



## Investigation of Hydro-Climatic and Vegetation Cover Trends and Complexities Effects on Water Table Using Wavelet-Entropy and Mann-Kendall

A. Afkhaminia<sup>1</sup>, V. Nourani<sup>2</sup>, S. Andaryani<sup>3\*</sup>, and A. Mokhtari Asl<sup>4</sup>

### Abstract

The present study aims at investigating the trend and energy complexity of hydro-climatic parameters including discharge, precipitation and temperature and Vegetation Cover (VC) in Zilbierchay catchment, East Azerbaijan, where water table has experienced a sharp drop in recent years. To this end, the water table (over 18 years interval), discharge, precipitation, temperature and VC (over 30 year interval) were examined using Mann-Kendall trend in monthly and yearly scales. The parameters were decomposed using Daubechies mother wavelet (db2) analysis at three 10-intervals and 5 time levels. The results indicated that the reduction of water table and discharge were significant. On the other hand, no significant trend was detected in precipitation and VC, while for temperature, significant increasing trends were observed in most of the months. The result of the complexity analysis revealed that the changes in the complexity of temperature (about 2% increase) were not significant, while the fluctuations reduction was found in precipitation (about 20%). In addition the pattern of fluctuations has changed which affected the complexity reduction of discharge (17%) and depth to the water table (13%). Furthermore, increasing vegetation cover area and temperature through raised evapotranspiration as well as reduced discharge and precipitation in the region have increased the drastic use of groundwater. Therefore, considering the complex relationships and synergistic effects of natural and human factors on water resources together can help managers in optimal and efficient decision making.

**Keywords:** Water Table, Hydrological Process, Wavelet-Entropy, NDVI, Zilbierchay Basin-East Azerbaijan.

Received: May 3, 2021

Accepted: June 10, 2021

## بررسی تأثیر روند و پیچیدگی متغیرهای هیدرواقليمی و پوشش گیاهی بر سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از معیار موجک- آنتروپی و من- کندال

امین افخمی‌نیا<sup>۱</sup>، وحید نورانی<sup>۲</sup>، صغری اندریانی<sup>۳\*</sup> و ابوالفضل مختاری اصل<sup>۴</sup>

### چکیده

با توجه به افت شدید سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری در سال‌های اخیر، هدف از مطالعه حاضر بررسی روند و پیچیدگی فرایندهای هیدرواقليمی و پوشش گیاهی در حوضه آبریز زیلبرچای، آذربایجان شرقی می‌باشد. بدین منظور ابتدا سطح ایستابی چاه‌های موجود در منطقه برای ۱۸ سال به صورت سالانه، داده‌های دبی، بارش، دما و پوشش گیاهی برای ۳۰ سال به صورت ماهانه و سالانه با استفاده از روش من-کندال روندیابی گردید؛ سپس با استفاده از تحلیل موجک مادر db2 متغیرها در سه بازه ۱۰ ساله و در پنج سطح زمانی تجزیه و آنتروپی آن‌ها محاسبه گردید. نتایج نشان‌دهنده روند معنی‌داری کاهش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و دبی است. همچنین، برای داده‌های بارش و پوشش گیاهی روند معنی‌داری چشمگیری مشاهده نگردید ولی برای متغیر دما روند معنی‌داری افزایشی در اکثر ماه‌ها وجود دارد. از طرفی تغییرات پیچیدگی متغیر دما (حدود ۲ درصد رشد) چندان چشمگیر نبود ولی متغیر بارش با کاهش نوسانات در طول دوره همراه بود (حدود ۲۰ درصد) و علاوه بر کاهش مقدار میانگین، الگوی نوسانات آن نیز در حال تغییر است و بر کاهش پیچیدگی دبی (۱۷ درصد) و سطح آب زیرزمینی (۱۳ درصد) تأثیر گذاشته است. همچنین افزایش پوشش گیاهی هم‌زمان با افزایش دما از طریق افزایش تبخیر- تعرق و از سوی دیگر کاهش دبی و بارش در منطقه باعث افزایش بهره‌برداری از چاه‌ها و کاهش سطح ایستابی آن‌ها شده است. بنابراین در نظر گرفتن روابط پیچیده و اثرات هم افزای عوامل طبیعی و انسانی بر منابع آب در کنار هم می‌تواند مدیران را در تصمیم‌گیری بهینه و کارآمد یاری کند.

**کلمات کلیدی:** منابع آب زیرزمینی، فرایندهای هیدرولوژیکی، موجک- آنتروپی، NDVI، حوضه زیلبرچای- آذربایجان شرقی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۰

1-MSc, Graduate of water resources Engineering and management, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

3- Postdoc researcher, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. Email: s.andaryani@gmail.com/andaryani@tabrizu.ac.ir

4- Expert in charge, Forests, Range and Watershed Management Organization (FRWO), Tabriz, East Azerbaijan, Iran.

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.19.0](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.19.0)

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۲- هیئت علمی دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

۳- پژوهشگر پس‌دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۴- کارشناس ارشد منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

در سالهای گذشته متغیرهای هیدرواقليمی اعم از دما، بارش و رواناب که بر روی تغییرات منابع آبهای زیرزمینی مؤثر هستند، تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته (Jehanzaib et al., 2020; Modi et al., 2021) و روند و پیچیدگی آنها نیز بر اساس آن تغییر پیدا کرده است (Su et al., 2021; Xue et al., 2021). در تحقیقات اخیر به دلیل اهمیت موضوع روند و کشف تغییرات پیچیدگی، تحقیقات زیادی صورت گرفته است. مفهوم آنتروپی برای اولین بار توسط (Shannon, 1948) در تحلیل الگوی رفتاری سیگنال‌ها ارائه گردید و در سال ۱۹۹۱ آنتروپی تقریبی<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری برای سنجش پیچیدگی در سیگنال‌ها توسط Pincus معرفی گردید. تفسیر پیچیدگی بر این اساس تعریف شد که کاهش پیچیدگی در متغیرهای مورد بررسی نشان‌دهنده کاهش بازدهی و مشارکت آن متغیرها در سلامت سیستم است (Pincus, 1991). (Shamsudduha et al., 2009) با بررسی روند داده‌های آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ۲۰ ساله با استفاده از روش‌های ناپارامتریک آب‌های زیرزمینی نتیجه گرفتند که منابع آب‌های زیرزمینی کاملاً تحت تأثیر تغییرات شهری و کاربری اراضی بوده و سطح ایستابی سالانه حدود ۱ متر کاهش پیدا می‌کند. (Vousoughi et al., 2013) و (Mack et al., 2013) با مطالعه سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش ناپارامتریک من-کندال در ایران و افغانستان به این نتیجه رسیدند که در سال‌های اخیر سطح آب زیرزمینی به شدت کاهش پیدا کرده است با وجود اینکه تأثیر تغییرات عوامل اقلیمی بر رفتار منابع آب زیرزمینی غیرقابل انکار است، در این دو پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. (Gibrilla et al., 2018) در کشور غنا با استفاده از روش من کندال و شیب سن<sup>۲</sup> به بررسی تأثیرات بارش و دما بر سطح ایستابی آب زیرزمینی پرداختند و نشان دادند که بارش و دما از روند معنی‌داری پیروی نمی‌کنند در حالی که روند سطح ایستابی آب زیرزمینی بصورت معنی‌دار افزایش یافته است. در پژوهش دیگر (Komasi and Shargi, 2019) با استفاده از تبدیل موجک و آنتروپی شانون در حوضه سیلاخور در استان لرستان و با استفاده از سه متغیر دبی، دما و بارش به بررسی روند تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کاهش نوسانات دبی خروجی از حوضه مؤثرترین عامل در کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی است و متغیرهای اقلیمی تأثیر بسزایی نداشته‌اند و عوامل انسانی نظیر سدسازی و کاربری اراضی را بدون بررسی تغییرات پوشش گیاهی منطقه، عامل مؤثر بر این کاهش معرفی نمودند. در حالی که الگوی توزیع گیاهی و پوشش سبز تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله دما، بارش و آب زیرزمینی است (Zhang et al., 2017). (Niu and Chen, 2016) پاسخ فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه به تنوع بارش را در ۱۰ زیرحوضه به منظور بررسی خشکسالی و سیلاب توسط تبدیل موجک پیوسته بررسی کردند و در بررسی‌های

نیاز روزافزون جوامع شهری و روستایی به منابع محدود آب‌های زیرزمینی و با توجه به رشد مصارف بخش‌های مختلف مانند شرب و بهداشت، کشاورزی و صنعتی از یک طرف و مسائل مربوط به تغییر اقلیم در چند سال اخیر از طرف دیگر، توجه و عنایت بیشتر به نگرش پیرامون تغییرات روند متغیرهای اقلیمی در مقیاس‌های زمانی مختلف را بیش از پیش نمایان می‌سازد (Wen et al., 2017; Khalaj et al., 2019). در این بین افت شدید سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی نیز بر توجه به این مهم می‌افزاید. عدم شناخت صحیح و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک خسارت جبران‌ناپذیری مانند افت شدید و غیرقابل برگشت سطح آب زیرزمینی، کاهش دبی چاه‌ها و قنوت، تغییرات الگوی جریان آب زیرزمینی، فرونشست (Yang et al., 2017; Andaryani et al., 2019a) و کاهش ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان‌ها و رودخانه‌ها را به دنبال خواهد داشت (Kustu et al., 2010; Yuan et al., 2008; Chen and Hu, 2004; Koster and Suarez, 2001). از آنجا که سطوح آب‌های زیرزمینی و سطحی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی و مصرفی خانوارها در سراسر جهان هستند و در چرخه هیدرولوژی نقش مهمی را در پایداری جریان‌ها، دریاچه‌ها و جوامع آبی برعهده دارند (Komasi and Sharghi, 2019) لذا اطلاع از تغییرات میزان آب قابل دسترس و آب ذخیره شده در این منابع جهت مدیریت منابع آبی منطقه بویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار ضروری است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک بارش سالانه کمتر از مقدار سالانه پتانسیل تبخیر است. همچنین تأمین آب برای گیاهان و محصولات کشاورزی از طریق آب‌های سطحی (مانند رودها و چشمه‌ها) معمولاً بسیار محدود است. به همین دلیل نقش آب زیرزمینی به عنوان منبع آب اصلی که بر توزیع زمانی و مکانی رطوبت خاک تأثیرگذار است، پررنگ‌تر می‌شود (Liu et al., 2017). در نتیجه در این نواحی سیستم‌های کشاورزی به شدت به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند و تغییرات در مساحت پوشش گیاهی و نوع آن باعث تغییرات در سطح آب زیرزمینی خواهد شد. طوری که بر اساس یافته‌های جدید (Ashraf et al., 2021) آب‌های زیرزمینی در کشور ایران 74 km<sup>3</sup> در بازه زمانی 2002-2015 کاهش یافته‌اند. این کاهش می‌تواند از عوامل اقلیمی یا عوامل انسانی و یا از هردوی این عوامل منتج گردد و در آینده نیز به دلیل تغییرات رخ داده در عوامل مذکور، کاهش در سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی بسیار بیشتر خواهد بود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه موسوم به حوضه آبریز زلیبیرچای با وسعتی معادل ۲۵۴۶ کیلومتر مربع در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان تبریز واقع شده است (شکل ۱). این حوضه بخشی از حوضه آبریز رودخانه ارس است که با روند شرقی- غربی از پیوستن رودخانه‌های زنوزچای و آجی‌چای تشکیل شده است و در شمال غرب حوضه و در نقطه خروجی به رودخانه قطورچای می‌پیوندد که بعد از آن به همین نام خوانده می‌شود. رودخانه قطورچای با روند جنوبی- شمالی به رودخانه ارس ملحق می‌شود. موقعیت مطلق حوضه مورد مطالعه در محدوده ۴۴°، ۴۵° تا ۴۵°، ۳۳°، ۴۵° طول شرقی و ۰۹°، ۱۸° تا ۳۸°، ۴۰°، ۳۸° عرض شمالی واقع گردیده است. ماکزیمم ارتفاع حوضه ۳۲۲۹/۷ متر بوده و حداقل ارتفاع در محل خروجی حوضه ۹۲۶/۴ متر از سطح دریا است.

واحد توپوگرافی حوضه عمدتاً شامل دشت و کوهستان است که در بعضی نقاط در محل اتصال این دو واحد ژئومورفولوژیکی واحد تپه‌ماهور قرار دارد. کشاورزی در این منطقه به‌ویژه در دشت مرند، مهم‌ترین بخش اقتصادی محسوب می‌شود و به دلیل خشک شدن رودخانه زلیبیرچای در ماه‌های آبیاری، منابع آب‌های زیرزمینی از لحاظ تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت در دهه‌های اخیر حائز اهمیت ویژه‌ای است. لذا به‌منظور مطالعه روند آب‌های زیرزمینی و تغییرات عوامل انسانی و طبیعی در تحقیق حاضر از داده‌های چاه‌های پیژومتری موجود در دشت مرند در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۷۵ (از تعداد ۶۳ چاه موجود در منطقه ۲۰ چاه مورد بررسی قرار گرفت و در انتخاب آن‌ها در درجه اول تکمیل بودن داده‌های برداشت‌شده و در درجه دوم توزیع نرمال آن‌ها در سطح دشت مدنظر قرار گرفت)، ایستگاه سینوپتیک خوی برای آزمون روند و پیچیدگی دما، ایستگاه‌های بارش چرچر و مظفرآباد و همچنین ایستگاه هیدرومتری مظفرآباد به‌صورت ماهانه و در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۶۴ استفاده گردید. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها و چاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

برای محاسبه درصد پوشش گیاهی (محصولات کشاورزی از جمله باغات، گندم آبی و محصولات تابستانه) از داده‌های لندست ۵ و ۸ در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۶۴ استفاده گردید. لازم به ذکر است که در سال ۱۳۹۲ داده سالمی با استفاده از ماهواره لندست برداشت نشده بود. همچنین، نقشه‌های استخراج شده با استفاده از تصاویر لندست در مقیاس پیکسل ۳۰ متری به دست آمده است.

صورت گرفته نتیجه گرفتند که بدون در نظر گرفتن مقیاس چندزمانه تناقض‌هایی در تحقیقات مشاهده می‌شود. (Costa et al., 2002) به این نتیجه رسیدند که میزان آنتروپی با افزایش درجه بی‌نظمی افزایش پیدا می‌کند و برای سیستم‌های تصادفی مقدار آنتروپی صعودی است؛ ولی افزایش آنتروپی، همیشه به معنی افزایش پیچیدگی دینامیکی نیست. برای رفع این مشکل آن‌ها روش آنتروپی چند مقیاسی<sup>۳</sup> (MSE) را ارائه کردند. (Li and Zhang (2008) از روش MSE برای کشف تغییرات پیچیدگی جریان رودخانه می‌سی‌سی‌پی استفاده نمودند و دلیل کاهش پیچیدگی جریان رود را تغییر در کاربری اراضی آن منطقه اعلام نمودند. با توجه به ناپایدار بودن سری زمانی فرایندهای هیدرولوژیکی و قابلیت تحلیل موجک در بحث‌های نایستایی فصلی این فرایندها، تبدیل موجک به‌طور گسترده در بین هیدرولوژیست‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Nourani et al., 2013; Partal and Kisi, 2007).

بدین ترتیب تحقیقات زیادی در زمینه بررسی عوامل مؤثر بر افت آب‌های زیرزمینی به ویژه عوامل اقلیمی در مناطق مختلف صورت گرفته است ولی در مورد عوامل انسانی اکثراً از کاربری اراضی آن‌هم به‌صورت دو یا سه بازه زمانی استفاده شده است و به‌صورت سری زمانی بررسی جامعی صورت نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر حوضه زلیبیرچای واقع در آذربایجان شرقی به عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک که با افت شدید و کاهش نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی مواجه شده است (Andaryani et al., 2019a) به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید و برای نشان دادن عوامل مؤثر بر این کاهش، روند تغییرات عوامل انسانی (پوشش گیاهی به‌صورت سری زمانی ۳۰ ساله) و اقلیمی با استفاده از روش آماری من- کندال<sup>۴</sup> مورد آزمون قرار گرفت (Zhang et al., 2019). از طرف دیگر معیار پیچیدگی<sup>۵</sup> برای نشان دادن تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی منابع مذکور به منظور مدیریت صحیح آن‌ها در نظر گرفته شد (Nourani et al., 2014). تغییر مقدار این معیار در مقیاس‌های زمانی مختلف که نشانگر تغییرات هیدرواقلمی رخ داده در منطقه است با روش موجک- آنتروپی<sup>۶</sup> سنجیده شد. بررسی سری زمانی داده‌های هیدرواقلمی در کنار داده‌های پوشش گیاهی و تأثیرات متقابل آنها در تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی می‌تواند زوایه دید جدیدی نسبت مسأله موجود (کاهش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی) ارائه دهد که در مرور ادبیات به آن پرداخته نشده است و به بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک کمک شایانی کند.

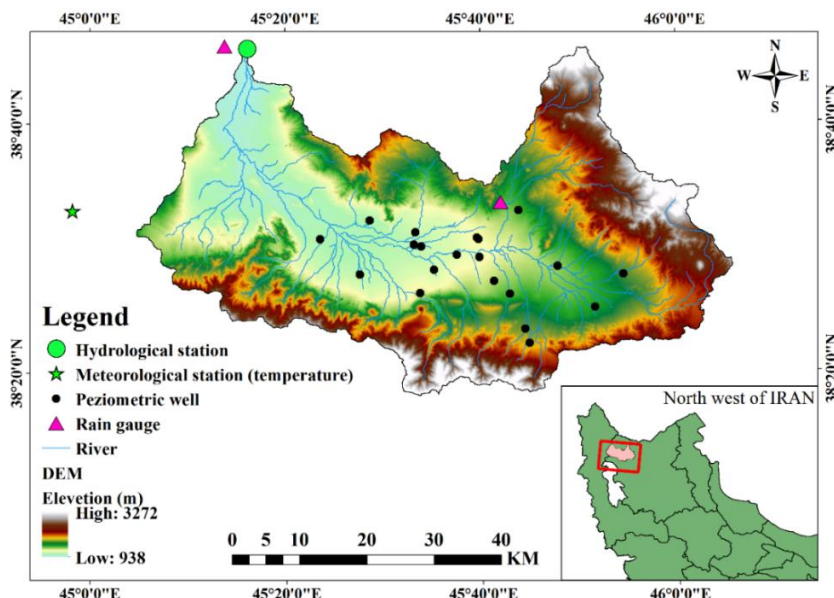


Fig. 1- Location of the case study and stations used in this study  
 شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

در (Schultz et al., 2016) و براساس بازتابش باندهای ماهواره‌ای در محدوده طیفی قرمز (RED) و مادون قرمز (NIR) محاسبه می‌شود (Zhang et al., 2020):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

شاخص NDVI یک پارامتر بدون کمیت است و بین اعداد -۱ و ۱ نوسان می‌کند. اگرچه مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۴ به‌عنوان آستانه تمایز بین پوشش گیاهی و اراضی دیگر مانند چمن‌زارها، خاک، آب و غیره (Khazaei and Wu, 2018) در نظر گرفته می‌شود؛ اما ممکن است این مقدار آستانه برای این موضوع مناسب نباشد و گیاهان مختلف را در جاهای مختلف به‌اشتباه نشان دهد. برای مثال در حوضه زلیبیرچای گندم آبیاری شده در ماه اردیبهشت در سبزترین حالت ممکن هستند و در خرداد برداشت می‌شوند. از طرف دیگر ممکن است در ماه‌های اردیبهشت و خرداد مرتع‌های پرپشت به دلیل سرسبزی بیش از حد به‌عنوان باغ در تصاویر شناسایی شوند. در نتیجه در مطالعه حاضر برای رفع این مشکل از ترکیب تصاویر ماه‌های مختلف به منظور تشخیص پوشش گیاهی استفاده شد. همچنین ارتفاع و شیب به‌عنوان لایه‌های محدودکننده به صورت زیر استفاده شد:

گندم آبیاری شده  $NDVI =$  اردیبهشت ماه بزرگ‌تر از ۰/۳ به جز در مناطقی که ارتفاعی بالاتر از ۱۵۰۰ متر و شیب بیشتر از ۲۰ درصد دارند. همچنین مقدار میانگین  $NDVI$  بزرگ‌تر از ۰/۴ در ماه‌های تیر و مرداد جهت تشخیص محصولات کشاورزی آبیاری شده و باغ‌ها از چمن‌زارهای پرپشت در زمانی که این نواحی در کمترین سرسبزی خود قرار دارند.

در تحلیل روند سطح ایستایی چاه‌ها از آزمون من کندال بعد از حذف اثر خودهمبستگی استفاده گردید. سپس  $Z$  متغیرهای دما، بارش و دبی به‌صورت ماهانه و سالانه مورد آزمون روند قرار گرفت و بعد تک‌تک ایستگاه‌ها در سه بازه زمانی ده ساله به ترتیب ۱۳۷۳-۱۳۶۴، ۱۳۸۳-۱۳۷۴ و ۱۳۹۳-۱۳۸۴ تقسیم‌بندی شده و تبدیل موجک در ۵ رتبه برای آن‌ها زده شد. سپس برای جزئیات به‌دست‌آمده از تبدیل موجک به‌صورت مجزا برای هر کدام از زیرسری‌ها آنترپوی محاسبه گردید. شکل ۲ داده‌های متغیرها را به‌صورت ماهانه نشان می‌دهد. سری زمانی ماهانه آب زیرزمینی از میانگین ماهانه کلیه چاه‌های مورد مطالعه (۲۰ حلقه) به دست آمده است.

در مطالعه حاضر برای بررسی روند داده‌ها در مقیاس سالانه و ماهانه از روش‌های ناپارامتری من کندال استفاده گردید. البته قبل از اعمال روش من-کندال از عدم خودهمبستگی داده‌ها با استفاده از زمان تأخیر ۷ اطمینان حاصل شده است؛ زیرا همبستگی در متغیرهای هیدرولوژیکی باعث کاهش دقت روش من-کندال در تعیین روند متغیر مورد مطالعه می‌شود (Bagherpoor et al., 2017).

## ۲-۲- شاخص پوشش گیاهی برای محاسبه پوشش گیاهی

سنجش شاخص پوشش گیاهی یا پوشش سبز<sup>۱</sup> ( $NDVI$ ) یکی از عوامل پراهمیت در بررسی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این مطالعه داده‌های اپتیکی ماهواره لندست بین سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۹۳ مورد استفاده قرار گرفت (برای سال ۲۰۱۲ داده‌های مناسبی وجود نداشت). این شاخص، بسیار مناسب و مفید بوده (Gandhi et al., 2015);

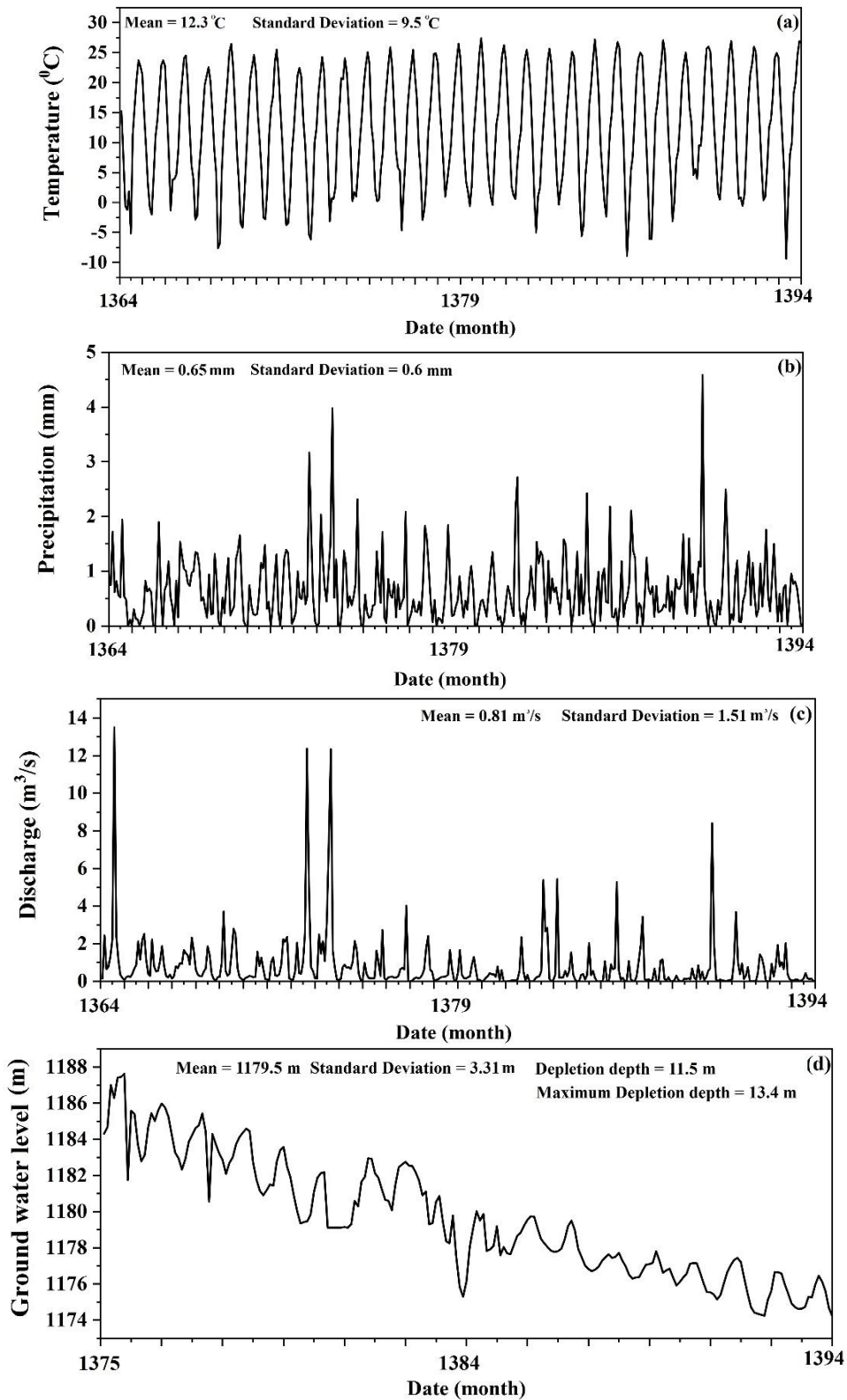


Fig. 2- Time series of hydroclimatical variables and mean ground water level at monthly scale

شکل ۲- سری زمانی ماهانه متغیرهای هیدرواقليمی و میانگین سطح ایستابی چاه‌ها

## ۳-۲- آزمون من- کندال

می‌باشد. اگر تعداد داده‌های یک سری بیش از ۱۰ عدد باشد،  $s$  از توزیع نرمال پیروی خواهد کرد و مقدار معیار آماری استاندارد ( $Z_s$ ) به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

بنابراین در یک آزمون دو دامنه برای تشخیص روند در سطح اعتماد  $\alpha$ ، فرض صفر که دال بر نبود روند در سری مشاهدات است؛ رد خواهد شد اگر مقدار  $Z_s$  بزرگ‌تر یا مساوی  $Z$  جدول باشد:

$$|Z| > Z_{\alpha/2} \quad (7)$$

آماره  $Z_\alpha$  توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌دار  $\alpha$  می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون از  $\alpha/2$  استفاده می‌شود.

مقدار مثبت  $Z_s$  بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی می‌باشد و چنانچه مقدار آن در خارج از محدوده  $\pm 1/96$  در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد و  $\pm 2/58$  در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد قرار گرفته باشد؛ داده‌ها دارای روند معنی‌دار می‌باشند و در غیر این صورت فاقد روند ارزیابی می‌شود.

## ۴-۲- روش موجک- آنتروپی

تبدیل موجک یکی از تبدیل‌های کارآمد ریاضی در زمینه پردازش سیگنال می‌باشد. تبدیل‌های ریاضی برای به دست آوردن اطلاعات اضافی از سیگنال که از خود سیگنال قابل دستیابی نیستند، استفاده می‌شوند. برای پردازش سیگنال، شمار زیادی از تبدیلات ریاضی می‌تواند مورد استفاده باشد، که در میان آن‌ها تبدیل موجک مشهورترین به‌شمار می‌آید. بسیاری از سیگنال‌های مورد مطالعه در شاخه‌های متفاوت علمی، سیگنال‌های زمان قلمرو هستند، بدین معنی که آنچه سیگنال نشان می‌دهد، تابعی از زمان می‌باشد. به بیان دیگر وقتی یک سیگنالی رسم می‌شود یک محور با زمان و محور دیگر با شدت مشخص می‌شود که این نمودار زمان- شدت سیگنال را مشخص می‌کند. در این حالت می‌توان مشخصات پنهان سیگنال‌ها را در قالب فرکانس‌های موجود، به‌صورت داده‌های معرف سیگنال نمایش داد. همان‌گونه که مشخص است فرکانس چیزی است که با آن نرخ و یا مقداری تغییر می‌کند. اگر تغییرات شدید و سریع باشد، فرکانس بالا بوده و اگر تغییرات کند باشد فرکانس کوتاه یا کم می‌باشد. اگر تغییراتی در طول زمان نباشد، فرکانس صفر خواهد بود. برای آنالیز سیگنال‌ها تبدیل‌کننده‌های ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا اطلاعاتی که به‌سادگی قابل دسترسی از سیگنال خام نیست، به

آزمون من کندال در تحلیل سری‌های زمانی کاربرد گسترده‌ای دارد و از آزمون همبستگی رتبه‌ای دو گروه مشاهده‌ای استفاده می‌کند. آزمون همبستگی رتبه‌ای برای اولین بار در سال ۱۹۵۵ توسط کندال بکار گرفته شد (Hamed and Rao, 1998). سپس بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. البته ارائه اولیه آن توسط "من" در سال ۱۹۴۷ بوده است. این روش از طرف سازمان جهانی آب و هواشناسی به‌عنوان یک روش استاندارد برای تشخیص وجود روند در داده‌های خود همبسته اعلام شده است (Bi et al., 2009). لازم به ذکر است که روش مذکور دارای مزیت‌هایی از جمله عدم حساسیت به داده‌های مفقود شده و عدم نیاز داده‌ها به توزیع خاص آماری است. برای بررسی روند تغییرات انسانی و اقلیمی، داده‌های مشاهداتی هیدرواقلمی شامل سطح آب‌های زیرزمینی، دبی، بارش و دما و همچنین پوشش گیاهی با تأکید بر محصولات کشاورزی مورد آزمون روند قرار گرفت. داده‌های مورد نیاز در مورد میزان سطح زیر کشت محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از عوامل انسانی مؤثر بر کاهش منابع آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۳۰ سال با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استخراج و مورد تحلیل روند قرار گرفت. مراحل انجام این آزمون با استفاده از روابط ۱-۷ محاسبه گردید (Li et al., 2009):

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $n$  تعداد داده مشاهده‌ای (طول دوره آماری)  $x_i$  و  $x_j$  به ترتیب  $i$  امین و  $j$  امین داده مشاهداتی می‌باشد.

تابع علامت نیز به شرح زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i > x_j \\ 0 & \text{if } x_i = x_j \\ -1 & \text{if } x_i < x_j \end{cases} \quad (2)$$

برای متغیرهای تصادفی مستقل و دارای توزیع یکنواخت و بدون گره (دو یا چندین داده با مقادیر عددی مساوی) میانگین و واریانس پارامتر من-کندال ( $s$ ) به‌صورت زیر است:

$$E(s) = 0 \quad (3)$$

$$\text{VAR}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

که در آن،  $n$  تعداد داده‌های سری مشاهدات است. اگر در سری مشاهدات داده‌های تکراری وجود داشته باشد، مقدار واریانس از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

(5)

$$\text{VAR}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_m(t_m-1)(2t_m+5)}{18}$$

به‌طوری  $m$  که معرف تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد.  $t$  نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان

عبارتی درجه تجزیه یک سری بایستی تعداد الگوهای تناوب موجود و یا محتمل در سری زمانی را ملاک انتخاب قرارداد. برای انتخاب مرتبه تجزیه سری زمانی از رابطه ارائه شده توسط Nalley et al. (2012) استفاده شد که برای زیر سری‌های زمانی ماهانه مناسب می‌باشد و بر همین اساس مرتبه ۵ برای این پژوهش انتخاب شد.

انرژی موجک که آن را با  $E$  نشان می‌دهند، برای هرکدام از زیرسری‌های زمانی به صورت جداگانه طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$E_m = |W_m(t)|^2 \quad (15)$$

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. Shannon (1948) آنتروپی 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. 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 به صورت رابطه ۱۶ بیان می‌گردد:

$$H(X) = H(P) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log[p(x_i)] \quad (16)$$

$H(X)$  آنتروپی  $X$  است که تابع آنتروپی شانون نامیده می‌شود و  $P$  توزیع احتمال است که به این صورت قابل تعریف است  $P = \{p_i, i = 1, 2, \dots, N\}$

با ترکیب مفاهیم موجک و آنتروپی، ابزار جدیدی به نام موجک-آنتروپی برای محاسبه پیچیدگی به دست می‌آید (Nourani et al., 2014). با استفاده از این روش می‌توان سیگنال اصلی را در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی کرد. 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 رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$E_m = \|r_m^2\| = \sum_n |C_m|^2 \quad (17)$$

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 ۱۸ محاسبه و سپس برای محاسبه انرژی موجک نسبی با رابطه ۱۹ نرمال می‌گردد:

دست آید (Hou et al., 2000). تابع موجک انواع مختلفی دارد که در پژوهش حاضر از موجک مادر db.2<sup>۹</sup> استفاده گردید. اگر  $\Psi(x)$  جهت مشخص کردن موجک مادر استفاده گردد، آنگاه تبدیل موجک پیوسته توسط رابطه ۸ مشخص می‌شود:

$$W(a, b) = \int f(t) \times (1/a) \times \Psi(t - b/a) dt \quad (8)$$

پارامتر  $a$  به عنوان مقیاس در نظر گرفته می‌شود و میزان کشش یا مدت زمان موجک را بیان می‌کند (Addison et al., 2001). 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 سری‌های زمانی گسسته مورد نظر می‌باشند، برای تجزیه سری زمانی می‌توان از فرم گسسته تبدیل موجک<sup>۱۰</sup> (DWT) استفاده کرد. ضرایب موجک در هر نقطه از سیگنال ( $b$ ) و برای هر مقدار از مقیاس ( $a$ ) با رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left[\frac{x-b}{a}\right] \quad (9)$$

در DWT پارامترهای انتقال و مقیاس به صورت گسسته و با بهره‌گیری از روند باینری<sup>۱۱</sup> رابطه (۱۰) انتخاب می‌شوند:

$$a = 2^m, b = 2^{m_n} \quad (10)$$

$m$  و  $n$  اعداد صحیح بوده و با جایگذاری  $a$  و  $b$  در رابطه ۱۱ سری زمانی گسسته  $x_i$  تبدیل باینری موجک به صورت رابطه ۱۲ بیان می‌شود:

$$\Psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \Psi[2^{-m} x - n] \quad (11)$$

$$T_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} \Psi(2^{-m} i - n) x_i \quad (12)$$

که در رابطه ۱۲،  $N$  طول سری زمانی و  $T_{m,n}$  ضریب موجک برای  $a$  و  $b$  منتخب است و معکوس و خلاصه‌شده آن به صورت رابطه ۱۳ و ۱۴ بیان می‌گردد (Nourani et al., 2014):

$$x_i = \bar{T}(t) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{M-m-1} T_{(m,n)} 2^{-m/2} g(2^{-m} - n) \quad (13)$$

$$x_i = \bar{T}(t) + \sum_{n=1}^M W_m(t) \quad (14)$$

که در روابط  $M$  طوری انتخاب شده که  $N = 2^M$  باشد و  $\bar{T}$  زیر سری تخمین<sup>۱۲</sup> از مرتبه  $M$  و  $W_m$  زیرسری زمانی جزئی<sup>۱۳</sup> از مراتب  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  هستند. به عبارتی 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

ایستگاه‌های مظفرآباد و چرچر، دبی برای ایستگاه مظفرآباد و همچنین متغیر دما برای ایستگاه خوی از لحاظ وجود روند به‌صورت ماهانه و سالانه مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۴ نشان‌دهنده روند معنی‌داری کاهشی دبی در ایستگاه مظفرآباد (شکل ۴-a و ۴-d) در مقیاس سالانه و همچنین در اکثر ماه‌ها می‌باشد. در مقابل آن در متغیر دما روند معنی‌داری افزایشی در دو سطح ۹۵ و ۹۹ درصد در مقیاس سالانه و به غیر از ماه‌های اردیبهشت، آذر و بهمن در دیگر ماه‌ها روند معنی‌داری در مقیاس ماهانه مشاهده می‌گردد (شکل ۴-b). اما برای متغیر بارش در هر دو ایستگاه، روند معنی‌داری خاصی چه به‌صورت مقیاس سالانه و چه به‌صورت مقیاس ماهانه (به غیر از ماه‌های فروردین و مهر که به‌صورت روند کاهشی هست) مشاهده نمی‌شود (شکل ۴-c). همچنین روند سالانه متغیرهای مورد مطالعه نشان‌دهنده روند معنی‌دار افزایشی و کاهشی به ترتیب برای دما در ایستگاه خوی و برای دبی در ایستگاه مظفرآباد است. پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه با توجه به نتایج (شکل ۴-d) روند معناداری را تجربه نکرده است. این نتیجه بدین معنی است که در طولانی مدت مساحت سطح پوشش گیاهی افزایش زیاد محسوسی را نخواهد داشت ولی با توجه به افزایش روند معنی‌دار دما و کاهش رواناب در منطقه، تأمین منابع لازم برای آبیاری در منطقه به دوش آب زیرزمینی خواهد بود که با روند کاهشی اکثر چاه‌ها، در چند سال آینده کاهش شدیدتری در این منابع رخ خواهد داد و به دنبال آن شرایط بحرانی را منطقه تجربه خواهد کرد.

$$E_{tot} = \sum_m \sum_n |C_m(n)|^2 = \sum_m E_m \quad (18)$$

$$p_m, q_m = \frac{E_m}{E_{tot}} \quad (19)$$

با استفاده از آنتروپی شانون (رابطه ۲۰) معیار موردنظر با عنوان معیار موجک-آنتروپی،  $S_{WT}$  برای محاسبه پیچیدگی محاسبه می‌گردد (Rosso et al., 2001):

$$WE = S_{WT}(p) = - \sum_{m < 0} p_m \cdot \ln[p_m] \quad (20)$$

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

آزمون ناپارامتری من-کندال بر روی داده‌های سطح ایستابی ۲۰ حلقه چاه، بارش، دما و دبی در حوضه مطالعاتی انجام شد. داده‌های مربوط به سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری در ۲۰ چاه که به‌صورت سالانه مورد آزمون من-کندال قرار گرفت و برای تک‌تک چاه‌ها وجود روند بررسی گردید. از این تعداد، ۱۴ چاه دارای روند معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد می‌باشد که در شکل ۳ ارائه شده است. فرضیه اولی که برای توجیه چنین روند معنی‌داری مطرح می‌شود عوامل طبیعی از جمله تغییرات دما و بارش و در نتیجه آن تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد و فرضیه دوم نیز مربوط به عوامل انسانی نظیر تغییرات مساحت و نوع پوشش گیاهی و فعالیت انسانی مانند سدسازی در سطح منطقه می‌باشد که باعث افزایش برداشت و کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. لذا ابتدا متغیرهای بارش برای

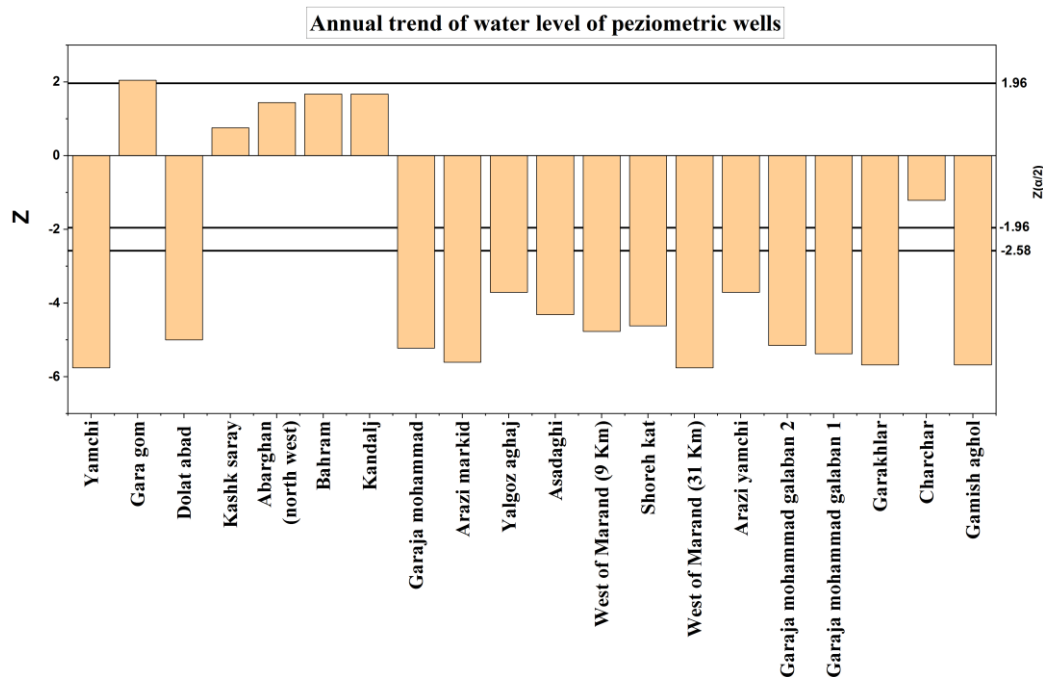


Fig. 3- Annual trend in groundwater table  
شکل ۳- روند سالانه سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری



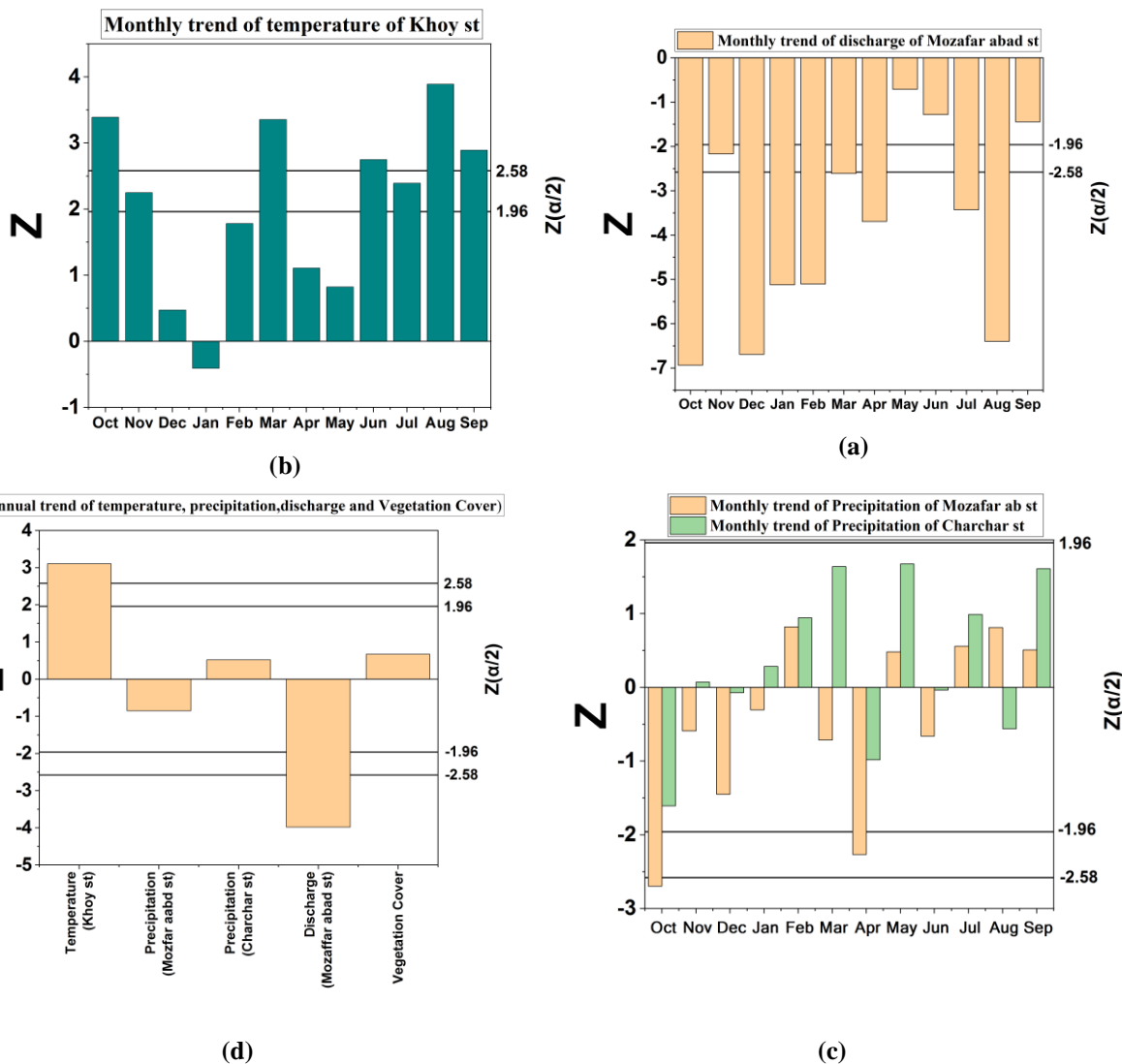


Fig. 4- Annual and monthly trends of variables using Mann-Kendall  
 شکل ۴- نمودار روند متغیرهای به صورت ماهانه و سالانه با استفاده از روش من کندال

مورد استفاده تجزیه گردیدند. با استفاده از ضرایب جزئی، انرژی موجک در هر کدام از مرتبه‌های ۱ تا ۵ محاسبه سپس با استفاده از انرژی‌های نرمال شده زیرسری تخمین، معیار موجک- آنتروپی برای هر زیرسری محاسبه گردید. انرژی زیرسری‌های جزئی حاصل از تجزیه سری زمانی اصلی در مرتبه ۱ تا ۵ و مجموع آن‌ها، همچنین معیار موجک- آنتروپی و تغییرات آن برای هر متغیر در جدول ۱ تا ۴ آورده شده است.

جدول ۱ نشان دهنده انرژی موجک- آنتروپی متغیر سطح آب زیرزمینی می‌باشد. بر اساس شکل ۲ سری زمانی ماهانه سطح آب زیرزمینی طی ۱۸ سال (۱۳۷۵-۱۳۹۳) بیش از ۱۳ متر کاهش داشته است.

برای آنالیز سیگنال‌ها اعم از سیگنال بارش، دما و دبی با استفاده از تبدیل موجک از داده‌های ماهانه آن‌ها استفاده گردید (شکل ۲). داده‌ها به سه سری زمانی T1 از ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۳، T2 از ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۴، T3 از ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ و ۵ مقیاس زمانی تقسیم‌بندی شده و با استفاده از موجک مادر db2 تجزیه شدند. آنالیز داده‌های آب زیرزمینی نیز با توجه به محدودیت زمانی آنها (۱۸ ساله) به دو بازه زمانی T2 از ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۳، T3 از ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ تقسیم‌بندی شدند.

تشابه فرم تابع موجک مادر با شکل سری‌های زمانی، مهم‌ترین راهنما جهت انتخاب مناسب‌ترین تابع موجک مادر است (Abbate et al., 1994; Nourani et al., 2011). لذا در این تحقیق از موجک مادر db2 استفاده گردید و تا مرتبه ۵ تمام داده‌های زیرسری‌ها در متغیرهای

**Table 1- Energy of groundwater level subsets and wavelet entropy**  
**جدول ۱- انرژی زیر سری های سطح ایستابی آب زیرزمینی و موجک آنتروپی**

Period	T2	T3
E1	0.049	0.016
E2	0.086	0.130
E3	0.134	0.329
E4	0.107	0.101
E5	0.036	0.133
ΣE	0.405	0.709
WE	1.524	1.345
Variations (%)		-13.2

\*T2 = 1375-1383, T3 = 1384-1393

میانگین سالانه داده‌های سطح ایستابی چاه‌ها نشان‌دهنده کاهش تدریجی سطح آب آن‌ها است و همچنین کاهش سطح نوسانات از سال ۱۳۷۵ می‌باشد. این در حالی است که مجموع انرژی و پیچیدگی در سه بازه زمانی تغییرات محسوس‌تری نداشته است و نمی‌توان کاهش سطح ایستابی چاه‌ها را ناشی از بی‌نظمی دمایی ایجاد شده دانست. اما بایستی ذکر شود که افزایش معنی‌داری دما به صورت خطی رخ داده است و میانگین دما در بازه زمانی مورد بررسی ۳۰ ساله ۱/۷۷ درجه افزایش داشته و به صورت غیرمستقیم با افزایش پتانسیل تبخیر- ترقق در منطقه باعث بیشتر آب چاه‌ها جهت آبیاری محصولات کشاورزی شده است.

میانگین بارش برای دو ایستگاه چرچر و مظفرآباد در سه بازه زمانی ده ساله مورد استفاده دارای متوسط سالانه به ترتیب ۲۶۲، ۲۲۰ و ۲۴۰ میلی‌متر بوده است. کاهش میزان بارش همراه با کاهش نوسانات در این متغیر بوده و در طی ۳ دوره با کاهش بیش از ۲۰ درصدی همراه بوده که می‌توان گفت تأثیر زیادی بر کاهش سطح نوسانات سطح آب زیرزمینی داشته است.

جدول ۴ موجک- آنتروپی محاسبه شده برای متغیرهای دبی ماهانه در ایستگاه مظفرآباد می‌باشد که میانگین سه دهه به ترتیب ۱/۲۹، ۰/۵۸ و ۰/۵۴ مترمکعب در ثانیه برای ایستگاه مظفرآباد ثبت شده است.

همچنین با استفاده از موجک- آنتروپی که در جدول ۱ به دست آمده است میزان نوسانات نیز کاهش قابل توجه داشته است که دوره زمانی سوم (۱۳۹۳-۱۳۸۴) حدود ۱۳ درصد نسبت به دوره دوم (۱۳۸۳-۱۳۷۵) کاهش داشته است. کاهش نوسانات در یک پدیده ناشی از اثرات فعالیت‌های انسانی و یا تغییر اقلیم می‌باشد و نشان از بیمار شدن سیستم دارد که می‌تواند در آینده باعث خشک شدن بیشتر چاه‌های موجود در منطقه باشد. 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 آب‌وهوای یک منطقه است (Nourani et al., 2014). برای درک بیشتر از تأثیرات هیدرو اقلیمی و همچنین پوشش گیاهی بر روی این کاهش نوسانات سیستم سطح آب زیرزمینی بررسی شد و نتایج به صورت جداول ۲ تا ۴ و شکل ۶ آورده شده است.

تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های محیطی است که جهان امروز بیشتر به واسطه افزایش دما، از آن متأثر شده و در نتیجه آن الگوهای آب و هوایی در اکثر نقاط آن تغییر کرده است. جدول ۲ نشان‌دهنده انرژی موجک- آنتروپی متغیر دما می‌باشد. در سه بازه زمانی مورد مطالعه میانگین دمایی ایستگاه خوی طبق داده‌های سازمان هواشناسی به ترتیب ۱۱/۳۱، ۱۲/۷۳ و ۱۳/۰۸ درجه سلسیوس می‌باشد. بررسی

**Table 2- Energy of temperature subsets and wavelet entropy**  
**جدول ۲- انرژی زیر سری های دما و موجک آنتروپی**

Period	T1	T2	T3
E1	0.089	0.066	0.058
E2	0.403	0.474	0.501
E3	1.412	1.372	1.234
E4	0.429	0.445	0.452
E5	0.320	0.356	0.342
ΣE	2.654	2.715	2.589
WE	1.285	1.303	1.328
Variations (%)		1.38	1.88

\*T1 = 1364-1373, T2 = 1374-1384, T3 = 1384-1393

**Table 3- Energy of precipitation subsets and wavelet entropy**

جدول ۳- انرژی زیر سری های بارش و موجک آنتروپی

Period	T1	T2	T3
E1	0.187	0.324	0.169
E2	0.392	0.556	0.317
E3	0.165	0.297	0.054
E4	0.063	0.033	0.018
E5	0.143	0.081	0.039
ΣE	0.952	1.293	0.599
WE	1.455	1.316	1.198
Variations (%)		-10.5	-9.9

\*T1 = 1364-1373, T2 = 1374-1384, T3 = 1384-1393

**Table 4- Energy of discharge subsets and wavelet entropy**

جدول ۴- انرژی زیر سری های دبی و موجک آنتروپی

Period	T1	T2	T3
E1	0.185	0.263	0.115
E2	0.397	0.354	0.241
E3	0.154	0.148	0.078
E4	0.053	0.075	0.020
E5	0.112	0.106	0.018
ΣE	0.902	0.948	0.472
WE	1.415	1.461	1.244
Variations (%)		3.14	-17.36

\*T1 = 1364-1373, T2 = 1374-1384, T3 = 1384-1393

هر دو متغیر بارش و دبی در این کاهش پیچیدگی مؤثر بوده‌اند. کاهش سطح نوسانات در بارش را می‌توان از تغییر اقلیم پیش‌آمده در منطقه دانست و برای متغیر دبی نیز علاوه بر تغییر اقلیم عواملی همچون سدسازی (سد نوز و سد بناب)، آبیاری محصولات کشاورزی، تغییر الگوی کشت و افزایش صنایع تولیدی در پی افزایش جمعیت دانست.

در مجموع با توجه به جداول ۱ تا ۴ درصد تغییرات و پیچیدگی موجود برای متغیرهای اقلیمی در حوضه رودخانه زلیبیرچای برای دما کم و برای بارش زیاد بوده که نشان‌دهنده مؤثر بودن تغییر اقلیم بر روی بارش است. در کنار متغیرهای هیدرواقلمی، تغییرات پوشش گیاهی در طول دوره می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از چگونگی تأثیر این متغیر بر روی سطح ایستایی آب زیرزمینی ارائه بدهد. پوشش گیاهی موجود در منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمد و در شکل ۶ به صورت سری زمانی نشان داده شده است. یکی از مشکلات موجود در محاسبه مساحت پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه دقت پایین شاخص NDVI در محاسبه مساحت گندم آبیاری شده بود در این مطالعه برای جداسازی محصولات کشاورزی و باغات از دیگر کاربریها و تعیین دامنه عددی این کاربری بصورت تصادفی ۵۰ نمونه از طریق سامانه گوگل ارث از محصولات کشاورزی و باغی برداشت شد و با شاخص NDVI مطابقت گردید.

پیچیدگی در متغیر دبی در دهه دوم افزایش جزئی را تجربه کرده است ولی در دهه سوم کاهش قابل توجهی را ثبت کرده است که همراه با کاهش نوسانات بارش است و بر روی کاهش نوسانات سطح آب زیرزمینی قطعاً مؤثر بوده است. یکی دیگر از کاربردهای مهم محاسبه انرژی زیرسری‌های ضرایب جزئی علاوه بر محاسبه پیچیدگی، یافتن دوره زمانی مناسب برای بررسی تغییرات متغیر مورد نظر است زیرا به آن وابسته‌تر است (Nourani et al., 2014) و در تحقیقات آتی می‌توان از نتایج حاصل از این بررسی استفاده کرد. در این مطالعه برای متغیرهای آب زیرزمینی، دما، بارش و دبی به ترتیب ۸، ۸، ۴ و ۴ ماهه بیشترین انرژی را داشتند (جدول‌های ۱-۴).

شکل ۵ مقدار تغییرات پیچیدگی محاسبه شده در سه دوره مطالعاتی را در کنار هم نشان می‌دهد. هدف از مطالعه پیچیدگی عوامل هیدرواقلمی، یافتن این نتیجه است که کدام یک از عوامل انسانی یا اقلیمی بر کاهش سطح آب زیرزمینی تأثیرگذاری بیشتری داشته است. زیرا هرچه یک سیستم سالم‌تر باشد و روند طبیعی خود را دنبال کند پیچیدگی آن در طول زمان به صورت افزایشی خواهد بود و هرچه سیستم تحت تأثیر عوامل مخرب باشد، پیچیدگی آن کاهش می‌یابد. طبق شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که کاهش نوسانات در دهه دوم در سطح آب زیرزمینی ناشی از کاهش پیچیدگی در متغیر بارش بوده؛ زیرا نوسانات دبی افزایش مقدار را تجربه کرده است. اما در دهه سوم

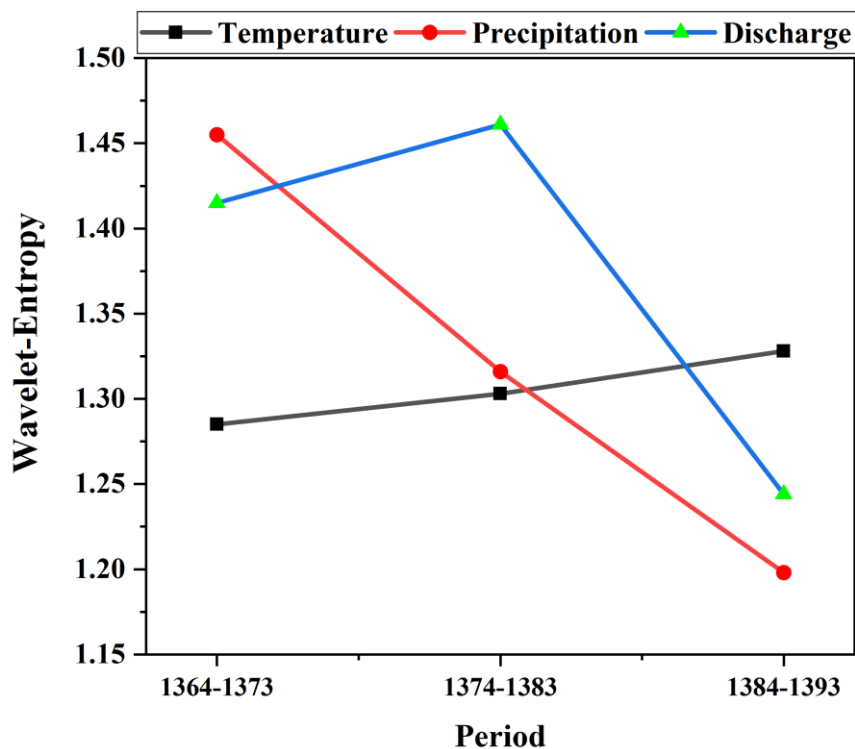


Fig. 5- Wavelet-entropy calculated for hydroclimatological variables

شکل ۵- موجک-آنتروپی محاسبه شده برای متغیرهای هیدرواقليمی

به حالت خنثی درآمد است (برای دما  $0/18$  و بارش  $0/05$ ). همچنین رابطه بین متغیر دبی و پوشش گیاهی از  $0/57$  به  $0/14$  - کاهش پیدا کرده است که همه این مقادیر نشان دهنده کاهش وابستگی پوشش گیاهی به این متغیرها و افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی است. پوشش گیاهی مورد نظر در این مطالعه از این جهت که یک عامل انسانی بوده و خود از تغییرات عوامل طبیعی متأثر است، پیچیدگی بر آن اعمال نشد؛ زیرا پیچیدگی برای بررسی سلامت سیستم‌های طبیعی بوده و سری زمانی آن اطلاعات کامل تری را ارائه می‌دهد.

از نظر مقادیر سالانه، تغییرات پوشش گیاهی حاکی از افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی است و این اتفاق با افزایش مقدار دما و کاهش نسبی بارش در منطقه باعث فشار مضاعف بر منابع آب زیرزمینی جهت آبیاری مزارع کشاورزی است. با بررسی همبستگی بین داده‌های هواشناسی و هیدرومتری، متغیر دما در دهه اول دارای رابطه کاملاً معکوس با مساحت پوشش گیاهی می‌باشد ( $-0/77$ ) این در حالی است که متغیر بارش رابطه‌ای همسو با پوشش گیاهی داشته است ( $0/63$ ). اما با گذشت دو دهه این همبستگی کاملاً از بین رفته و

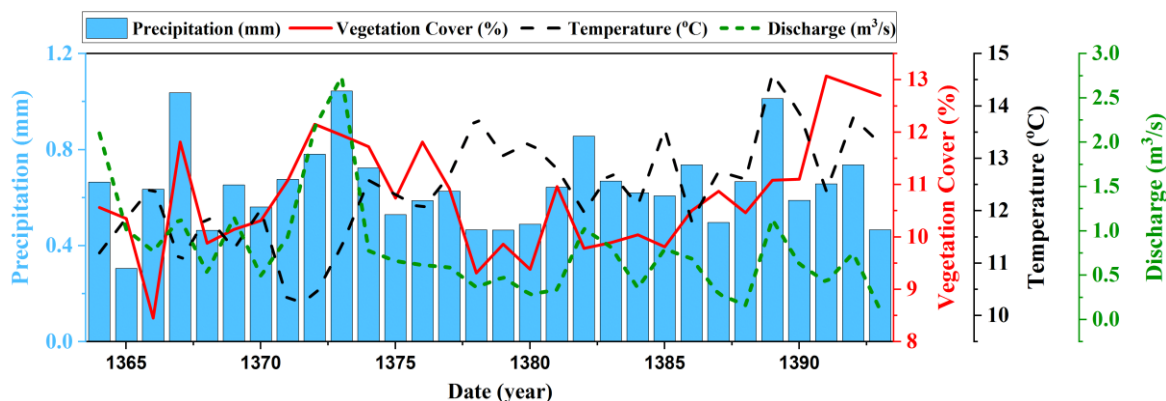


Fig. 6- Annual values of Vegetation Cover (irrigated crops and orchards) and hydroclimatological variables

شکل ۶- مقادیر سالانه پوشش گیاهی و متغیرهای هیدرواقليمی

چنانچه در بررسی مطالعه حاضر بررسی متغیر بارش با روش من کندال نشان‌دهنده عدم وجود روند معنی‌داری است ولی متغیر دما دارای روند معنی‌داری افزایشی بوده است که این مسأله می‌تواند دلیلی بر تغییر اقلیمی باشد که جهان امروزی از آن متأثر گردیده است. تقسیم‌بندی متغیرها در سه بازه زمانی ۱۰ ساله و بررسی موجک آنتروپی آن‌ها باعث ایجاد دید بهتر در بررسی متغیرها از نظر متأثر شدن هر کدام از آن‌ها از تغییر اقلیمی و همچنین تأثیر بر روی هم دیگر می‌شود. Liu et al. (2017) با بررسی پیچیدگی سری زمانی بارش ۱۴ ایستگاه و چاه‌های مربوطه به این نتیجه رسیدند که تولید محصولات کشاورزی عامل اصلی در تغییرات سطح ایستابی چاه‌های منطقه بوده و فقط ۳ حلقه چاه می‌تواند متأثر از تغییرات بارش منطقه باشد. اما در مطالعه حاضر، مقادیر متغیرهای دما در ۳ دهه اخیر با تغییرات ناچیزی از نظر پیچیدگی مواجه شده‌اند و بی‌نظمی در این متغیر مقدار کمی هم افزایش داشته و بر این اساس نمی‌توان کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و دبی را متأثر از آن دانست. ولی باید در نظر گرفت که دما به عنوان یک متغیر زیاد دچار نوسان نشده و در طول بازه‌های مورد مطالعه بصورت تدریجی و با یک شیب خاصی افزایش داشته است. در نتیجه پیچیدگی در متغیر دما نمی‌تواند چندان کمکی به درک تأثیرات این متغیر بر کاهش آب‌های زیرزمینی کند. ولی متغیر بارش با کاهش حدود ۲۰ درصدی در نوسانات نشان از تأثیرپذیری آن از تغییرات اقلیمی می‌باشد و بر کاهش نوسانات و همچنین ارتفاع سطح ایستابی آب مؤثر است.

بررسی روند سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری حکایت از افت شدید آن‌ها و وجود روند معنی‌داری تا سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد که چاه‌های در معرض خشک شدن (۱۴ حلقه) از لحاظ مکانی در مرکز دشت و قسمت‌های کم ارتفاع واقع شده‌اند که این مناطق می‌توانند مکان مناسب برای توسعه باغداری و کشت آبی باشند (شکل ۷). همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد چاه‌هایی که در پای کوه قرار دارند به دلیل تغذیه مناسب از رواناب حاصل از بالادست کوهها، افت سطح ایستابی را تجربه نکرده‌اند.

با توجه به یافته‌های من-کندال عوامل هیدرواقلمی خود به تنهایی تأثیر زیادی بر کاهش سطح ایستابی چاه‌های منطقه داشته است و این عوامل را در کنار تأثیر افزایش سطح پوشش گیاهی می‌توان اصلی‌ترین عامل در این منطقه دانست؛ زیرا کاهش مقدار میانگین و همچنین نوسانات بارش و از طرفی افزایش مقدار میانگین و نوسانات دما باعث افزایش تعداد دوره آبیاری می‌شود و با توجه به کاهش دبی رودخانه (کاهش تعداد یا خشک شدن آب چشمه‌های موجود در منطقه که تأمین‌کننده اصلی آب رودخانه در منطقه است) افزایش برداشت از چاه‌ها را باعث شده و این اتفاق با توجه به شکل ۶ از سال ۱۳۸۵ شدت گرفته و کاهش همبستگی بین پوشش گیاهی و سایر عوامل هیدرواقلمی این موضوع را تأیید می‌کند. (Xia and Chen (2001) و Xia and Zhang (2008) در تحقیقات خود دلیل افت سطح آب‌های زیرزمینی را عوامل انسانی معرفی کرده‌اند ولی تغییرات دبی و سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند متأثر از تغییرات اقلیمی یا انسانی باشد.

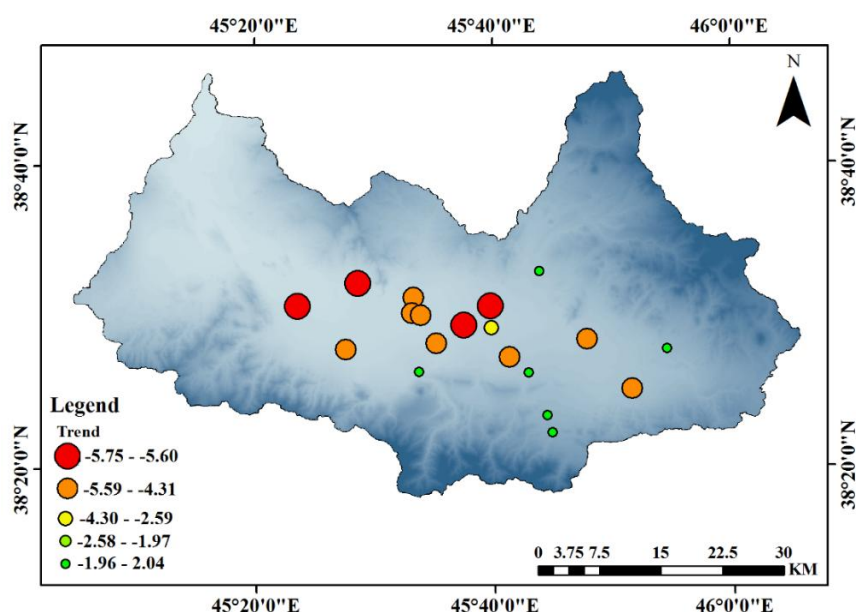


Fig. 7- Distribution map of water level of piezometric wells using Mann-Kendall  
 شکل ۷- نقشه توزیع روند سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری با استفاده از روش من-کندال

تغییرات افزایشی دما در دهه اخیر از طرفی و تغییرات کاربری و برداشت زیاد از آب‌های سطحی و زیرزمینی از طرف دیگر باعث تغییرات فرایندهای هیدرولوژیکی در منطقه مورد مطالعه گردیده است که این مسأله در کنار تغییرات رخ داده در متغیر دما و بارش لزوم مدیریت بهینه و کارآمد را بیش از پیش اجتناب ناپذیر می‌سازد. Nourani et al. (2014) و Li and Zhang (2008) نیز با بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی تأثیر تغییرات کاربری را عامل مؤثر بر کاهش دبی اعلام نمودند ولی در منطقه مورد مطالعه، در دهه اخیر افزایش دمای هوا عامل دیگری علاوه بر عامل انسانی، باعث کاهش دبی رودخانه و سطح آب‌های زیرزمینی شده است. Andaryani et al. (2019b) نیز با مدل‌سازی هیدرولوژیکی و سناریوهای مختلف، تغییرات اقلیم و کاربری اراضی را عامل مؤثر بر کاهش دبی رودخانه زیلبیرچای معرفی کرده‌اند.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

با توجه به افت شدید سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری، هدف از مطالعه حاضر، بررسی روند و پیچیدگی متغیرهای اقلیمی بارش و دما، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و دبی و همچنین شاخص پوشش گیاهی حوضه آبریز زیلبیرچای می‌باشد. در این پژوهش برای متغیرها روند، انرژی و پیچیدگی در مقیاس ماهانه در ۵ سطح زمانی در دوره ۳۰ ساله محاسبه گردید. نتایج نشان‌دهنده وجود روند معنی‌داری در دو سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد در ۱۴ حلقه چاه بررسی شده از ۲۰ چاه می‌باشد و در دوره پژوهش ۱۳ متر سطح ایستابی کاهش داشته است. چاه‌هایی که روند در آن‌ها وجود ندارد خارج از دشت و مناطق دور از مزارع کشاورزی بوده است که در پای کوه واقع شده‌اند و تغذیه مناسبی دارند و در اطراف این چاه‌ها از آب‌های زیرزمینی صرفاً برای شرب استفاده می‌گردد. در متغیرهای اقلیمی اعم از بارش و دما نتیجه حاصل از بررسی روند آن‌ها نشان‌دهنده وجود روند کاهشی بدون معنی‌داری در داده‌های بارش بوده اما در متغیر دما روند معنی‌داری افزایشی هم به صورت ماهانه و هم به صورت سالانه در دو سطح اطمینان مشاهده گردید. همچنین دبی خروجی روند معنی‌دار کاهشی را تجربه کرده است. پوشش گیاهی منطقه روند معنی‌داری نداشته ولی در طول دوره ۳۰ ساله توسعه داشته و روند مثبت بوده و مساحت آن افزایش داشته است. برای شناسایی رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات فعالیت‌های انسانی و اقلیمی، از روش چند مقیاسی موجک- آنتروپی برای سطح آب‌های زیرزمینی، بارش، دما و دبی خروجی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. به این ترتیب سری زمانی متغیرها با استفاده از موجک مادر  $db_2$  به ۵ زیرسری تجزیه و موجک- آنتروپی برای هر دوره زمانی پژوهش محاسبه شد. نتایج نشان داد که نوسانات آب

زیرزمینی با کاهش مواجه شده است که نشانه یک روند نامطلوب برای سری زمانی سطح آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین متغیر دبی و بارش با کاهش سطح نوسانات در مجموع دو دوره آخر بودند که قابل توجه است (دو دوره هم‌زمان با داده‌های موجود آب زیرزمینی) و در مقابل متغیر دما تغییرات نوسانی چندانی را تجربه نکرده است. در مجموع می‌توان هر دو عامل انسانی و اقلیمی را در کاهش نوسانات سطح آب زیرزمینی دانست. در ادامه با بررسی سری زمانی سالانه پوشش گیاهی، دما، بارش و دبی می‌توان مشاهده کرد که افزایش سطح زیرکشت هم‌زمان با کاهش بارش و افزایش دمای سالانه باعث کاهش آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. تحقیق حاضر می‌تواند هشدار برای مسئولان امر باشد که تغییرات کاربری اراضی بدون در نظر گرفتن توانمندی‌ها و قابلیت‌های منطقه صورت نگیرد چراکه پایداری و توسعه پایدار منطقه را هدف قرار می‌دهد. برداشت زیاد از آب‌های زیرزمینی و بدون برنامه‌ریزی با توجه به افزایش دمایی و کاهش بارش باران رخ داده، می‌تواند باعث فرونشست بیشتر در دشت‌ها گردیده و منابع تجدید نشدنی مانند خاک را تحت تأثیر قرار دهد لذا برای پایداری محیط می‌بایست توانمندی‌ها و محدودیت‌های منطقه شناخته شود و برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت‌ها در راستای توسعه پایدار صورت گیرد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

با توجه به اینکه بخشی از هزینه‌های تحقیق حاضر توسط بنیاد ملی نخبگان تامین شده است؛ لذا نویسندگان کمال تشکر و قدردانی خود را از این بنیاد ابراز می‌دارند.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Approximate
- 2- Sen's Slope
- 3- Multi-Scale Entropy
- 4- Mann-Kendall
- 5- Complexity
- 6- Wavelet-Entropy
- 7- Lag
- 8- Normalized Difference Vegetation Index
- 9- Daubechies
- 10- Discrete Wavelet Transform
- 11- Dyadic
- 12- Approximation
- 13- Detailed

#### ۶- مراجع

Abbate A, Koay J, Frankel J, Schroeder S C, Das P (1994) Application of wavelet transform signal

- Jehanzaib M, Shah S A, Yoo J, Kim T W (2020) Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches. *Journal of Hydrology* 588:125052
- Khalaj M, Kholghi M, Saghafian B, and Bazrafshan J (2019) Investigating effect of climate change and human activities on groundwater level and quality in semiarid regions. *Iran-Water Resources Research* 15(2):278-290 (In Persian)
- Khazaei B, Wu C (2018) Estimation of vegetation coverage based on seasonal variabilities in MODIS-based vegetation indices, in: *World Environmental and Water Resources Congress 2018*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 11–20
- Komasi M, Sharghi S (2019) Recognizing factors affecting decline in groundwater level using wavelet-entropy measure (Case study: Silakhor plain aquifer). *Journal of Hydroinformatics* 21(3):510–522
- Koster R D, Suarez M J (2001) Soil moisture memory in climate models. *Hydrometeorology* 2(6):558–570
- Kustu M D, Fan Y, Robock A (2010) Large-scale water cycle perturbation due to irrigation pumping in the US high plains: a synthesis of observed stream flow changes. *Hydrology* 390(1–4):222–244
- Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng F L (2009) Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Hydrology* 377(1-2):35–42
- Li Z, Zhang Y K (2008) Multi-scale entropy analysis of Mississippi river flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 22:507-512
- Liu B, Guan H, Zhao W, Yang Y, Li S (2017) Groundwater facilitated water-use efficiency along a gradient of groundwater depth in arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology* 233(15):235–241
- Liu D, Fu Q, Zhao D, Li T (2017) Complexity measure of regional seasonal precipitation series based on wavelet entropy. *Hydrological Sciences Journal* 62(15):2531-2540
- Mack T J, Chornack M P, Taher M R (2013) Groundwater-level trends and implication for sustainable water use in the Kabul Basin, Afghanistan. *Environment Systems and Decisions* 33(3):457-467
- Modi P A, Fuka D R, Easton Z M (2021) Impacts of climate change on terrestrial hydrological components and crop water use in the Chesapeake Bay watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 35:100830
- processor to ultrasound. *Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium* 2:1147-1152
- Addison P S, Murrari K B, Watson J N (2001) Wavelet transform analysis of open channel wake flows. *Engineering Mechanics* 127(1):58-70
- Andaryani S, Nourani V, Trolle D, Dehghani M, Mokhtari Asl A (2019a) Assessment of land use and climate change effects on land subsidence using a hydrological model and radar technique. *Journal of Hydrology* 578:124070
- Andaryani S, Trolle D, Nikjoo MR, Rezaei Moghadam MH, Mokhtari D (2019b) Forecasting near future impacts of land use and climate change on the Zilbier River hydrological regime northwestern, Iran. *Environmental Earth Sciences* 188(6):1-14
- Ashraf S, Nazemi A, AghaKouchak A (2021) Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific reports-Nature portfolio* 11(1):9135
- Bagherpoor M, Seyedian M S, Fathabadi A H, Mohamadi A (2017) Study of Mann-Kendall test performance in detecting the series of autocorrelation. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 11(36):11-21 (In Persian)
- Bi H, Liu B, Wu J, Yun L, Chen Z, Cui Z (2009) Effects of precipitation and land use on runoff during the past 50 years in a typical watershed in Loess Plateau: China. *Sediment Research* 24(3):352–364
- Chen X, Hu Q (2004) Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation. *Hydrology* 297(1-4):285–300
- Costa M, Goldberger A L, Peng C K (2002) Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Physical Review Letters* 89(6):1-4
- Gandhi G M, Parthiban S, Thummalu N, Christy A (2015) NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and GIS - A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science* 57:1199–1210
- Gibrilla A, Anornu G, Adomako D (2018) Trend analysis and ARIMA modelling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* 6:150-163
- Hamed K H, Rao A R (1998) A modified Mann-Kendal trend test for autocorrelated data. *Hydrology* 204(1-4):182-198
- Hou Z, Noori M, Amand R S (2000) Wavelet-based approach for structural damage detection. *Engineering Mechanics* 126(7):677-688

- comprehensively quantify positive/negative contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff in the upper Yellow River. *Journal of Cleaner Production* 287:125017
- Vousoughi F D, Dinpashoh Y, Aalami M T, Jhajharia D (2012) Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (Case study: Ardabil plain). *Stochastic Environmental Research Risk Assessment* 27(2):547–559
- Wen X, Wu X, Gao M (2017) Spatiotemporal variability of temperature and precipitation in Gansu Province (Northwest China) during 1951–2015. *Atmospheric Research* 197(15):132–149
- Xia J, Chen D (2001) Water problem and opportunities in hydrological sciences in China. *Hydrology* 46(6):907–922
- Xia J, Zhang Y (2008) Water security in north China and countermeasure to climate change and human activity. *Physics and Chemistry of the Earth* 33(5):359–363
- Xue D, Zhou J, Zhao X, Liu Ch, Wei W, Yang X, Li Q, Zhao Y (2021) Impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical arid watershed, NW China. *Ecological Indicators* 121:107013
- Yang Q, Zhang J, Hou Z, Lei X, Tai W, Chen W, Chen T (2017) Shallow groundwater quality assessment: use of the improved Nemerow pollution index, wavelet transform and neural networks. *Journal of Hydroinformatics* 19(5):784–794
- Yuan X, Xie Z, Zheng J, Tian X, Yang Z (2008) Effects of water table dynamics on regional climate: A case study over East Asian monsoon area. *Geophysical Research* 113:D21112
- Zhang G, Su X, Singh V P (2020) Modelling groundwater-dependent vegetation index using Entropy theory. *Ecological Modelling* 416:108916
- Zhang G, Su X, Singh V P, Ayantobo O O (2017) Modeling NDVI using joint entropy method considering hydro-meteorological driving factors in the middle reaches of Hei River Basin. *Entropy* 19(9):1–13
- Zhang L, Lia H, Liua D, Fu Q, Lia M, Faiza M A, Khan M I, Li T (2019) Identification and application of the most suitable entropy model for precipitation complexity measurement. *Atmospheric Research* 221:88–97
- Nalley D, Adamowski J, Khalil B (2012) Using discrete wavelet transforms to analyze trends in streamflow and precipitation in Quebec and Ontario (1954–2008). *Journal of Hydrology* 475:204–228
- Niu J, Chen J (2016) A wavelet perspective on variability of hydrological processes in conjunction with geomorphic analysis over the Pearl River basin in South China. *Hydrology* 542:392–409
- Niu J, Sivakumar B (2013) Scale-dependent synthetic stream flow generation using a continuous wavelet transform. *Hydrology* 496:71–78
- Nourani V, Kisi O, Komasi M (2011) Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall-runoff process. *Hydrology* 402(1-2):41–59
- Nourani V, Ranjbar S, Totonchi F (2014) Change detection of hydrological processes using wavelet-entropy complexity measure, Case study: Urmia Lake. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 45(3):75–90 (In Persian)
- Nourani V, Zanardo S (2013) Wavelet-based regularization of the extracted topographic index from high-resolution topography for hydro-geomorphic applications. *Hydrological Processes* 28:1345–1357
- 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* 88(6):2297–2301
- Rosso O A, Blanco S, Yordanova J, Kolev V, Figliola A, Schurmann M (2001) Wavelet entropy: A new tool for the analysis of short duration brain electrical signals. *Neuroscience Methods* 105(1):65–75
- Schultz M, Clevers J G P W, Carter S, Verbesselt J, Avitabile V, Quang H V, Herold M (2016) Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation* 52:318–327
- Shamsudduha M, Chandler R E, Taylor R G, Ahmed K M (2009) Recent trends in groundwater levels in a highly seasonal hydrological system: the Ganges-BrahmaputraMeghna Delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12):2373–2385
- Shannon C E (1948) A mathematical theory of communications I and II. *The Bell System Technical Journal* 27:379–443
- Su X, Li X, Niu Z, Wang N, Liang X (2021) A new complexity-based three-stage method to