داده‌های روزانه سطح آب زیرزمینی مقدار سطوح اولیه پیشنهادی ۸ و ۹ می‌باشد. همچنین برای بررسی روند تغییرات سالانه عوامل اقلیمی از جمله بارش، رواناب، دما و غیره براساس بازه‌های زمانی ماهانه از سطح تجزیه ۳ الی ۴ و برای بررسی تغییرات ماهانه از بازه‌های روزانه و سطح تجزیه ۵ استفاده می‌گردد (Nourani et al., 2011).

آن‌تروپی

برای اولین بار شانون در سال ۱۹۴۸، آن‌تروپی (محتوای اطلاعاتی) را به صورت ریاضی و با استفاده از توزیع احتمالاتی داده‌ها فرمول‌بندی کرد و آن را به عنوان معیار سنجش بی‌نظمی، آشفتگی، عدم قطعیت و اطلاعات معرفی کرد (Shannon, 1948). این نوع آن‌تروپی به عنوان آن‌تروپی شانون شناخته می‌شود.

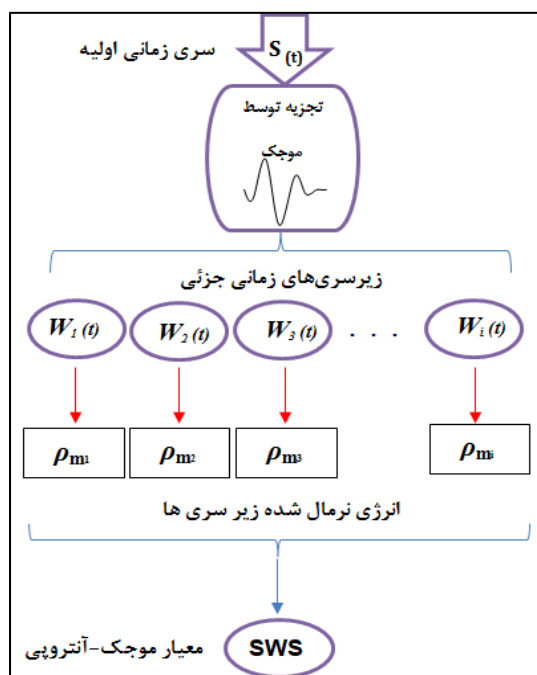
نظریه اطلاعات بر مبنای نظریه احتمالات و فرآیندهای اتفاقی^۱ به وجود آمده است. مهم‌ترین کمیت‌های مربوط به اطلاعات عبارتند از: آن‌تروپی (که میانگین محتوای اطلاعاتی یک منبع اطلاعات است) و اطلاعات متقابل (که مقدار اطلاعات مشترک بین دو متغیر تصادفی است). کمیت اول (آن‌تروپی)، به ما نشان می‌دهد که اطلاعات خروجی یک منبع اطلاعات تا چه حد می‌تواند فشرده شود، درحالی‌که کمیت دوم (اطلاعات متقابل)، می‌تواند برای یافتن سرعت ارتباط در یک کانال مورد استفاده قرار گیرد.

غیر از آن‌تروپی شانون آن‌تروپی‌های دیگری نیز وجود دارد، که هر یک ویژگی‌های مخصوص به خود دارند اما اثبات شده است که از دیدگاه قابلیت کاربرد در

^۱-Probability Theory and Stochastic Processes

در شکل (۳) فلوجارت مراحل محاسبه معیار موجک-آنتروپی در این تحقیق ارائه شده است.

نوسانات جزئی از زیر سری‌های زمانی جزئیات استفاده می‌شود.



شکل(۳): ساختار شماتیک محاسبه معیار موجک-آنتروپی

شرایط، امکان جلوگیری از پیشرفت بیماری آبخوان و در نتیجه خشک شدن آبخوان انجام داد. در سال‌های گذشته برخی از اقداماتی مثل نصب کنترلهای هوشمند، فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی در نحوه و مقدار استفاده از آب، برخی از اقداماتی است که توسط سازمان‌های وابسته به صنعت آب در کشور اجرا شده است.

درصد تغییرات در جدول (۴) نشان می‌دهد که در بازه زمانی سوم در تمام چاه‌های مشاهده‌ای (به جز چاه شماره یک) میزان پیچیدگی نسبت به بازه زمانی دوم کمی بهبود یافته است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت عوامل محیطی و انسانی در بهبود وضعیت آبخوان در این بازه زمانی بوده است. این تأثیر مثبت در چاه مشاهده‌ای شماره دو (نسبت به چاه‌های شماره ۳ و ۴) کمتر بوده است. این چاه از کاهش شدیدتر پیچیدگی برخوردار است یعنی وضعیت آبخوان در محدوده این چاه نسبت به سایر چاه‌ها بحرانی‌تر است.

نتایج و بحث

تغییرات پیچیدگی نوسانات سطح آب زیرزمینی

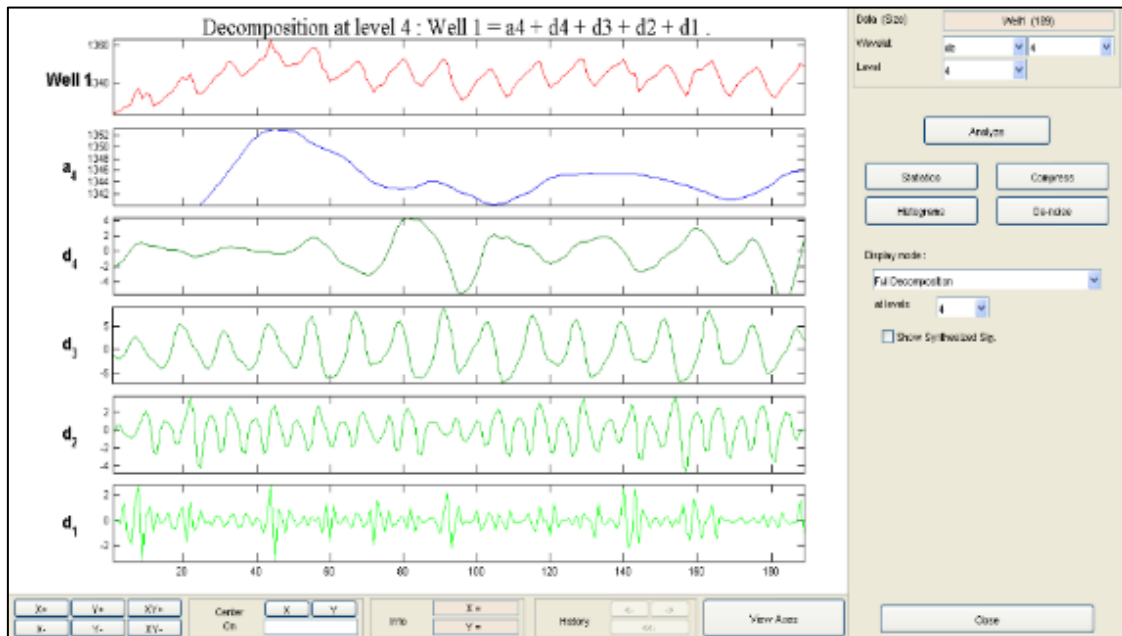
انرژی زیر سری‌های جزئی حاصل از تجزیه سری زمانی اصلی در مرتبه ۴ و همچنین معیار پیچیدگی بر مبنای موجک آنتروپی (SWS) برای دسته‌های (T2, T1, T3) در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب در جدول (۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود که معیار SWS یا موجک-آنتروپی در تمام چاه‌های مشاهده‌ای منتخب در تمام بازه زمانی کاهش داشته است که این کاهش نشان دهنده کاهش میزان پیچیدگی تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشد. کاهش پیچیدگی تراز آب در چاه‌های مشاهده‌ای یا کاهش نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان ارومیه، بیمار شدن آبخوان تحت عوامل مختلف محیطی و غیر محیطی را نشان می‌دهد که بیمار شدن آبخوان و عدم احیای آن نهایتاً منجر به خشک شدن آن می‌گردد. لذا ضروری است با تمهیدات و اقدامات لازم و به موقع جهت بهبود

پذیر از عوامل محیطی و غیر محیطی بوده و روز به روز در حال تشدید است.

در چاه مشاهده‌ای شماره یک، روند تغییرات پیچیدگی در بازه‌های مورد مطالعه رو به کاهش است. این بدین معنی است که این قسمت از آبخوان آسیب

جدول (۳): انرژی زیرسری‌های جزئی و معیار SWS برای دسته‌های (T1, T2 و T3) در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای

سری زمانی	دسته	پارامترهای آنتروپی					SWS	درصد	
		E1	E2	E3	E4	E-total		تغییرات	تغییرات کل
Well 1	T1	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۵۴	۰/۲۲	۰/۹۵	۱/۱۰	-	-
	T2	۰/۰۶	۰/۸۹	۲/۸۳	۰/۷۷	۴/۵۶	۰/۹۸	-۱۱٪	-
	T3	۰/۱۲	۰/۴۲	۳/۵۰	۱/۱۳	۵/۱۸	۰/۸۹	-۹٪	-۱۹٪
well 2	T1	۰/۱۰	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۳۶	۱/۰۶	۱/۲۹	-	-
	T2	۰/۰۵	۰/۴۵	۱/۰۵	۰/۱۱	۱/۶۶	۰/۹۴	-۲۸٪	-
	T3	۰/۱۶	۰/۲۸	۲/۲۹	۰/۷۳	۳/۴۶	۰/۹۴	۱٪	-۲۷٪
Well 3	T1	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۹۳	۰/۳۶	۲/۲۲	۱/۳۱	-	-
	T2	۰/۱۵	۰/۶۷	۲/۴۵	۰/۶۴	۳/۹۱	۱/۰۲	-۲۳٪	-
	T3	۰/۴۳	۱/۰۲	۴/۶۱	۲/۲۶	۸/۳۲	۱/۰۹	۸٪	-۱۶٪
Well 4	T1	۰/۱۱	۰/۳۳	۱/۴۱	۰/۸۸	۲/۷۲	۱/۰۹	-	-
	T2	۰/۱۳	۰/۹۶	۳/۶۹	۰/۸۶	۵/۶۴	۰/۹۵	-۱۲٪	-
	T3	۰/۲۰	۰/۷۶	۴/۴۷	۱/۸۱	۷/۲۴	۰/۹۸	۳٪	-۱۰٪



شکل (۳): اعمال موجک و تجزیه سری زمانی اولیه تراز آب در چاه مشاهده‌ای Well 1 با ۴ سطح تجزیه



نتایج بررسی تغییرات پیچیدگی بارش، دما و تبخیر

برای ارزیابی نوسان‌های اقلیمی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ سری‌های زمانی ماهانه بارش، تبخیر و دما به سه بازه زمانی مساوی (T1, T2 و T3) تقسیم و معیار موجک- آنتروپی در هر سه بازه زمانی محاسبه شد. بر این اساس، متوسط بارش سالانه در دوره زمانی اول برابر ۳۱۴ میلی‌متر، در دوره زمانی دوم برابر ۳۵۳/۵ میلی‌متر و در دوره زمانی سوم برابر ۳۲۹/۴ میلی‌متر می‌باشد. کاهش متوسط بارش مبحثی کاملاً متفاوت با کاهش نوسانات بارش است. همچنین میانگین دما در دوره مورد مطالعه به این ترتیب است: در دوره زمانی اول برابر با ۱۲/۲۷ درجه سلسیوس، در دوره زمانی دوم میانگین دما برابر ۱۰/۹۴ درجه سلسیوس و نهایتاً در بازه زمانی سوم این مقدار برابر ۱۲/۲۸ درجه سلسیوس است.

میانگین تبخیر سالانه در دوره زمانی اول برابر ۱۴۱/۷ میلی‌متر، در دوره زمانی دوم برابر ۱۴۰/۸ میلی‌متر و در دوره زمانی سوم برابر ۱۴۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. مطابق جدول (۴) میزان انرژی بارش در دوره زمانی دوم در سطوح یک، سه و چهار بیشتر است و در سطح دو انرژی موجک در دوره زمانی اول بیشتر است.

برای پارامتر تبخیر انرژی موجک در سطوح دو و چهار برای دوره زمانی دوم بیشتر بوده است. در سطح یک دوره زمانی سوم و در سطح سوم دوره زمانی اول دارای بیشترین مقدار بوده است.

برای پارامتر دما انرژی موجک در سطوح یک، دو و سه در دوره زمانی اول بیشتر بوده است. در سطح چهار مقدار انرژی موجک در دوره زمانی دوم بیشترین مقدار بوده است.

بعد از برآورد انرژی موجکی، مقدار معیار SWS محاسبه و تعیین گردید، نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است.

در دوره زمانی دوم نسبت به دوره زمانی اول درصد تغییرات SWS بارش مثبت، در دوره زمانی سوم نسبت به دوره دوم تغییرات منفی، و در کل دوره زمانی درصد تغییرات SWS بارش صفر بوده است. این مطلب بیانگر این است که تغییرات بارش بر افت آب زیرزمینی آبخوان ارومیه نقشی نداشته است.

در دوره زمانی دوم نسبت به دوره زمانی اول درصد تغییرات SWS دما افزایشی، در دوره زمانی سوم نسبت به دوره دوم درصد تغییرات کاهش‌ی، و در کل دوره زمانی درصد تغییرات SWS دما کاهش‌ی بوده است. این مطلب بیانگر تأثیر تغییرات دما بر افت آب زیرزمینی آبخوان ارومیه می‌باشد.

در دوره زمانی دوم نسبت به دوره زمانی اول درصد تغییرات SWS تبخیر افزایشی، در دوره زمانی سوم نسبت به دوره دوم درصد تغییرات کاهش‌ی، و در کل دوره زمانی درصد تغییرات SWS تبخیر افزایشی بوده است. این مطلب بیانگر آن است که تغییرات تبخیر بر افت آب زیرزمینی آبخوان ارومیه نقشی نداشته است.

جدول (۴): انرژی زیر سری‌های جزئی، معیار SWS برای دسته داده‌های بارش، تبخیر و دما و درصد تغییرات SWS

سری زمانی	دسته	پارامترهای آنتروپی					SWS	درصد تغییرات	درصد تغییرات کل
		E1	E2	E3	E4	E-total			
بارش	T1	۱/۳۰	۱/۷۱	۰/۶۸	۰/۱۸	۳/۸۷	۱/۱۷	-	-
	T2	۱/۹۳	۰/۸۰	۰/۷۴	۱/۰۷	۴/۵۴	۱/۳۱	۱۱٪	-
	T3	۱/۰۷	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۱۰	۲/۲۰	۱/۱۷	-۱۱٪	۰٪
دما	T1	۰/۱۸	۱/۰۵	۳/۵۵	۱/۰۱	۵/۷۹	۱/۰۲	-	-
	T2	۰/۱۳	۰/۵۸	۲/۵۸	۱/۸۳	۵/۱۱	۱/۰۵	۳٪	-
	T3	۰/۱۰	۰/۴۹	۳/۴۶	۰/۹۷	۵/۰۲	۰/۸۸	-۱۶٪	-۱۴٪
تبخیر	T1	۰/۱۹	۱/۱۰	۴/۱۷	۱/۵۸	۷/۰۳	۱/۰۳	-	-
	T2	۰/۲۲	۲/۰۵	۲/۷۸	۲/۸۱	۷/۸۶	۱/۱۸	۱۵٪	-
	T3	۰/۲۵	۱/۰۶	۳/۷۹	۱/۶۷	۶/۷۷	۱/۰۸	-۹٪	۵٪



تغییرات پیچیدگی دبی رودخانه و تأثیر آن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی

برای ایستگاه تپیک میزان انرژی موجک در سطوح یک و سه در دوره زمانی دوم بیشتر بوده است. در سطح دو انرژی موجک در دوره زمانی اول بیشتر است. در سطح چهارم انرژی موجک در دوره زمانی سوم بیشتر بوده است. برای ایستگاه آباجالوی سفلی میزان انرژی موجک در سطوح یک و سه در دوره زمانی دوم بیشتر بوده است. در سطح دو انرژی موجک در دوره زمانی اول بیشتر است. در سطح چهارم انرژی موجک در دوره زمانی سوم بیشتر بوده است. برای ایستگاه بند ارومیه میزان انرژی موجک در سطوح یک و سه در دوره زمانی سوم بیشتر بوده است. در سطح دو انرژی موجک در دوره زمانی اول بیشتر است. در سطح چهارم انرژی موجک در دوره زمانی دوم بیشتر بوده است. برای ایستگاه بابرود میزان انرژی موجک در سطوح یک و سه در دوره زمانی دوم بیشتر بوده است. در سطح دو انرژی موجک در دوره زمانی اول بیشتر است. در سطح چهارم انرژی موجک در دوره زمانی سوم بیشتر بوده است.

همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، مقادیر پیچیدگی سیستم رودخانه‌های آبخوان ارومیه در کل دوره زمانی در سه ایستگاه از ۴ ایستگاه هیدرومتری

مقدار افزایشی بوده است و تنها در ایستگاه بند ارومیه کاهش یافته است که در ادامه به علت آن پرداخته می‌شود. به عبارت دیگر پیچیدگی سری زمانی رواناب در آبخوان ارومیه در حال افزایش است. این موضوع نشان دهنده خود ترمیمی و نبود سوء تأثیر عوامل محیطی و غیر محیطی بر رفتار رودخانه‌های آبخوان می‌باشد.

بیشترین تغییرات در معیار SWS در ایستگاه آباجالوی سفلی با مقدار بیش از ۴۷ درصد در دوره زمانی دوم بوده است. در این دوره زمانی نسبت به دوره زمانی اول مقدار SWS در همه ایستگاه‌ها افزایشی بوده است. در دوره زمانی سوم در ایستگاه‌های تپیک و بابرود مقدار تغییرات SWS افزایشی و در دو ایستگاه آباجالوی سفلی و بند ارومیه کاهش یافته است. با توجه به سیر صعودی تغییرات پیچیدگی سیستم رودخانه‌ها، می‌توان گفت که در دوره زمانی مورد مطالعه کاهش نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ارومیه ارتباطی با رفتار رودخانه‌ها نداشته و تغییرات پیچیدگی آن‌ها با یکدیگر هم‌جهت و منطبق نیست.

به طور کلی با توجه به نتایج جدول (۵) ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه دارای پیچیدگی منفی بوده است این ایستگاه بر روی رودخانه شهرچای قرار دارد که علت این پیچیدگی منفی احتمالاً وجود سد شهرچای بر روی این رودخانه می‌باشد که در دوره سوم (از سال ۱۳۹۰ به بعد) به بهره‌برداری رسیده است.

جدول (۵): انرژی زیرسری‌های جزئی، معیار SWS و درصد تغییرات SWS دبی رودخانه برای دوره‌های زمانی

سری زمانی	دسته	پارامترهای آنتروپی					SWS	درصد تغییرات	درصد تغییرات کل
		E1	E2	E3	E4	E-total			
تپیک	T1	۰/۱۳	۱/۷۱	۰/۷۶	۰/۱۰	۲/۷۰	۰/۹۲	-	-
	T2	۰/۶۷	۰/۴۱	۱/۹۵	۰/۲۵	۳/۲۸	۱/۰۹	۱۹٪	-
	T3	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۵۹	۱/۱۴	۲/۱۴	۱/۱۲	۳٪	۲۲٪
آباجالوی سفلی	T1	۰/۰۷	۱/۴۴	۰/۳۴	۰/۱۱	۱/۹۶	۰/۸۲	-	-
	T2	۱/۴۱	۰/۵۱	۱/۰۵	۰/۲۱	۳/۱۹	۱/۲۰	۴۷٪	-
	T3	۰/۴۱	۰/۲۴	۰/۶۲	۱/۷۳	۳/۰۰	۱/۱۲	-۷٪	۳۶٪
بند ارومیه	T1	۰/۳۲	۱/۱۲	۱/۲۳	۰/۱۱	۲/۷۸	۱/۱۰	-	-
	T2	۰/۲۴	۰/۷۵	۱/۲۰	۱/۷۶	۳/۹۴	۱/۲۱	۹٪	-
	T3	۰/۴۱	۰/۸۷	۳/۷۹	۱/۰۵	۶/۱۳	۱/۰۶	-۱۲٪	-۴٪
بابارود	T1	۰/۱۷	۱/۷۹	۰/۳۸	۰/۲۶	۲/۶۰	۰/۹۴	-	-
	T2	۰/۸۸	۰/۵۴	۱/۱۳	۰/۲۰	۲/۷۵	۱/۲۴	۳۲٪	-
	T3	۰/۳۳	۰/۵۸	۱/۲۴	۱/۵۱	۳/۶۵	۱/۲۴	۰٪	۳۲٪

در چاه بهره‌برداری یک PW1 بیشترین انرژی موجک در سطح ۴ برای دوره اول، در دوره دوم در سطح ۳، و در دوره سوم در سطح ۳ بدست آمده است. در چاه بهره‌برداری دو PW2 بیشترین انرژی موجک در سطح ۱ برای دوره اول، در دوره دوم در سطح ۴، و در دوره سوم، در سطح ۴ بدست آمده است. در چاه بهره‌برداری سه PW3 بیشترین انرژی موجک در سطح ۳ برای دوره اول، در دوره دوم در سطح ۳، و در دوره سوم در سطح ۴ بدست آمده است. در چاه بهره‌برداری چهار PW4 بیشترین انرژی موجک در سطح ۴ برای دوره اول، در دوره دوم در سطح ۴، و در دوره سوم، در سطح ۴ بدست آمده است.

همچنین در همه چاه‌های بهره‌برداری بیشترین انرژی مربوط به دوره اول بوده است. بعد از برآورد انرژی موجکی، مقدار معیار SWS محاسبه و تعیین گردید. در جدول (۶) انرژی زیر سری‌های جزئی حاصل از تجزیه سری زمانی اصلی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در مرتبه ۴ و همچنین معیار SWS برای دسته‌های (T1، T2 و T3) ارائه شده است.

تغییرات پیچیدگی میزان برداشت از آبخوان و تأثیر آن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی

تهیه سری زمانی از برداشت میزان کل بهره‌برداری چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان ارومیه به دلیل عدم تجهیز تمام چاه‌های بهره‌برداری به کنتورهای حجمی و عدم نبود سیستم پایش سراسری و کنترل برداشت میسر نیست. از سال ۱۳۸۰ برنامه پایش کمی براساس منابع انتخابی در دشت ارومیه اجرا شده است. بر مبنای این پایش، چند چاه بهره‌برداری با پراکندگی و فواصل مناسب به نمایندگی از کل آبخوان انتخاب و در بازه‌های زمانی حداقل ماهانه مقدار آبدهی بر حسب لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود و تغییرات کلی برداشت از آبخوان در بازه‌های زمانی سالانه براساس این منابع انتخابی برآورد و تعیین می‌گردد. لذا در این تحقیق از سری زمانی ماهانه نزدیک‌ترین این منابع انتخابی به چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه شامل (PW1، PW2، PW3) و PW4 طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ استفاده شده است.

جدول (۶): اثرژی زیر سری های جزئی، معیار SWS و درصد تغییرات SWS برداشت از آبخوان برای دوره های زمانی

سری زمانی	دسته	پارامترهای آنتروپی					SWS	درصد تغییرات	درصد تغییرات کل
		E1	E2	E3	E4	E-total			
PW 1	T1	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۳۷	۰/۵۵	۱/۳۰	۱/۲۷	-	-
	T2	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۴۴	۰/۰۷	۰/۹۱	۱/۱۱	-۱۳٪	-
	T3	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۶۳	۰/۲۳	۱/۱۷	۱/۱۸	۷٪	-۶٪
PW 2	T1	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۴۲	۱/۵۸	۱/۳۷	-	-
	T2	۰/۰۵	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۵۴	۱/۲۶	۱/۱۹	-۱۳٪	-
	T3	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۴۸	۰/۸۴	۱/۰۰	-۱۶٪	-۲۷٪
PW 3	T1	۰/۲۳	۰/۲۹	۱/۰۵	۰/۲۳	۱/۸۱	۱/۱۴	-	-
	T2	۰/۱۰	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۱۱	۱/۳۶	۱/۱۱	-۳٪	-
	T3	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۳۲	۱/۰۲	-۸٪	-۱۰٪
PW 4	T1	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۰	۱/۲۱	-	-
	T2	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۴۵	۰/۵۸	۰/۷۶	-۳۷٪	-
	T3	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۳۴	۱/۰۳	۳۶٪	-۱۵٪

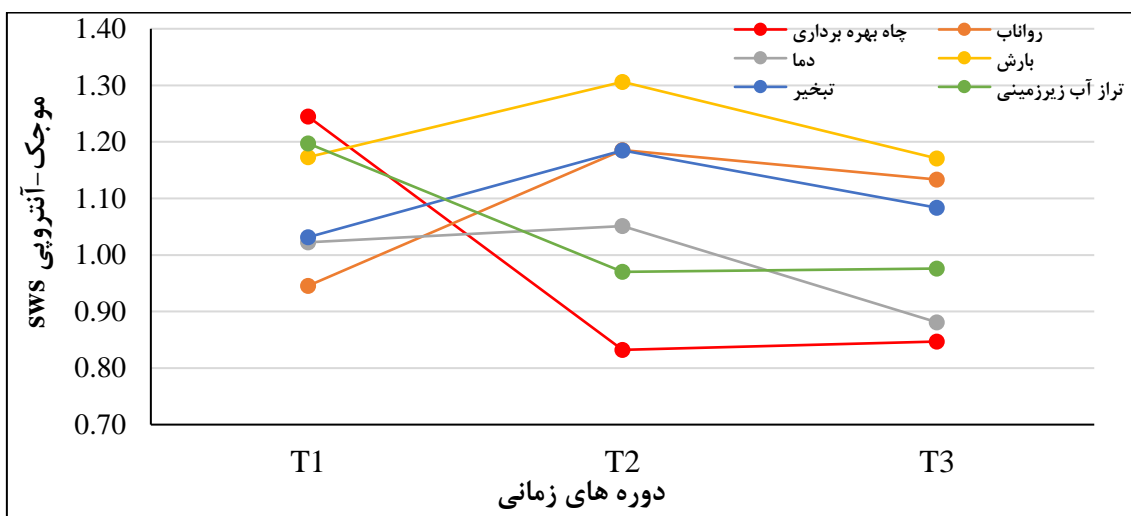
جمعیت و افزایش تأمین غذا منجر به افزایش اراضی تحت کشت و در پی آن افزایش چاه های برداشت از آبخوان ارومیه شده است. و این امر باعث تنش و اعمال تغییرات بر آبخوان شده است. با اعمال این تغییرات سری زمانی از حالت طبیعی و بهینه خود خارج شده، شروع به از دست دادن پیچیدگی خود می کند و به اصطلاح بیمار می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که عوامل انسانی نظیر تغییرات رشد جمعیت می تواند عامل مهمی در کاهش تراز آب زیرزمینی و همچنین کاهش پیچیدگی تراز آب و بیمار شدن آبخوان باشد.

مقایسه نتایج

به منظور مشخص کردن سهم عوامل مورد بررسی در این تحقیق، در شکل (۴) معیار SWS برای هر یک از عوامل در دوره های مختلف زمانی ترسیم شده است. برای ترسیم شکل (۴) میانگین (برای چاه های مشاهده ای و بهره برداری از روش میانگین گیری به روش تیسن استفاده شده است) مقدار معیار SWS برای پارامترهای مؤثر محاسبه شده است.

با توجه به جدول (۶)، تغییرات معیار SWS در کل دوره زمانی در همه چاه های بهره برداری کاهش یافته است. در همه چاه های بهره برداری در دوره زمانی دوم نسبت به دوره زمانی اول تغییرات معیار SWS کاهش یافته است. در دوره زمانی سوم نسبت به دوره زمانی دوم در چاه های بهره برداری شماره یک و چهار تغییرات SWS افزایش یافته است. ولی در چاه های بهره برداری شماره دو و سه تغییرات SWS کاهش یافته است. به طور کلی نتایج بدست آمده از تغییرات معیار SWS نشان از تأثیر مقدار برداشت این چاه ها در افت سطح آب زیرزمینی دارد، لذا عوامل غیرمحیطی (انسانی) نظیر برداشت از آبخوان می تواند عامل مهمی در تغییر میزان پیچیدگی سری زمانی نوسانات سطح آب زیرزمینی ارومیه گردد.

در آبخوان ارومیه تعداد چاه های بهره برداری افزایش یافته است و از دوره زمانی دوم و سوم با شیب تندی در حال افزایش است. افزایش تعداد چاه بهره برداری در آبخوان ارومیه همراه با افت بیشتر سطح آب زیرزمینی و افزایش برداشت از آبخوان همراه بوده است. در ایران به دلیل عدم وجود زیر ساخت های صنعتی مناسب و تکیه به فعالیت های کشاورزی در تأمین غذا، افزایش



شکل (۴) نمودار تغییرات معیار SWS برای پارامترهای بارش، دما، تبخیر، تراز آب زیرزمینی، دبی و برداشت از چاه‌های بهره‌برداری

نسبت به دوره زمانی دوم کاهش نشان می‌دهد اما نسبت به دوره اول همچنان افزایشی می‌باشد، لذا با وجود کاهش این مقادیر در دوره سوم نسبت به دوره دوم، همچنان این عوامل بر افت آب زیرزمینی تأثیری ندارند، چون تراز آب زیرزمینی در این دوره افزایش یافته است، مقدار SWS دما نیز در این دوره کاهش نشان می‌دهد درحالی‌که مقدار SWS تراز آب زیرزمینی افزایش یافته است پس در این دوره دما هم تأثیری نداشته است، تنها عاملی که در این دوره هم جهت با مقدار SWS تراز آب زیرزمینی می‌باشد، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد، بنابراین عامل اصلی و مهم بر روی افت آب‌های زیرزمینی آبخوان ارومیه، برداشت از این آبخوان می‌باشد.

ترکیب تبدیل موجک با روش آنتروپی که سطوح انرژی سیستم را محاسبه می‌کند بهره گرفته شد. برای محاسبه میزان پیچیدگی در روی سری‌های زمانی مورد مطالعه با توجه داده‌های موجود سری زمانی ماهانه از سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ جمع‌آوری و آماده‌سازی گردید. و سپس سری زمانی اصلی به سه دسته مساوی تقسیم و بررسی تغییرات پیچیدگی بر مبنای معیار

با توجه به شکل (۴) در دوره زمانی دوم، مقدار SWS برای مولفه‌های بارش، رواناب، دما و تبخیر زیاد شده است به عبارتی این عوامل سهمی در افت آب زیرزمینی نداشته‌اند، اما برداشت آب از چاه‌ها (چاه‌های بهره‌برداری) دارای مقدار کاهشی می‌باشد، که با توجه به تراز آب زیرزمینی که کاهش یافته است نشان از این دارد که دلیل اصلی کاهش سطح آب زیرزمینی، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در دشت ارومیه می‌باشد. در دوره سوم زمانی تراز آب زیرزمینی نسبت به دوره دوم، مقداری بهبود پیدا کرده است این می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله نصب کنتورهای حجمی، فرهنگ‌سازی برای استفاده درست از آب زیرزمینی، افزایش بارش و رواناب رودخانه مرتبط باشد. در این دوره مقدار SWS برای مولفه‌های بارش، تبخیر، رواناب

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی گردید با بررسی تغییرات پیچیدگی آبخوان و بررسی تغییرات پیچیدگی عوامل محیطی و غیر محیطی منطقه از قبیل بارش، تبخیر، دما، رواناب و برداشت از چاه‌های بهره‌برداری سهم این عوامل در تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ارومیه مشخص شود. جهت بررسی تغییرات پیچیدگی از



عوامل بر افت آب زیرزمینی تأثیری نداشته‌اند، مولفه های دما و برداشت از آب زیرزمینی مقدار SWS کمتری داشته‌اند، که نشان از تأثیر این دو عامل در کل دوره آماری بر افت آب‌های زیرزمینی می‌باشند. از بین این دو عامل مقدار SWS برداشت از چاه‌های بهره برداری کاهش بیشتری را نشان می‌دهد که نشان از اهمیت این مولفه دارد، به طور کلی پارامتر برداشت از چاه‌های بهره‌برداری عامل اصلی و بعد از آن دما عامل دوم مؤثر بر افت آب‌های زیرزمینی می‌باشند.

پیچیدگی موجک آنتروپی در این بازه‌های زمانی انجام گرفت. بدین منظور ابتدا هرکدام از سری‌های زمانی مورد مطالعه توسط توابع موجکی در چهار سطح تجزیه به زیرسری‌های تقریب و جزئیات تجزیه شدند. با در نظر گرفتن این عوامل، برای کل دوره آماری می‌توان گفت که سطح آب زیرزمینی کاهش یافته است، بررسی عوامل نشان می‌دهد که در کل دوره آماری مقدار SWS بارش تغییری نکرده است، مقدار SWS رواناب و تبخیر افزایش یافته است، پس این

تقدیر و تشکر

نویسندگان مطالعه حاضر، از شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات این مطالعه، کمال تشکر و قدردانی را بعمل می‌آورند.

منابع

- بیضایی، ع.، محمدی، ح. (۱۳۸۲). بررسی اثرات خشکسالی اخیر بر روی منابع آب زیرزمینی دشت نیشابور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه جغرافیا، دانشگاه تهران.
- دانشور و ثوقی، ف.، شاکر، ر. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی با روش ترکیبی من کندال تبدیل موجک (مطالعه- موردی: دشت اردبیل). مجله محیط زیست و مهندسی آب، (۳): ۲۵۳-۲۴۳.
- روشنگر، ک.، دولتشاهی، م.، شهنازی، س. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر بارش بر تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تبدیل موجک و آزمون من کندال (مطالعه موردی). کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام ایران - تبریز (پایتخت گردشگری کشورهای اسلامی ۲۰۱۸). ۱-۱۳.
- زنگنه اسدی، م.، ع.، شفیع، ن. (۱۳۹۶). بررسی همزمانی خشکسالی و افت آب زیرزمینی دشت نورآباد ممسنی با استفاده از GIS. دومین همایش هیدرولوژی ایران، ۱-۱۵.
- شفائی، م.، فاخری فرد، ا.، دربندی، ص.، قربانی، م. ع. (۱۳۹۲). پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه با استفاده از مدل هیبرید موجک و شبکه عصبی؛ مطالعه موردی ایستگاه هیدرومتری ونیار در حوضه آبریز آجی‌چای. آبیاری و آب ایران، (۲): ۱۲۸-۱۱۳.
- طوفانی، پ.، مساعدی، ا.، فاخری فرد، ا. (۱۳۹۰). پیش‌بینی بارندگی با استفاده مستقیم از نظریه، موجک. نشریه آب و خاک، (۲۵): ۱۲۲۶-۱۲۱۷.
- کماسی، م.، شرقی، س. (۱۳۹۶). روندیابی و رده بندی عوامل مؤثر بر کاهش تراز آب زیرزمینی با بهره‌گیری از تبدیلات موجک متقابل و ارتباطی، مطالعه موردی آبخوان دشت سیلاخور. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. (۲۸): ۷: ۱۵۱-۱۳۸.
- نورانی، و. حسن‌زاده، ی.، کماسی، م.، شرقی، ا. (۱۳۸۷). مدل‌سازی بارش-رواناب با مدل ترکیبی موجک- شبکه عصبی مصنوعی. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۸-۱.



- نورانی، و.، رنجبر، س.، توتونچی، ف. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات فرایندهای هیدرولوژیکی با استفاده از معیاره موجک- آنتروپی، مطالعه موردی: دریاچه ارومیه. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، (۳): ۴۵-۸۶.
- Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S.C. and Das, P. (1994). Application of wavelet transform signal processor to ultrasound. Proceeding of IEEE International Ultrasonics Symp, 1147-1152.
- Adamowski, J. and Chan, F.H. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407(1- 4): 28-40.
- Chou, M. (2014). Complexity Analysis of Rainfall and Runoff Time Series Based on Sample Entropy in Different Temporal Scales. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(6): 1401-1408.
- Huang, F., Xia, Z., Zhang, N., Zhang, Y. and Li, J. (2011). Flow complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze river China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16: 914-919.
- Kim, T.W. and Valdes, J.B. (2003). Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6): 319-328.
- Lashkaripour, G.R. and Ghafoori, M. (2011). The Effects of Water Table Decline on the Groundwater Quality in Aquifer of Torbat Jam Plain. Northeast Iran, *International Journal of Emerging Sciences*, 1(2): 153-163.
- Liu, D., Qiang, F.U., Hu, Y. and Wu, Q. (2015). Complexity measure of regional groundwater resources system based on wavelet entropy: A case study of Jiansanjiang administration of Heilongjiang land reclamation in China. *Environ Earth Science*, 73(3): 1033-1043.
- Mishra, A.K., Özger, M. and Singh, V.P. (2009). An entropy-based investigation into the variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 370(1-4): 139-154.
- Nourani, V., Kisi, O. and Komasi, M. (2011). Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall-runoff process. *Journal. Hydrol*, 402 (1-2): 41-59.
- 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*, 15: 2297- 2301.
- Raghavendra, N. and Deka, P.C. (2015). Forecasting monthly groundwater level fluctuations in coastal aquifers using hybrid Wavelet packet-Support vector regression. *Cogent Engineering*, 2(1): 999414.
- Shahid, S. and Hazarika, M.K. (2009). Groundwater drought in the northwestern districts of Bangladesh. *Water Resource Management*, 24: 1989-2006.
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communications I and II. *Bell System Technical Journal*, 27: 379-443.
- Singh, V.P. (2011). Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory: Review. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5) : 421-433.
- Yu, H., Wen, X., Feng, Q., Deo, R.C., Si, J. and Wu, M. (2018). Comparative Study of Hybrid-Wavelet Artificial Intelligence Models for Monthly Groundwater Depth Forecasting in Extreme Arid Regions, Northwest China. *Water Resources Management*, 32: 301-323.



Studying Causes of Decreasing Groundwater Level (Case Study: Urmia Aquifer)

Sousan Afzali¹, Mahmoudreza Mollaienia², Mehdi Komasi³, Mohammad Salkhordeh Haghghi⁴.

Abstract

Increasing water demand in recent years, industrial and agricultural development and lack of proper management, have led to tensions on water resources, especially groundwater resources. Urmia aquifer is one of aquifers that in recent years faced a severe drop in groundwater level. In this study, with considering of the rainfall, evaporation, temperature, flow of rivers in hydrometry stations and discharge of exploitation wells, contribution of each of factors on the rate of decreasing groundwater level in Urmia aquifer was determined. In order to evaluate changes was used of a hybrid wavelet transform and entropy method. In this study, monthly time series were used for a period of 16 years (2001-2017). Then, the time series was divided to three equal parts and the complexity changes was performed based on the wavelet-entropy criterion (SWS) in these intervals. Results showed that the SWS or wavelet-entropy criterion was reduced in all selected observation wells at all time intervals, which indicates a reduction in the complexity of the groundwater level fluctuations in the Urmia aquifer and as a result of the aquifer's disease. According to the results of this study, the discharge of exploitation and temperature respectively are two parameters main affecting on the decreasing groundwater level in Urmia aquifer.

Keyword: Urmia Aquifer, Complexity, Groundwater Level, Wavelet-Entropy.

¹Corresponding Author Email: m_mollaienia@yahoo.com.

1- MSc Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. sousanafzali2015@gmail.com.

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. m_mollaienia@yahoo.com.

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran. komasi@abru.ac.ir.

4-Instructor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. M.salkhordeh.h@gmail.com.



Studying Causes of Decreasing Groundwater Level (Case Study: Urmia Aquifer)

Sousan Afzali¹, Mahmoudreza Mollaienia^{1,2}, Mehdi Komasi³, Mohammad Salkhordeh Haghighi⁴.

Introduction

With the development of agricultural and industrial projects, the increasing population, the expansion of cities and the consequent increase in the quantitative and qualitative standards of life, the demand for water has steadily increased. However, the country's water resources are limited and many parts of the country, especially desert areas are facing water shortages. Restrictions on water resources, droughts and lack of timely management of water resources have led to declining groundwater levels. For this purpose, many studies have been done on groundwater.

Methodology

The wavelet transform is one of the effective mathematical transforms in the field of signal processing. The main advantage of the wavelet transform is that the time and frequency information were extracted effectively from varied time signals. The Wavelet transform is a transformation that breaks down the signal into a set of basic signal functions and in fact, a basic function set is obtained from the delay and change in the mother wavelet scale (Shafaei et al., 2013).

By combining the concepts of the wavelet transform and the entropy, a new tool called the wavelet-entropy is obtained to calculate complexity. Using this method, the time series can be divided into a number of sub-series and the wavelet energy of each sub-series, and thus the wavelet-entropy criterion can be calculated for each of them. In the wavelet-entropy method, details time series are used to evaluate the complexity criterion as well as to calculate the amount of minor changes and fluctuations.

Conclusion and Discussion

The amount of the SWS for the components of precipitation, runoff, temperature, and evaporation has increased. That the reduced groundwater level indicates that the main reason for the decrease in groundwater level is the extraction of wells in the Urmia aquifer. In the third period, the groundwater level has improved somewhat compared to the second period. This can be related to various reasons such as the installation of volumetric meters, culture for proper use of groundwater, increased rainfall, and river runoff.

Taking into account the factors, for the whole statistical period, we can say that the groundwater level has decreased. The study factors show that in the whole statistical period the amount the SWS of precipitation has not changed, the amount the SWS of runoff and evaporation has increased, so these factors did not have an effect on groundwater decline.

¹Corresponding Author Email: m_mollaienia@yahoo.com.

1- MSc Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. sousanafzali2015@gmail.com.

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. m_mollaienia@yahoo.com.

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran. komasi@abru.ac.ir.

4-Instructor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. M.salkhordeh.h@gmail.com.



The components of temperature and groundwater abstraction had a lower SWS value, which indicates the effect of these two factors in the total period on decreasing groundwater.

Among these two factors, the SWS of withdrawal from exploitation wells shows a further decrease, which indicates the importance of this component. In general, the parameter of withdrawal from exploitation wells is the main factor and then the temperature is the second factor affecting water loss are underground.

The most important references

- Liu, D., Qiang, F.U., Hu, Y. and Wu, Q. (2015). Complexity measure of regional groundwater resources system based on wavelet entropy: A case study of Jiansanjiang administration of Heilongjiang land reclamation in China. *Environ Earth Science*, 73(3): 1033–1043.
- Mishra, A.K., Özger, M. and Singh, V.P. (2009). An entropy-based investigation into the variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 370(1-4): 139-154.
- Nourani, V., Kisi, O. and Komasi, M. (2011). Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *Journal. Hydrol*, 402 (1–2): 41–59.
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communications I and II. *Bell System Technical Journal*, 27: 379-443.
- Singh, V.P. (2011). Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory: Review. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5) : 421-433.
- Yu, H., Wen, X., Feng, Q., Deo, R.C., Si, J. and Wu, M. (2018). Comparative Study of Hybrid-Wavelet Artificial Intelligence Models for Monthly Groundwater Depth Forecasting in Extreme Arid Regions, Northwest China. *Water Resources Management*, 32: 301-323.