



Multi-scale Entropy Analysis to Assess Impacts of Dam Construction on Aquifer, Case Study: Saveh Plain

M.M. Rezapour Tabari ^{1*}

Abstract

According to the nonlinear relationship among the components of aquifers these systems are called as complex systems. Due to natural and artificial changes the estimating the degree of complexity of these systems is very important for groundwater quality and quantity assessments. In this study multi-scale entropy (MSE) theory was applied to analyze long-term variation piezometers (1985-2014) in order to ascertain impacts of Saveh dam on the complexity of the Saveh aquifer plain located downstream of the dam. In this approach, unlike the sample entropy that calculates only the amount of entropy for a single scale factor, the MSE was used to assess the possible changes in the complexity of the aquifer in multi scale factors. The results showed that the complexity of the aquifer after the construction of Saveh dam decreased precipitously from the beginning of the aquifer plain to its middle line. An average of 31 percent increase can be seen in the entropy difference between the samples (complexity) in two periods (before and after the dam construction). The complexity properties alterations of the aquifer caused the destruction of natural systems aquifer and decrease the complexity of it. The comparison between proposed approach and Mann-Kendall method indicated the efficiency of MSE in evaluating the complexity of aquifer systems and detection of abnormal events in the groundwater table level time series. This study provided a reference for conservation of the aquifer natural environment and the assessment of impacts induced by big hydraulic structures on the groundwater system.

Keywords: Aquifer, Saveh Plain, Multi-scale entropy, System complexity

Received: September 8, 2015

Accepted: May 8, 2015

ارزیابی اثرات احداث سد بر روی آبخوان با استفاده از تحلیل آنتروپی چندمقیاسه، مطالعه موردی: دشت ساوه

محمود محمد رضاپور طبری^{۱*}

چکیده

با توجه به ارتباطات غیرخطی بین مؤلفه‌های حاکم بر سفره‌های زیرزمینی، از این سیستم‌ها به عنوان یک سیستم پیچیده نام برده می‌شود. تخمین درجه پیچیدگی این سیستم با توجه به تغییرات طبیعی و مصنوعی حاکم بر آن جهت ارزیابی‌های کمی و کیفی آبخوان بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق بر مبنای تغییرات بلندمدت (۹۳-۶۴) پیزومترهای دشت ساوه اقدام به بررسی اثر احداث سد ساوه بر روی آبخوان پایین‌دست سد با استفاده از تحلیل آنتروپی چندمقیاسه گردید. در این رویکرد بر خلاف روش آنتروپی که تنها میزان آنتروپی برای یک فاکتور مقیاس را مورد محاسبه قرار می‌دهد، از آنتروپی چندمقیاسه (MSE) جهت ارزیابی تغییرات احتمالی پیچیدگی آبخوان در چندین فاکتور مقیاس استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که میزان پیچیدگی آبخوان بعد از احداث سد ساوه از ابتدای دشت تا میانه دشت به شدت کاهش یافته و به طور متوسط ۳۱ درصد افزایش در میزان اختلاف آنتروپی (پیچیدگی) در دو دوره (قبل و بعد از احداث سد) مشاهده می‌شود. این تغییرات در خصوصیات پیچیدگی سفره منجر به تخریب سیستم طبیعی آبخوان و کاهش درجه پیچیدگی آن شده است. مقایسه رویکرد پیشنهادی با روش من-کندال بیانگر کارایی آنتروپی چندمقیاسه در ارزیابی پیچیدگی سیستم آبخوان و تشخیص رخدادهای غیرطبیعی در سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی می‌باشد. این مطالعه می‌تواند مبنایی جهت حفاظت از محیط طبیعی آبخوان‌ها و ارزیابی اثرات ساخت سازه‌های هیدرولیکی عظیم بر روی سفره‌های زیرزمینی را ارائه نماید.

کلمات کلیدی: آبخوان، دشت ساوه، آنتروپی چندمقیاسه، پیچیدگی سیستم

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۶/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۱۸

1- Assistant Professor of civil engineering, Dept. of Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran, mrtabari@eng.sku.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد

*- نویسنده مسئول

Huang و همکاران میزان پیچیدگی دبی جریان رودخانه Yangtze را با استفاده از تئوری آنتروپی نمونه مورد اندازه‌گیری قرار دادند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد 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 (Huang et al., 2011). Zhou و همکاران در سال ۲۰۱۲ اثرات احداث مخازن را بر روی حوضه رودخانه East با استفاده از تئوری آنتروپی چندمقیاسه مورد بررسی قرار دادند (Zhou et al., 2012). Liu و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از آنتروپی ضربه‌ای اقدام به بررسی پیچیدگی سیستم آبخواری در چین بر مبنای داده‌های عمق ماهانه سطح آب زیرزمینی نمودند. نتایج حاکی از کاهش درجه پیچیدگی آبخوان از شمال به جنوب می‌باشد. بررسی این محققین نشان داد که تغییرات در بارش و فعالیت‌های مرتبط با تولید محصولات کشاورزی به عنوان مهمترین عوامل در بروز کاهش پیچیدگی آبخوان می‌باشند (Liu et al., 2015).

لازم به ذکر است استفاده از تئوری آنتروپی نمونه در تحلیل‌های هیدرولوژیکی به طور وسیعی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است (Ozkul et al., 2000, Mays et al., 2002, Wang et al., 2004, Maruyama et al., 2005, Zhang et al., 2012). بررسی مطالعات صورت گرفته قبلی حاکی از کاربرد اندک تئوری آنتروپی چندمقیاسه در ارزیابی پدیده‌های هیدرولوژیکی و عدم استفاده از این ابزار جهت بررسی میزان پیچیدگی منابع آب زیرزمینی می‌باشد. بر این اساس در این مطالعه با هدف ارزیابی درجه پیچیدگی آبخوان دشت ساوه در نتیجه احداث سد ساوه بر مبنای داده‌های کمی تراز سطح آب زیرزمینی، رویکرد بر مبنای تئوری آنتروپی چندمقیاسه پیشنهاد و قابلیت آن با استفاده از آزمون غیرپارامتریک رتبه‌ای من-کندال (MK) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از کارا بودن این روش در ارزیابی اثرات احداث سازه‌های هیدرولوژیکی عظیمی مانند سدها در تغییر رفتار سیستم آبخوان و کاهش پیچیدگی آن می‌باشد. در واقع بر پایه روش پیشنهادی می‌توان جنبه‌های مختلف تغییرات رخ داده در سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی را تشخیص داد که این امر با روش‌های کلاسیکی همچون آزمون من-کندال امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه جهت ارزیابی اثرات احداث سد بر روی آبخوان دشت از دو روش آنتروپی چندمقیاسه و آزمون غیرپارامتری رتبه‌ای من-کندال استفاده گردید. در واقع در روش MK، معنی‌دار بودن روند

منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از بخش‌های مهم سیستم منابع آب طبیعی، نقش حیاتی در تأمین و توسعه پایدار اجتماعی و اقتصادی در مقیاس منطقه‌ای ایفا می‌نمایند. با توجه به افزایش نیازهای آبی و کاهش منابع آبی در دسترس، احداث سد و برداشت‌های بی‌رویه از ذخایر زیرزمینی منجر به ایجاد تغییرات تدریجی در سیستم طبیعی سفره‌های زیرزمینی و در نتیجه پیچیدگی این محیط‌های متخلخل اشباع گردید. عدم توجه محققین به پیچیدگی‌های ایجاد شده در نتیجه افزایش فعالیت‌های انسانی و سایر عوامل مصنوعی حاکم بر آبخوان‌ها منجر به کاهش دقت جهت شناخت، ارزیابی و پیش‌بینی سیستم‌های منابع آب زیرزمینی شده است. بر این اساس استفاده از تئوری‌هایی که به بررسی وضعیت پیچیدگی این محیط طبیعی می‌پردازد، ضروری و درخور توجه است. روش‌های ارزیابی متنوعی جهت بررسی پیچیدگی سیستم‌ها وجود دارد که از بین آن‌ها تئوری آنتروپی از فراوانی کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشد. آنتروپی درجه عدم قطعیت، میزان تصادفی بودن و میزان بی‌نظمی یک پدیده تصادفی را مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهد. مطابق مطالعات (Li and Zhang (2008) و Wu et al. (2013)، پیچیدگی سیستم با آنتروپی آن متناسب است و میزان آنتروپی با افزایش بی‌نظمی سیستم افزایش می‌یابد. در واقع مقادیر بالای آنتروپی حاکی از پیچیده و تصادفی بودن سیستم است. در این بخش به مطالعات صورت گرفته در استفاده از تئوری آنتروپی جهت تحلیل میزان پیچیدگی سیستم‌های آبی اشاره می‌شود.

تخمین پیچیدگی سری زمانی درجه حرارت روزانه با استفاده از اطلاعات ۵۰ ایستگاه هواشناسی و محاسبه آنتروپی نمونه توسط Li و همکاران در سال ۲۰۰۶ صورت گرفت. در این مطالعه الگوی مکانی میزان آنتروپی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مناطق جنوب غربی استان Yunnan چین به دلیل تأثیرپذیری از مانسون‌های جنوبی غربی، از شرایط اقلیمی یکنواخت‌تری برخوردار بوده و دارای مقادیر آنتروپی کمتری می‌باشند (Li et al., 2006).

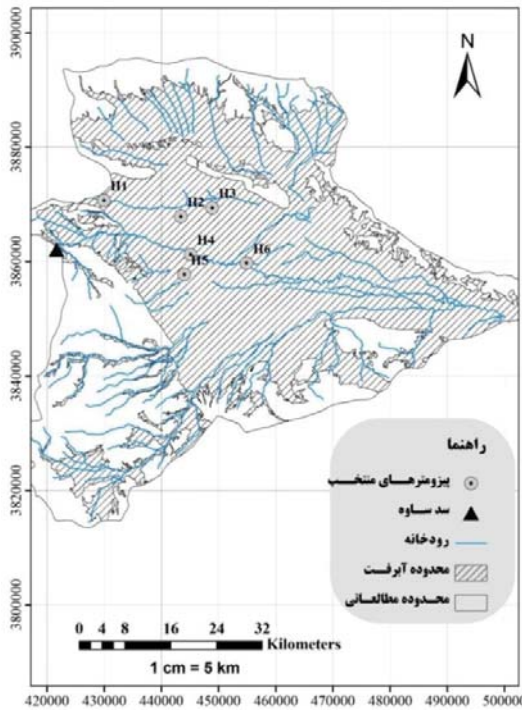
Li and Zhang با استفاده از تئوری آنتروپی چندمقیاسه به بررسی تغییرات محتمل در پیچیدگی رودخانه می‌سی‌سی‌پی ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی بر روی این رودخانه و بر اساس آمار دبی روزانه ۱۳۱ ساله پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار آنتروپی نمونه بعد از سال ۱۹۴۰ به دلیل ایجاد تغییرات قابل توجه در کاربری اراضی، پوشش زمین و عملیاتی که جهت حفاظت از خاک صورت گرفته است، کاهش یافته است (Li and Zhang, 2008).

تغییرات سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی در پیژومترها و همچنین آشکارسازی جهش‌های احتمالی که در نتیجه بروز اختلال در سیستم طبیعی سفره‌های زیرزمینی رخ می‌دهد، ممکن می‌گردد.

۱-۲- مطالعه موردی

محدوده مطالعاتی ساوه با وسعت تقریبی ۴۰۱۹ کیلومتر مربع می‌باشد که ۶۱ درصد آن را دشت و ۳۹ درصد آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه که یکی از زیر حوضه‌های دریاچه نمک می‌باشد حوضه مستقلی نبوده و در قسمت شمال غرب و غرب توسط سد ساوه (الغدیر) و رودخانه مزرقان با حوضه بالادست خود ارتباط پیدا می‌کند. ۴۹ درصد از این منطقه در استان قم و ۵۱ درصد در استان مرکزی واقع شده است. حداکثر ضخامت آبرفت در این دشت ۲۵۰ و میانگین آن ۱۰۰ متر می‌باشد. سطح برخورد به آب حداکثر ۱۲۰ متر و حداقل ۱ متر و نیز میانگین آن ۳۰ متر است. قابلیت انتقال آن حداکثر ۴۰۰۰ و حداقل ۴۸۰ متر مربع در روز و متوسط ضریب ذخیره ۵ درصد است. لازم به ذکر است که قابلیت انتقال در نواحی غربی دشت بیش از نواحی شرقی است که این امر بدلیل رسوبگذاری مواد دانه درشت در بستر رودخانه است. جهت جریان آب زیرزمینی نیز در جهت آب‌های سطحی غربی شرقی و شمال و جنوب به مرکز دشت است. جریان آب زیرزمینی در غرب به علت درشت بودن دانه‌ها تند و در شرق به علت ریز بودن دانه‌ها و وجود تپه‌های میوسن کند می‌گردد. اساس تغذیه آب زیرزمینی دشت ساوه توسط دو رودخانه قره‌چای و مزلقان صورت می‌گیرد که مقدار قابل توجهی از آب این رودخانه پس از ورود به دشت در آبرفت‌های دانه درشت نفوذ نموده و تغذیه اصلی سفره آب زیرزمینی دشت را تشکیل می‌دهند. همچنین ارتفاعات حاشیه دشت و سایر مسیل‌های موجود در محدوده مورد مطالعه نیز در تغذیه آبخوان نقش بسزایی را ایفا می‌نمایند. عواملی همچون پدیده خشکسالی و افزایش میزان بهره‌برداری از منابع زیرزمینی در بالادست رودخانه قره‌چای، منجر به کاهش آورد سالانه رودخانه قره‌چای به دشت ساوه شده است. این موضوع به ویژه در طی سال‌های پس از ۷۴ به دلیل بهره‌برداری از سد ساوه (الغدیر) نمود بیشتری داشته است (شکل ۱). تعیین اثرات احداث سد بر روی سیستم آب زیرزمینی دشت می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آبی مدیران و مؤثران سیستم‌های آبی جهت بهره‌برداری از شبکه توزیع آب سد اثرات مثبتی از نظر پایداری آبخوان پایین دست سد و اتخاذ تدابیری در جهت کاهش افت تصاعدی آبخوان و جلوگیری از احداث چنین سازه‌هایی در شریان‌های ورودی سفره‌های زیرزمینی داشته باشد. بر این اساس در این مطالعه بر مبنای آمار بلندمدت (۶۴-۹۳) چاه‌های مشاهده‌ای

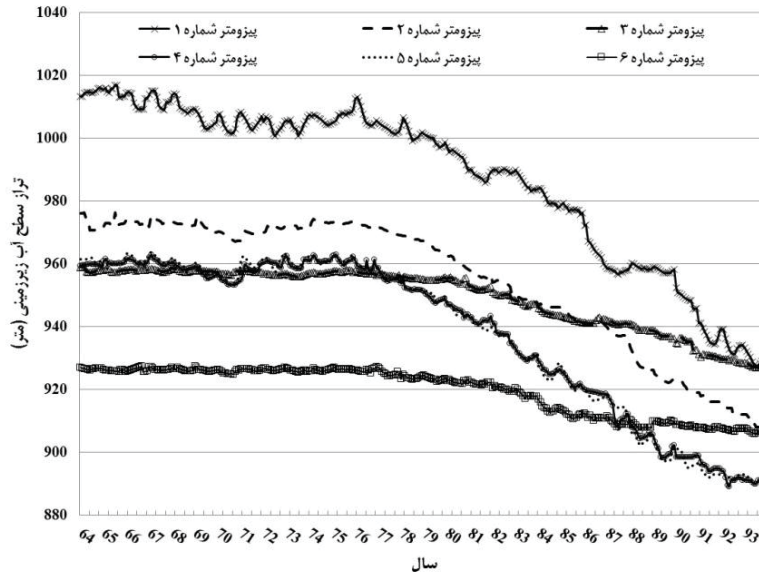
دشت ساوه اقدام به تعیین میزان تأثیر احداث سد ساوه بر روی آبخوان دشت پایین دست آن گردید. بررسی آمار پیژومترها تا سال ۹۳ نشان می‌دهد که از بین ۴۳ پیژومتر موجود تنها ۶ پیژومتر دارای آمار بلندمدت بوده و قابلیت استفاده جهت اعمال رویکرد پیشنهادی را دارد. شکل ۲ تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در این ۶ پیژومتر را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان دریافت که از سال ۷۴ افت تصاعدی در تراز سطح آب زیرزمینی شروع شده و تا کنون ادامه یافته است.



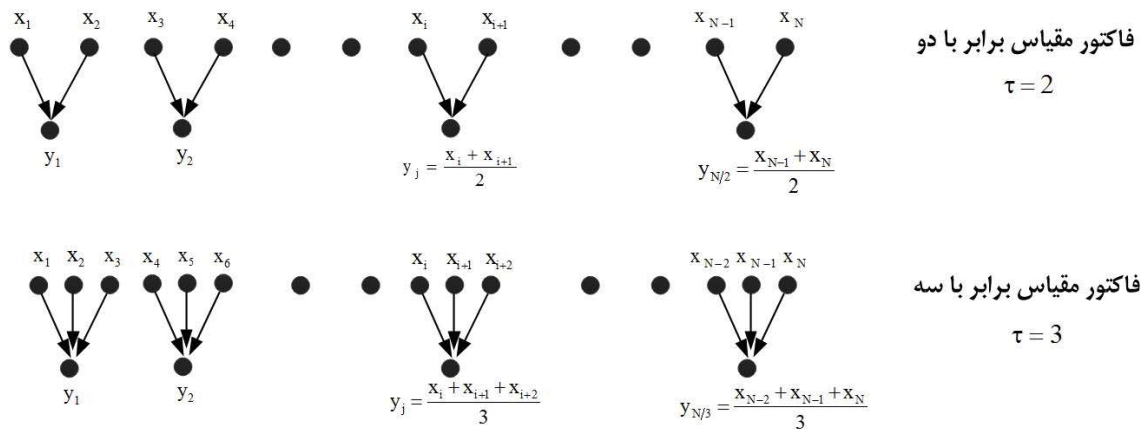
شکل ۱- موقعیت سد ساوه و پیژومترهای منتخب در محدوده مورد مطالعه

۲-۲- آنتروپی چندمقیاسه (MSE)

تحلیل آنتروپی چندمقیاسه روشی جدید جهت اندازه‌گیری میزان پیچیدگی سری‌های زمانی با طول محدود می‌باشد (Costa et al., 2005). این روش که قابلیت به‌کارگیری بر روی انواع سری‌های زمانی را دارد، با استفاده از آنتروپی نمونه SE اقدام به تحلیل نامنظمی، قابلیت پیش‌بینی و به نوعی میزان پیچیدگی سری‌های زمانی می‌نماید. در واقع با استفاده از MSE می‌توان آنتروپی متناظر نمونه را برای فاکتورهای مقیاس متوالی محاسبه نمود. در یک سری زمانی یک‌بعدی $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ، آنتروپی چندمقیاسه را می‌توان با استفاده از مراحل زیر مورد محاسبه قرار داد (Costa et al., 2002):



شکل ۲- تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای منتخب دشت ساوه



شکل ۳- شماتیکی از نحوه ساخت سری زمانی درشت با فاکتور مقیاس دو و سه (اصلاح شده از مرجع Wu et al., 2013)

مقدار فاکتور مقیاس، طول سری زمانی درشت کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، جهت ساخت سری زمانی درشت لازم است ابتدا سری زمانی اولیه به مجموعه‌هایی با طول τ بگونه‌ایی که هیچیک از مجموعه‌ها دارای عضو مشترک نباشند، تقسیم می‌شوند. سپس با متوسط‌گیری از مقادیر هر مجموعه، سری زمانی درشت حاصل می‌شود.

مرحله دوم: محاسبه آنتروپی نمونه برای هر یک از سری‌های زمانی درشت $(y^{(\tau)})$ ساخته شده در مرحله اول و سپس ترسیم مقادیر آنتروپی بدست آمده برای هر سری زمانی درشت در برابر

مرحله اول: ساخت سری زمانی درشت $y^{(\tau)}$ بر اساس فاکتور مقیاس τ و با استفاده از رابطه زیر:

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (1)$$

در این رابطه τ فاکتور مقیاس، N تعداد کل داده در سری زمانی اولیه و x_i مقدار داده i ام از سری زمانی اولیه می‌باشد. طول هر سری زمان درشت برابر با طول سری زمانی اولیه تقسیم بر فاکتور مقیاس

(τ) می‌باشد. در صورتی که فاکتور مقیاس برابر با یک باشد، سری زمانی درشت همان سری زمانی اولیه خواهد بود. همچنین با افزایش

فاکتور مقیاس. در این بخش نحوه محاسبه آنتروپی نمونه ارائه می‌گردد.

۳-۲- آنتروپی نمونه (SE)

آنتروپی در واقع مرتبط با دینامیک سیستم بوده و به عنوان نرخ تولید اطلاعات مطرح می‌باشد. اغلب سری‌های زمانی مرتبط با پدیده‌های مختلف با محدودیت تعداد داده‌های ثبت شده روبرو بوده و همچنین این داده‌ها حاوی نویز می‌باشند (Chen et al. 2009). Pincus (1991) آنتروپی تقریبی (ApEn) را جهت اندازه‌گیری میزان پیچیدگی سری‌های زمانی کاملاً غیرخطی ارائه نمود. این روش برای مجموعه داده‌های دارای نویز و سری‌هایی که دارای تعداد قابل توجهی از نظر طول داده ثبت شده می‌باشند، مناسب است. آنتروپی تقریبی بسیار وابسته به طول داده و عدم سازگاری نسبی (توافق نسبی) داده‌ها می‌باشد. در واقع با توجه به اینکه این روش یک مقیاس نسبی برای مقایسه سری‌های زمانی پیشنهاد می‌نماید، در صورت کم بودن طول مجموعه داده و یا وجود سازگاری با محدودیت مواجه است (Pincus, 1995; Pincus et al., 1993). جهت رفع نواقص مرتبط با آنتروپی تقریبی، Richman and Moorman (2000) روش جدید آماری جهت کمی نمودن درجه نامنظمی و یا پیچیدگی سیستم‌ها تحت عنوان آنتروپی نمونه (SE) را ارائه نمودند. در واقع این روش میزان منظم بودن و یا پیچیده بودن سری‌های زمانی را بهتر مورد ارزیابی قرار می‌دهد. لذا در این مطالعه نیز جهت کمی نمودن میزان پیچیدگی ناشی از اثرات احداث سد ساوه بر روی رفتار آبخوان دشت ساوه، آنتروپی نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. جهت محاسبه آنتروپی نمونه سه پارامتر N ، m و r مورد نیاز می‌باشد. مقدار N ، طول سری زمانی، m ، طول توالی که مورد مقایسه قرار می‌گیرد و r ، آستانه جهت پذیرش تطابق دو سری زمانی می‌باشد. یک روش مناسب جهت تخمین میزان r استفاده از $r \times SD$ می‌باشد که در آن SD انحراف از معیار سری زمانی مورد نظر است. در صورتی که سری زمانی با طول N و به صورت $\{x(i): i = 1, 2, 3, \dots, N\}$ مدنظر باشد، با استفاده از مراحل زیر می‌توان آنتروپی نمونه را مورد محاسبه قرار داد (Richman and Moorman 2000; Huang et al., 2011 و Li et al. 2006, Lake et al. 2002):

گام اول: ایجاد بردار m بعدی به صورت:

$$X(i) = \{x(i), x(i+1), x(i+2), \dots, x(i+m-1)\} \quad (2)$$

در این رابطه $i = 1, 2, \dots, N - m + 1$ می‌باشد.

گام دوم: تعریف فاصله اقلیدسی بین $X(i)$ و $X(j)$ به صورت رابطه ۳. این مقدار در واقع بیانگر حداکثر قدرمطلق اختلاف بین مؤلفه‌های اسکالر نظیر هم می‌باشد.

$$d(X(i), Y(i)) = \max \{ |X(i+k) - X(j+k)| \} \quad (3)$$

$$0 \leq k \leq m-1$$

گام سوم: تعریف $C_i^m(r)$ و $C^m(r)$ در قالب روابط ۴ و ۵:

$$C_i^m(r) = \frac{N_i^m}{N - m + 1}, \quad i = 1, 2, \dots, N - m + 1 \quad (4)$$

در این رابطه N_i^m ، تعداد m جفت داده متوالی که فاصله اقلیدسی بین آن‌ها از r کمتر می‌باشد.

$$C^m(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m+1} C_i^m(r)}{N - m + 1} \quad (5)$$

گام چهارم: تغییر بعد بردار $X(i)$ به $m+1$ و تکرار سه مرحله فوق جهت محاسبه $C^{m+1}(r)$.

گام پنجم: محاسبه آنتروپی نمونه (SE) با استفاده از رابطه زیر:

$$SE = -\ln \frac{C^{m+1}(r)}{C^m(r)} \quad (6)$$

رابطه ۶ در واقع آنتروپی سری زمانی با طول N را با محاسبه منفی لگاریتم طبیعی احتمال شرطی که با توالی کوتاه بر روی مجموعه داده‌ها در طول سری زمانی تکرار می‌شود، تخمین می‌زند (Tochigi et al., 2012). در واقع این پارامتر میزان عدم قطعیت، بی‌نظمی، تصادفی بودن و بی‌قاعدگی داده‌ها را اندازه‌گیری می‌نماید. زیاد بودن مقدار SE نشان‌دهنده پیچیدگی زیاد سری زمانی و کم بودن آن منظم بودن و وجود شباهت بین داده‌های سری زمانی مورد بررسی می‌باشد. بر مبنای روش آنتروپی چندمقیاسه، ساختار رویکرد پیشنهادی جهت بررسی اثر احداث سد ساوه بر روی آبخوان این دشت در قالب فلوجارت شکل ۴ ارائه گردید. مطابق این رویکرد، جهت کمی نمودن تغییرات رخ داده در سیستم آبخوان، درصد تغییرات آنتروپی نمونه برای هر فاکتور مقیاس مورد محاسبه قرار می‌گیرد و متوسط آن به سه دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول با متوسط درصد آنتروپی نمونه بین ۰-۳۳ درصد به عنوان تغییرات اندک و یا بدون تغییر، دسته دوم (۳۳-۶۷ درصد) با تغییرات متوسط و دسته سوم (۶۸-۱۰۰ درصد) با تغییرات بالا (سیستم دستخوش تغییرات زیاد شده است).

۲-۴- روش من-کندال

روش غیرپارامتری رتبه‌ای من-کندال که توسط Mann (1945) ارائه و توسط Kendall (1975) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه داده شد، جهت ارزیابی میزان معنی‌داری روندهای خطی و غیرخطی سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش نیازی به تبعیت سری زمانی مورد بررسی از توزیع مشخص نمی‌باشد که به عنوان مزیت این روش مطرح می‌باشد. با استفاده از این روش تغییرات داده‌ها شناسایی، نوع و زمان آن مشخص می‌گردد. همچنین در این روش فرض صفر، عدم وجود روند و تصادفی بودن داده‌ها در سری زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد. جهت استفاده از این روش لازم است آماره من-کندال محاسبه گردد. برای این منظور n داده مشاهداتی در قالب متغیر تصادفی $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار آماره روش من-کندال بر اساس این متغیر تصادفی در قالب روابط ۷ تا ۱۱ تعیین می‌گردد (Zhang et al., 2006):

$$d_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad , \quad (2 \leq k \leq n) \quad (7)$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{if } x_i > x_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, i-1 \quad (8)$$

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (9)$$

$$Var(d_k) = \frac{k(k-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

$$Z_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{Var(d_k)}} \quad (11)$$

در این روابط مقدار Z_k ، آماره من-کندال برای گروه k ام می‌باشد. مقدار مثبت و منفی این آماره به ترتیب بیانگر روند افزایشی و کاهش سری زمانی می‌باشد. بر اساس سطح معنی‌دار α درصد، اگر $|Z_k| > Z_{(1-\alpha/2)}$ باشد، فرض صفر رد شده و سری زمانی پارامتر مورد مطالعه دارای روند و در غیراین صورت فاقد روند ارزیابی می‌شود. در این مطالعه مقدار α برابر با ۵ درصد می‌باشد. جهت تعیین نقاط جهش در سری زمانی که تغییرات قابل توجه در آن نقطه رخ داده است، باید مقدار این آماره (Z'_k) را برای سری زمانی نزولی (بر اساس سال) نیز به دست آورد. در واقع مقدار آمار Z_k بر اساس سری زمانی‌ای که داده‌ها بر مبنای سال به صورت صعودی مرتب شده‌اند، می‌باشد. اگر دنباله‌های Z_k و Z'_k بر اساس سال به صورت نموداری ترسیم گردد، در حالت معنی‌داری روند، دو نمودار در نقطه شروع جهش (رخداد یک پدیده) در خارج از محدوده $Z_{(1-\alpha/2)}$ (که در سطح معنی‌دار ۹۵ درصد برابر با $\pm 1/96$ می‌باشد) یکدیگر را قطع کرده و در خلاف جهت یکدیگر حرکت خواهند کرد.

در حالی که در صورت عدم وجود روند، دو دنباله تقریباً به صورت موازی هم حرکت کرده و یا با چند بار برخورد به طوری که به تغییر جهت منجر نشود، عمل خواهند نمود. در شرایطی که مقدار Z_k در داخل محدوده $Z_{(1-\alpha/2)}$ باشد، سری تصادفی بوده و روند خاصی نمی‌توان برای آن لحاظ نمود.

۳- ارائه نتایج

جهت درک بهتر از نحوه تغییرات مرتبط با پیچیدگی سیستم آبخوان دشت ساوه، تحلیل آنتروپی چند مقیاسه‌ای بر روی داده‌های پیژومتری ثبت شده در ۶ موقعیت جغرافیایی واقع در سطح آبخوان دشت به عمل آمد. مطالعات صورت گرفته توسط Costa et al. (2002, 2003, 2005) با استفاده از MSE نشان داد که سیستم‌های بیولوژیکی سالم و یا جوان بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های ناسالم و پیر می‌باشند. بنابراین از میزان آنتروپی بالاتری نیز برخوردار خواهند بود. مشابه با سیستم بیولوژیکی، یک سیستم آبخوان نیز ممکن است با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی حاکم بر آن و تغییراتی که در مؤلفه‌های بیلان آن رخ می‌دهد، به دو دسته سیستم‌های سالم و ناسالم (بیمار) تقسیم شود. سیستم آبخوان که نتیجه تجمع آب در زیر زمین تحت فرآیندهای طبیعی در طی مدت زمان طولانی است، در صورتی که دخل و تصرفی در آن صورت نگیرد می‌توان به عنوان سیستم سالم مطرح باشد. چنین سیستمی از پیچیدگی بالایی برخوردار است. این سیستم طبیعی در نتیجه فعالیت‌های انسانی (از قبیل برداشت‌های بی‌رویه، احداث سازه‌های آبی در مجاری ورودی آبخوان و ...) بتدریج پیچیدگی خود را از دست داده و به صورت سیستم ناسالم و بیمار در می‌آید.

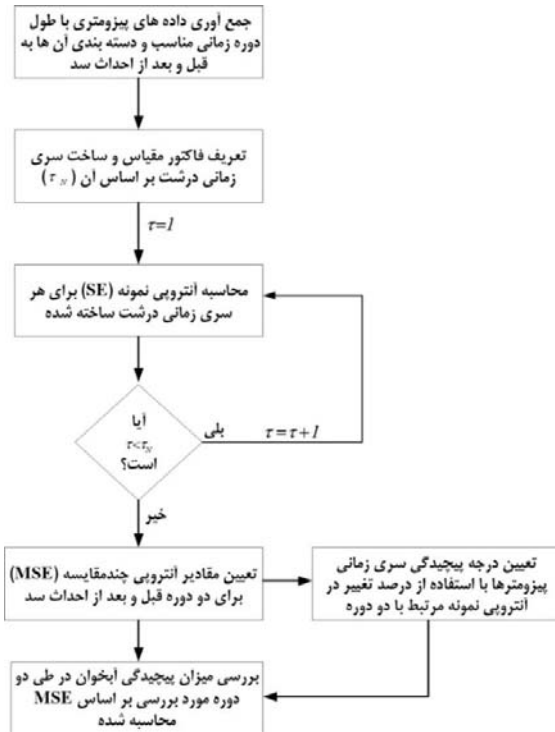
بر این اساس در این مطالعه بر مبنای آمار ۳۰ ساله (۹۳-۶۴) مرتبط با پیژومترهای فعال در سطح آبخوان دشت ساوه اقدام به مطالعه امکان کاهش میزان پیچیدگی سیستم در نتیجه احداث سد ساوه در ورودی دشت گردید.

با توجه به اینکه سد ساوه در سال ۷۲ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، لذا جهت ارزیابی اثرات احداث سد بر روی آبخوان پایین‌دست، ابتدا پیژومترهایی که دارای آمار کامل‌تری بوده انتخاب و بر مبنای دوره آماری ثبت شده در هر یک از این پیژومترها، میزان آنتروپی نمونه برای فاکتورهای مقیاس مختلف مورد محاسبه قرار گرفت. برای مقایسه میزان پیچیدگی حادث شده در نتیجه ساخت سد، دوره آماری مورد بررسی (۹۳-۶۴) به دو بازه زمانی قبل از احداث (۶۴-۷۴) و بعد از احداث سد ساوه (۹۳-۷۵) تقسیم گردید.

مطلب است که کاهش و یا افزایش تراز سطح آب زیرزمینی در برخی از دوره‌ها معنی‌دار نمی‌باشد و نشان‌دهنده پیچیدگی حاکم بر سیستم آبخوان می‌باشد. لذا بر پایه این روش نمی‌توان اقدام به بررسی پیچیدگی سیستم آبخوان نمود.

جهت ارزیابی درجه پیچیدگی سفره در طی دوره مورد بررسی، مقدار آنتروپی نمونه برای فاکتورهای مقیاس ۱ تا ۲۹ روز و برای هر یک از پیژومترهای منتخب با استفاده از کد تهیه شده در محیط MATLAB R2011 مورد محاسبه قرار گرفت. در این برنامه، m (طول توالی) برابر با ۲ و r (آستانه پذیرش) برابر با $0.45 \times SD$ در نظر گرفته شد. نتایج MSE محاسبه شده برای هر یک از پیژومترها در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. سپس بر اساس تقسیم‌بندی صورت گرفته در خصوص دوره‌های قبل و بعد از بهره‌برداری از سد، آنتروپی نمونه برای هر فاکتور مقیاس و برای هر یک از سری‌های زمانی ۶ پیژومتر تعیین گردید. بر مبنای آنتروپی نمونه محاسبه شده برای هر یک از پیژومترهای منتخب پراکنده شده در سطح دشت ساوه (شکل ۶ و ۷) می‌توان دریافت که خصوصیات مرتبط با پیچیدگی سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی در پیژومترهایی (مانند پیژومترهای شماره ۱، ۴ و ۵) که در نزدیکی مقاطع تغذیه‌کننده زیرزمینی آبخوان دشت می‌باشند (فاصله ۲ تا ۷ کیلومتری) بسیار بیشتر از سایر پیژومترها است. این امر به دلیل تغییرات قابل توجه جریانات زیرزمینی ورودی به دشت در نتیجه کم بودن ضخامت اشباع آبخوان در این نواحی، وجود سفره‌های تحت فشار محلی (موضعی) و همچنین اثرات بهره‌برداری از سد در طی دوره‌های زمانی مختلف می‌باشد.

بررسی MSE این پیژومترها حاکی از این است که شرایط طبیعی آبخوان در مبادی زیرزمینی ورود جریان به آبخوان تقریباً حفظ شده و در میانه دشت به دلیل اثرات برداشت از سفره و شرایط مصنوعی حاکم بر آن (همانند بهره‌برداری از شبکه آبیاری پایین‌دست سد جهت توسعه اراضی کشاورزی و تغییر کاربری اراضی) از پیچیدگی شرایط طبیعی کاسته و میزان آنتروپی نمونه کمتری را در سری زمانی مرتبط با تراز سطح آب زیرزمینی پیژومترها نشان داده است. بررسی میزان آنتروپی نمونه در فاکتورهای مقیاس ماهانه حاکی از افزایش بودن روند آنتروپی نمونه تمامی پیژومترها در طی دوره ۲۹ ماهه می‌باشد. این روند برای پیژومترهای ۱، ۲، ۴ و ۵ با شیب تندتر بوده و پس از تقریباً ۱۰ ماه بر پیچیدگی سیستم آبخوان در این پیژومترها به طرز چشمگیری افزوده شده است. به عبارت دیگر در بلندمدت درجه پیچیدگی آبخوان در ابتدای دشت بسیار بیشتر از میانه دشت بوده و به شرایط طبیعی حاکم بر سفره‌های زیرزمینی نزدیک



شکل ۴- ساختار رویکرد پیشنهادی جهت بررسی اثرات احداث سد بر روی آبخوان دشت

لازم به ذکر است علی رغم اینکه سال بهره‌برداری از سد مرتبط با سال ۷۲ است اما بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی هیدروگراف دشت حاکی از افت تصاعدی تراز آبخوان پس از گذشت دو سال از بهره‌برداری (سال ۷۴) می‌باشد (شکل ۲). لذا سال ۷۴ به عنوان مبنای مقایسه تغییرات در شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان و کاهش پیچیدگی سیستم آبخوان لحاظ شده است. جهت بررسی تغییرات رخ داده در سیستم طبیعی آبخوان، ابتدا معنی‌داری تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در پیژومترها با استفاده از روش MK و مطابق شکل ۵ تعیین گردید.

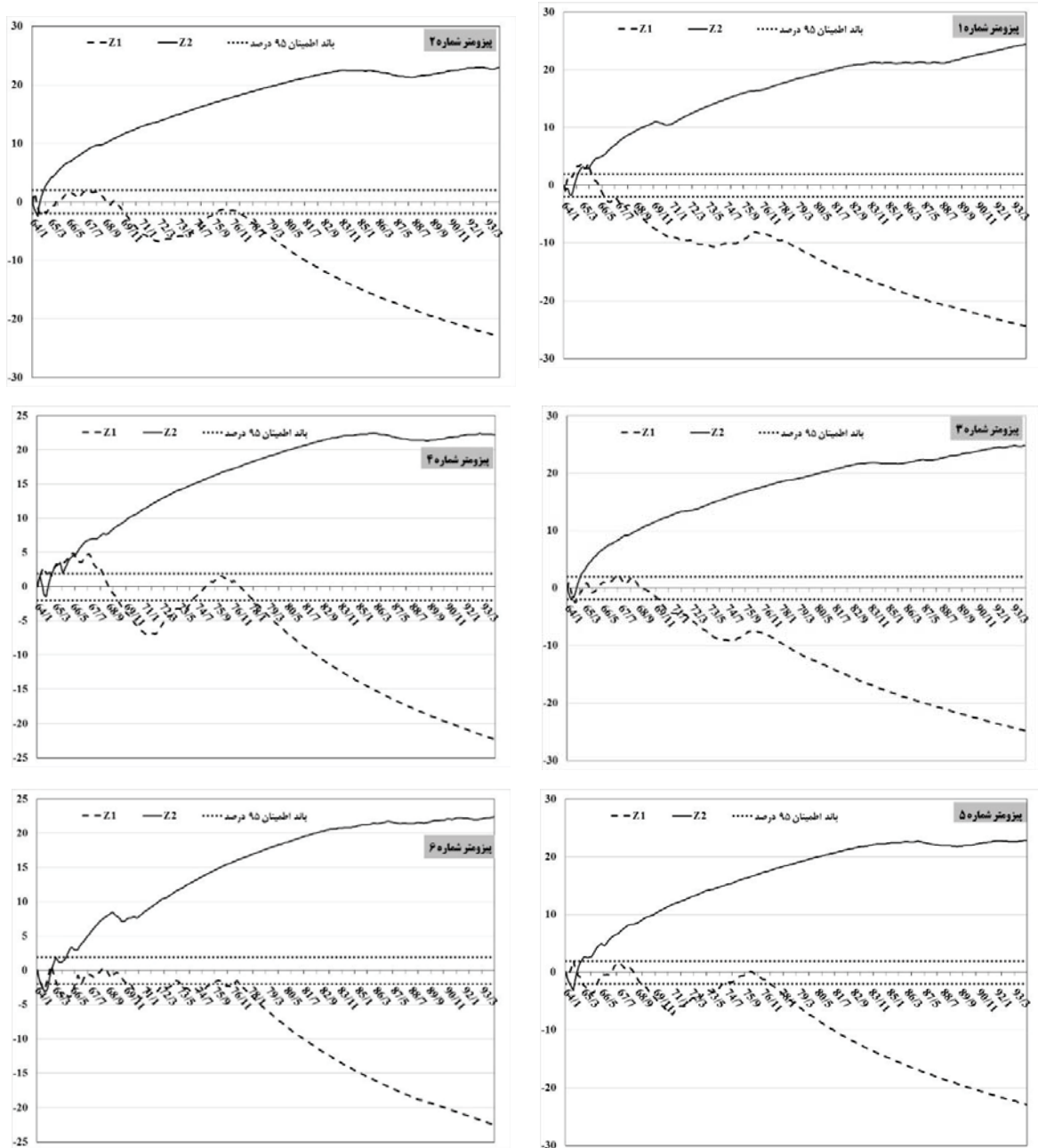
مطابق این شکل تراز سطح آب زیرزمینی در سال‌های پس از بهره‌برداری از سد روند کاهشی داشته و در سطح ۹۵ درصد این روند معنی‌دار است. نکته قابل توجه در این شکل نامشخص بودن علت این روند کاهشی در تراز سطح آب زیرزمینی است.

به عبارت دیگر با توجه به اینکه دو دنباله Z'_k و Z_k در هیچ‌یک از پیژومترها در طی دوره زمانی مورد بررسی همدیگر را قطع نمی‌کنند، لذا امکان تشخیص جهش (رخدادی که منجر به این روند کاهشی شده است) وجود ندارد. همچنین تغییرات آماره Z_k بیانگر این

دوره قبل و بعد از بهره‌برداری ترسیم گردید. مطابق این شکل، مقادیر آنتروپی نمونه به طور معنی‌دار پس از بهره‌برداری از سد کاهش یافته است. با توجه به کم بوده طول داده‌های مورد بررسی برای دوره قبل از بهره‌برداری از سد از فاکتور مقیاس ۸ ماهه برای محاسبه آنتروپی نمونه در طی این دوره استفاده شده است.

خواهد شد. اما این روند در خصوص درجه پیچیدگی آبخوان در کوتاه‌مدت و برای دوره‌های کمتر از یکسال نسبتاً اندک می‌باشد.

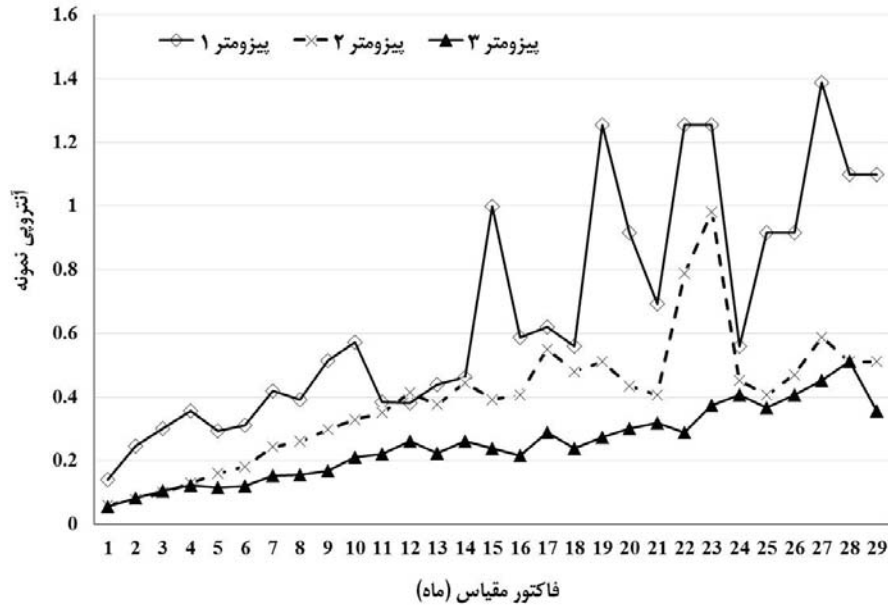
جهت مقایسه تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مرتبط با پیچیدگی سیستم آبخوان، MSE مرتبط با هر پیزومتر مطابق شکل ۸ برای دو



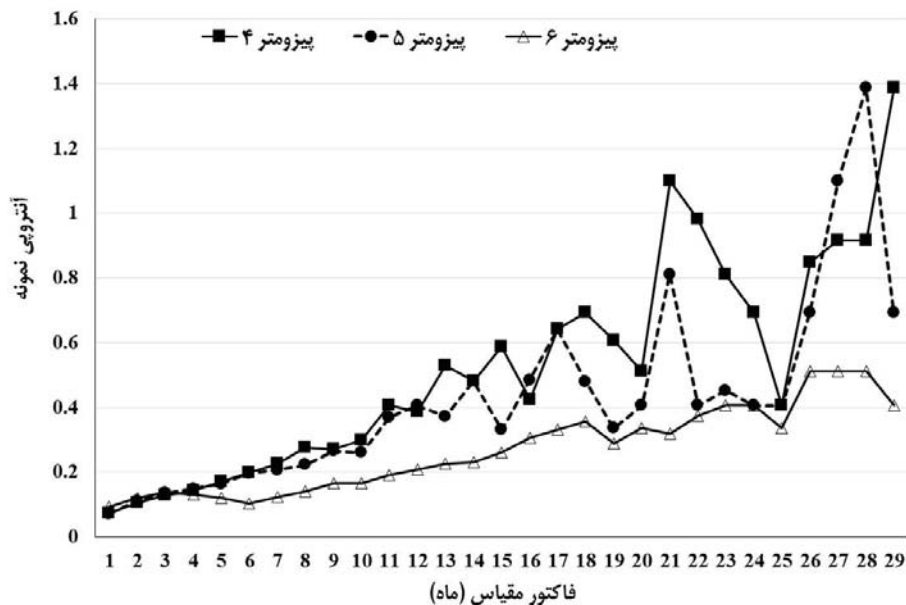
شکل ۵- نتایج آماره من-کندال برای هر یک از پیزومترهای مورد بررسی

در جهت کمی نمودن تغییرات رخ داده در میزان آنتروپی تراز سطح آب پیزومترهای منتخب در طی دو دوره مورد بررسی، درصد تغییر در آنتروپی نمونه مطابق جدول ۱ تهیه گردید. در واقع بر اساس این جدول می‌توان درجه پیچیدگی سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی

در پیزومترها را به صورت کمی ارائه نمود. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که از پیزومتر ۱ تا پیزومتر ۶ به طور متوسط میزان آنتروپی نمونه از ۷۲/۹۲ درصد تا ۹۵/۴۸ درصد تغییر داشته است.



شکل ۶- مقایسه آنتروپی نمونه تراز سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای ۱، ۲ و ۳ برای کل دوره زمانی مورد بررسی و فاکتورهای مقیاس مختلف



شکل ۷- مقایسه آنتروپی نمونه تراز سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای ۴، ۵ و ۶ برای کل دوره زمانی مورد بررسی و فاکتورهای مقیاس مختلف

جدول ۱- ارزیابی میزان تغییر در پیچیدگی سیستم آبخوان با استفاده از مقدار آنتروپی نمونه هر پیزومتر برای فاکتورهای مقیاس مختلف

شماره پیزومتر	۱	۲	۳	۴	۵	۶
فاکتور مقیاس	درصد تغییر در آنتروپی نمونه					
۱	۹۰/۷۴	۹۴/۱۹	۹۲/۱۹	۹۰/۹۵	۹۳/۱۹	۹۳/۸۴
۲	۸۹/۳	۹۴/۴۷	۹۳/۶	۹۱/۷۸	۹۲/۸۷	۹۳/۷
۳	۸۲/۱۳	۹۴/۱۵	۹۳/۵	۹۳/۸	۹۴/۵	۹۵/۶
۴	۷۶/۶	۹۳/۹۴	۹۲/۰۱	۹۴/۷۲	۹۵/۹۱	۹۶/۴۶
۵	۷۷/۸۱	۹۰/۶۵	۸۹/۷۳	۹۳/۸۷	۹۵	۹۴/۹۷
۶	۵۴/۹۵	۹۲/۷۱	۸۱/۳۴	۹۳/۹۹	۹۰/۹۲	۹۷/۶۴
۷	۷۲/۷۶	۹۵/۱	۸۷/۱۵	۸۶/۰۴	۹۳/۰۲	۹۶/۱۳
۸	۳۹/۰۷	۷۷/۳۱	۸۱/۸۴	۸۷/۷۵	۹۳/۲۵	۹۵/۵۳
میانگین	۷۲/۹۲	۹۱/۵۶	۸۸/۹۲	۹۱/۶۱	۹۳/۵۸	۹۵/۴۸

به عبارت دیگر پس از بهره‌برداری از سد ساوه به دلیل ایجاد اختلال در تغذیه طبیعی سفره، خشک شدن چاه‌های در حال بهره‌برداری (مطابق بازدیدهای میدانی صورت گرفته) و در نتیجه آن افزایش حفاری چاه‌های غیرمجاز، عملاً آبخوان تعادل خود را از دست داده و ضخامت اشباع آن به کمترین میزان رسیده است. این امر منجر به ایجاد اختلافات فاحش در میزان آنتروپی نمونه پیزومترهای مرکزی دشت در طی دو دوره قبل و بعد از احداث سد ساوه شده است به طوری که از ابتدای دشت تا میانه دشت تقریباً به طور متوسط ۳۱ درصد افزایش در میزان اختلاف آنتروپی (پیچیدگی) دو دوره را نمایان ساخته است.

به عبارت دیگر پس از بهره‌برداری از سد ساوه به دلیل ایجاد اختلال در تغذیه طبیعی سفره، خشک شدن چاه‌های در حال بهره‌برداری (مطابق بازدیدهای میدانی صورت گرفته) و در نتیجه آن افزایش حفاری چاه‌های غیرمجاز، عملاً آبخوان تعادل خود را از دست داده و ضخامت اشباع آن به کمترین میزان رسیده است. این امر منجر به ایجاد اختلافات فاحش در میزان آنتروپی نمونه پیزومترهای مرکزی دشت در طی دو دوره قبل و بعد از احداث سد ساوه شده است به طوری که از ابتدای دشت تا میانه دشت تقریباً به طور متوسط ۳۱ درصد افزایش در میزان اختلاف آنتروپی (پیچیدگی) دو دوره را نمایان ساخته است.

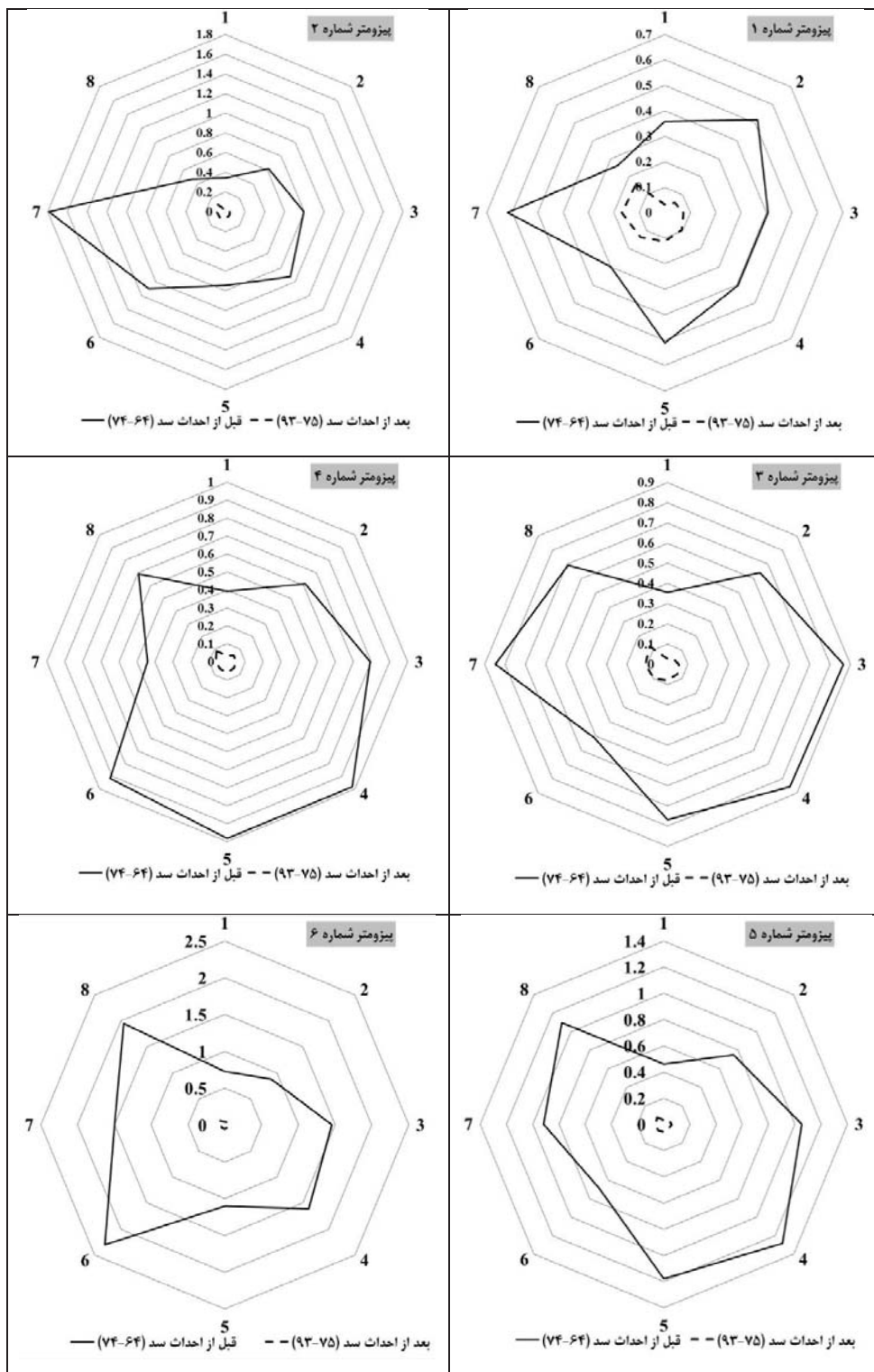
۴- جمع‌بندی

در این تحقیق جهت ارزیابی اثرات احداث سد ساوه (الغدير) بر روی آبخوان دشت ساوه، دو روش من-کنندال و تئوری آنتروپی چندمقیاسه مورد استفاده قرار گرفت.

مطابق رویکرد ارائه شده، با توجه به اینکه متوسط درصد تغییر در آنتروپی نمونه هر یک از پیزومترهای منتخب بیش از ۶۸ درصد می‌باشد لذا درجه تغییرات رخ داده در سیستم طبیعی آبخوان بسیار زیاد بود و این امر اثرات قابل توجه احداث سد بر روی سیستم طبیعی آبخوان دشت ساوه را نشان می‌دهد. بنابراین در نهایت می‌توان بیان نمود که در این دشت علی‌رغم افزایش بی‌رویه چاه‌های بهره‌برداری (همانند سایر دشت‌های کشور)، اثراتی که احداث سد ساوه بر روی سفره آب زیرزمینی داشته قابل توجه بوده و به طور مشخص چند سال پس از بهره‌برداری از این سد تغییرات فاحشی در روند تراز سطح آب زیرزمینی رخ داده است.

بر این اساس و با استفاده از آمار بلندمدت (۹۳-۶۴) پیزومترها واقع در سطح دشت ساوه، آماره من-کنندال و میزان آنتروپی نمونه (SE) برای مقیاس‌های زمانی مختلف و برای هر پیزومتر تعیین گردید. نتایج آماره MK نشان‌دهنده معنی‌دار بودن روند کاهشی تراز سطح آب زیرزمینی در طول دوره مورد بررسی بوده اما قابلیت تشخیص جهش‌های رخ داده در سری زمانی تراز را ندارد. ارزیابی میزان آنتروپی نمونه در فاکتورهای مقیاس ماهانه و بر اساس کل دوره آماری مورد بررسی نشان‌دهنده افزایشی بودن روند آنتروپی نمونه در تمامی پیزومترها می‌باشد. با تحلیل روند تغییرات آنتروپی نمونه برای هر پیزومتر می‌توان دریافت که مقدار SE برای پیزومترهای واقع در ابتدای دشت بسیار بیشتر از میانه دشت بوده و بیانگر پیچیده بودن شرایط آبخوان در مقاطع ورودی سفره است. مقایسه تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مرتبط با پیچیدگی سیستم آبخوان، برای دو دوره قبل و بعد از بهره‌برداری از سد ساوه نشان می‌دهد که مقادیر آنتروپی

این امر منجر به تخریب سیستم طبیعی آبخوان (که از پیچیدگی بالایی برخوردار می‌باشد) و کاهش درجه پیچیدگی آن شده است. رویکرد پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثری اثرات احداث سازه‌های



شکل ۸- مقایسه مقدار آنتروپی نمونه به دست آمده از روش MSE برای شرایط قبل و بعد از احداث سد ساوه

- International Journal of Climatology 26(15):2131–2139.
- Li Z, Zhang YK (2008) Multi-scale entropy analysis of Mississippi river flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 22(4):507–512.
- Liu D, Qiang Fu, Hu Y, 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.
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245–259.
- Maruyama T, Kawachi T, Singh VP (2005) Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *Journal of Hydrology* 309:104–113.
- Mays DC, Faybishenko BA, Finsterle S (2002) Information entropy to measure temporal and spatial complexity of unsaturated flow in heterogeneous media. *Water Resources Research* 38(12): 1313-1323.
- Ozkul S, Harmancioglu NB, Singh VP (2000) Entropy-based assessment of water quality monitoring networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 5:90–100.
- Pincus SM (1991) Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 88(6):2297-2301.
- Pincus SM, (1995) Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos* 5(1):110–117.
- Pincus SM, Cummins TR, Haddad GG (1993) Heart rate control in normal and aborted-SIDS infants. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 264(3): 638–646.
- Richman JS, Moorman JR (2000) Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 278(6):2039–2049.
- Tochigi Y, Segal NA, Vaseenon T, Brown TD (2012) Entropy analysis of tri-axial leg acceleration signal waveforms for measurement of decrease of physiological variability in human gait. *Journal of Orthopaedic Research* 30(6):897-904.
- Wang D, Chen YF, Li GF, Xu YH (2004) Maximum entropy spectral analysis for annual maximum tide levels time series of the Changjiang river estuary. *Journal of Coastal Research* 43:101-108.
- نمونه به طور معنی‌داری و پس از بهره‌برداری از سد کاهش یافته است. از آنجا که میانگین درصد تغییر در آنتروپی نمونه پیزومترها برابر با ۸۹ درصد (بیش از ۶۸ درصد) می‌باشد لذا درجه تغییرات رخ داده در سیستم طبیعی آبخوان بسیار زیاد بوده و این موضوع بیانگر تأثیرگذار بودن اثر احداث این سد بر روی رفتار کمی آبخوان است. از آنجا که احداث سد‌های مخزنی در مبادی ورودی دشت‌ها می‌تواند در به هم زدن تعادل طبیعی آبخوان اثرات قابل توجهی را ایجاد نماید، لذا رویکرد پیشنهادی در جهت بررسی، ارزیابی و پیش‌بینی این اثرات بر روی آبخوان می‌تواند زمینه اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مناسب در این خصوص باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Mann-Kendall Non-parametric Method
- 2- Multi Scale Entropy
- 3- Sample Entropy
- 4- Scale Factors
- 5- Coarse-grained
- 6- Approximate Entropy

۵- مراجع

- Chen W, Zhuang J, Yu W, Wang Z (2009) Measuring complexity using fuzzy RN, ApEn, and SampEn. *Medical Engineering and Physics* 31(1):61.
- Costa M, Goldberger AL, Peng CK (2002) Multi-scale entropy analysis of complex physiologic time series. *Physical Review Letters* 89(6):1–4.
- Costa M, Goldberger AL, Peng CK (2005) Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 71(1-2):1-18.
- Costa M, Peng CK, Goldberger AL, Hausdorff JM (2003) Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Physica A* 330:53–60.
- Huang F, Xia Z, Zhang N, Zhang Y, Li J (2011) Flow-complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze river China. *Journal of Hydrologic Engineering* 16:914-919.
- Kendall MG (1975) Rank correlation methods. Hafner Press, NYC, 272p.
- Lake DE, Richman JS, Griffin PM, Moorman JR (2002) Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. *American Journal of Physiology* 283(3):789–797.
- Li SC, Zhou QF, Wu SH, Dai EF (2006) Measurement of climate complexity using sample entropy.

- Pearl river, China. *Hydrological Processes* 26(10):1495–1508.
- Zhou Y, Zhang Q, Li K, Chen X (2012) Hydrological effects of water reservoirs on hydrological processes in the east river (China) basin: Complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. *Hydrological Processes* 26:3253–3262.
- Wu SD, Wu CW, Lin SG, Wang CC, Lee KY (2013) Time series analysis using composite multiscale entropy. *Entropy* 15(3):1069-1084.
- Zhang Q, Xu CY, Becker S, Jiang T (2006) Sediment and runoff changes in the Yangtze river basin during past 50 years. *Journal of Hydrology* 331:511–523.
- Zhang Q, Xu CY, Chen X, Lu X (2012) Abrupt changes in the discharge and sediment load of the