



Optimal Location for Groundwater Quality Monitoring Stations Using the Shannon Disorder Index in Dez Basin (Lorestan Province)

M. Derikvandi¹, H. Zeinivand^{2*},
N. Tahmasebipour², and A. Haghighizadeh²

Abstract

Site location is one of the spatial analyzes that has a great impact on reducing the monitoring costs and is one of the most important and effective steps in executive projects. For the economic considerations and reduction of monitoring costs, optimization approaches in this study are to reduce the number of the groundwater quality monitoring stations in Dez watershed in Lorestan province. In this regard, using an algorithm based on the principle of maximum Shannon disorder index and based on the pollution index of TH, SAR, EC, SO₄, Cl, HCO₃, K, Na, Ca, Mg, TDS and pH parameters, optimization was done for the available 63 monitoring stations in the statistical period of 1387 to 1396 (2008-2017). First, the average rank of each station in the 10 years data was obtained. Then, appropriate models were proposed for the network Shannon disorder index regarding the number of stations and time. After fitting the best model, the results showed that based on SO₄, Cl, HCO₃, K, Na, Ca, Mg, pH, TH SAR, TDS and EC parameters, respectively 33, 34, 41, 24, 40, 34, 30, 43, 33, 33, 41 and 28 stations are sufficient for groundwater in the study area. Also, among the 12 quality indicators evaluated for groundwater, potassium (K) had the highest value of Shannon disorder index and therefore, it was selected as the superior index. The mean squared error and the mean absolute error value were used to validate the results.

Keywords: Optimization, Algorithm, Shannon Disorder.

Received: January 30, 2023

Accepted: May 17, 2023

مکانیابی بهینه ایستگاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از اصل حداکثر شاخص اختلال شانون در حوضه آبریز سد دز (محدوده استان لرستان)

مرضیه دریکوندی^۱، حسین زینی‌وند^{۲*}، ناصر طهماسبی‌پور^۲
و علی حقی‌زاده^۲

چکیده

مکانیابی بهینه تحلیل مکانی است که به دلیل کم کردن هزینه‌های پایش نقش مهمی در راه‌اندازی پروژه‌های اجرایی دارد. به دلیل ملاحظات اقتصادی و کم کردن هزینه‌های پایش، رویکرد بهینه‌سازی در این پژوهش کاهش ایستگاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی و توزیع مکانی مناسب آنها در حوضه آبریز سد دز در محدوده استان لرستان است. در این رابطه، با استفاده از الگوریتمی بر اساس اصل حداکثر شاخص اختلال شانون و بر مبنای شاخص آلودگی متغیرهای Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄, EC, SAR, TH, TDS و pH نسبت به بهینه‌سازی شبکه پایش موجود با ۶۳ ایستگاه در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ اقدام شد. نخست برای هر ایستگاه در دوره ۱۰ سال آماری، میانگین رتبه محاسبه شد. سپس با توجه به تعداد ایستگاه و زمان مربوطه برای شاخص اختلال شانون شبکه مدل‌هایی متناسب ارائه شد. پس از برازش بهترین مدل برای هر پارامتر، نتایج نشان داد که بر اساس پارامترهای SO₄, Cl, HCO₃, K, Na, Ca, Mg, pH, TH, TDS, SAR و EC از میان ۶۳ ایستگاه به ترتیب تعداد ۳۳، ۳۴، ۴۱، ۲۴، ۴۰، ۳۴، ۳۰، ۴۳، ۳۳، ۳۳ و ۴۱ ایستگاه برای پایش آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه کافی است. همچنین، برای اعتبارسنجی نتایج از میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا استفاده شد. در نهایت، در میان ۱۲ شاخص کیفی ارزیابی شده، بیشترین مقدار شاخص اختلال شانون برای آب زیرزمینی برای پارامتر پتاسیم (K) بدست آمد. بنابراین شاخص پتاسیم دارای حداکثر شاخص اختلال شانون در منطقه بوده و به عنوان شاخص برتر انتخاب شد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم، اختلال شانون.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۷

1- M.Sc. Graduate in Watershed Management, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: zeinivand.h@lu.ac.ir

*- Corresponding Author

DOI: [20.1001.1.17352347.1402.19.3.5.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.3.5.4)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌خیزداری، گروه مهندسی مرتع و آب‌خیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مرتع و آب‌خیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

بهینه‌سازی به این منظور انجام می‌شود که بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود برگزیده شود. پایش بلندمدت بدون توجه به بهینه‌سازی، سبب افزایش هزینه پایش می‌شود. مکان‌یابی فرایندی است که از طریق آن می‌توان بر اساس شرایط تعیین شده و با توجه به منابع و امکانات موجود، بهترین محل مورد نظر برای یک فعالیت را تعیین کرد. مکان‌یابی در واقع تجزیه و تحلیل توأمان اطلاعات فضایی و داده‌های توصیفی به منظور یافتن یک یا چند موقعیت فضایی با ویژگی‌های توصیفی مورد نظر کاربر است.

(Changhyoun et al. 2014) به مکانیابی مطلوب ایستگاه‌های نمونه‌برداری کیفیت آب در رودخانه با استفاده از آنتروپی شانون و پیشنهاد یک الگوریتم کارآمد در کره جنوبی پرداخت. الگوریتم پیشنهادی به صورت جداگانه یا در رابطه با یک الگوریتم ژنتیکی استفاده شد. الگوریتم پیشنهادی تنها نامزدهای رقابتی را ضبط کرد و به طور قابل توجهی باعث کاهش اندازه مسئله شد. همچنین، الگوریتم جدیدی برای حل توابع هزینه داده شده پیشنهاد شد که مبتنی بر شباهت بین توابع هزینه و فرمول آنتروپی و در خصوص ویژگی توپوگرافیکی بین طول کل و تعداد داده‌های یک شبکه رودخانه بود. روش پیشنهادی مشکل بهینه‌سازی داده شده را با بار محاسباتی کمی حل کرد.

(Godarzi et al. 2019) با بهره‌گیری از آنتروپی و کریجینگ بیزین تجربی به بهینه‌سازی و درونیابی مکانی تراز آب در شبکه پایش آبهای زیرزمینی دشت سیلاخور (واقع در استان لرستان) پرداخت. در آن پژوهش یک مدل بهینه شبکه پایش با دو هدف بیشینه‌کردن مقدار آنتروپی در ایستگاه‌های پایش و کمینه‌کردن هزینه‌های پایش تراز آب زیرزمینی توسعه داده شد. که در آن، از داده‌های ۲۹ ایستگاه موجود برای بهینه‌سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی استفاده شد. در گام نخست با بهره‌گیری از روش آنتروپی، مقدار آنتروپی در هر یک از ۲۹ ایستگاه شبکه تعیین شد. پس از آن مقدار آنتروپی به دست آمده برای هر یک از ایستگاه‌ها با مقدار آنتروپی سری زمانی بارش مقایسه شد و بر مبنای تغذیه‌ی آبخوان و مطابقت مقادیر آنتروپی ایستگاه‌های بهینه از میان شبکه موجود تعیین شد. در گام بعدی درونیابی مکانی داده‌ها با بهره‌گیری از روش کریجینگ بیزین تجربی (EBK¹) در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نتایج حاصل از چهار مدل نیم تغییرنمای متفاوت ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از پژوهش کفایت یک شبکه با ۱۱ ایستگاه را از میان ۲۹ ایستگاه پایش برای آبخوان دشت سیلاخور

مناسب می‌داند. شبکه پایش بهینه به دست آمده در مقایسه با شبکه مشاهداتی موجود توانسته تعداد ایستگاه‌های پایش را به میزان ۶۲ درصد کاهش داده و توزیع مکانی ایستگاه‌ها را نیز بهبود ببخشد. در بهترین حالت اجرای مدل، بالاترین مقدار جذر میانگین خطا (2RMSE) برای مدل واریوگرام K-Bessel Detrended با مقدار ۲۰/۸۷ متر است که نسبت به سه مدل دیگر نیم تغییرنمای نتایج بهتری دارد.

(Salmana et al. 2021) به یک رویکرد جدید مبتنی بر آنتروپی حداکثر بیزی برای طراحی شبکه‌های پایش کیفیت آب در رودخانه‌ها در شرق ویرجینیا ایالات متحده پرداخت. این مقاله یک چارچوب مبتنی بر حداکثر آنتروپی بیزی (3BME) را برای بهینه‌سازی مکان‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت آب (4WQMS) در رودخانه‌ها برای به دست آوردن بالاترین ارزش اطلاعات با کمترین تعداد ایستگاه‌های نظارتی ارائه می‌کند. در این مطالعه، BME به عنوان یک رویکرد انعطاف‌پذیر، دقیق و مؤثر در زمین‌آمار برای بهینه‌سازی پوشش مکانی - زمانی WQMS بالقوه استفاده می‌شود. علاوه بر این، یک مدل آنتروپی اطلاعات، با استفاده از ارزش اطلاعات (5VOI) و آنتروپی تبدیل (6TE)، در یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای کاهش بار محاسباتی و اجازه کاوش کل فضای تصمیم‌گیری پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو (مکان‌های WQMS) با معاوضه بین VOI (بالاترین اطلاعات) و TE (کمترین هم پوشانی) ارائه می‌کند. نتایج این مطالعه نشان داد که تنها ۵ ایستگاه پایش با قرارگیری بهینه در کنار رودخانه، توانستند ۷۶ درصد از اطلاعات ۴۵ ایستگاه پایش را دریافت کنند. این امر به طور قابل توجهی هزینه‌های استقرار و نگهداری ایستگاه‌های نظارتی را کاهش می‌دهد. این رویکرد تخمین‌های بهبود یافته‌ای از کیفیت آب را به شیوه‌ای مقرون به صرفه ارائه می‌کند و می‌تواند به مناطق دیگر برای ایجاد یک تخمین مکانی و زمانی دقیق از WQMS بالقوه قابل انتقال باشد.

(Derikvandi et al. 2021) با استفاده از الگوریتمی بر اساس اصل حداکثر آنتروپی و بر مبنای شاخص آلودگی پارامترهای $Na, Ca, Mg, K, HCO_3, Cl, SO_4, EC, SAR, TH, TDS$ و pH نسبت به بهینه‌سازی شبکه پایش آب سطحی موجود در حوضه دز محدوده استان لرستان با ۱۸ ایستگاه در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ اقدام شد. ابتدا میانگین رتبه هر ایستگاه در ۱۰ سال آماری مذکور بدست آمد. سپس برای آنتروپی شبکه بر حسب تعداد ایستگاه و زمان مدل‌های مناسبی پیشنهاد شد. پس از برآزش بهترین مدل، نتایج نشان داد که

بر اساس پارامترهای SO_4 ، Cl ، HCO_3 ، K ، Na ، Ca ، Mg ، pH ، TH ، TDS ، SAR و EC به ترتیب تعداد ۹، ۹، ۷، ۱۱، ۱۱، ۱۱، ۱۰، ۷، ۱۰، ۱۰، ۱۰ و ۱۱ ایستگاه به عنوان ایستگاه‌های پایش کیفیت آب سطحی منطقه مورد مطالعه کفایت می‌کند.

Rajai et al. (2022) به مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های پایش کیفیت آب سیستم رودخانه‌ای با استفاده از آنتروپی انتقال اطلاعات گسسته در حوضه آبریز لواسانات و تهران- کرج پرداخت. در این پژوهش بهینه‌سازی با ۱۱ ایستگاه نمونه‌برداری و برای ۱۲ متغیر کیفی و کمی آب در یک دوره آماری ۲۱ ساله مدنظر بوده است. با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و با توجه به مصارف آب برای کشاورزی و شرب، وزن‌های متغیرها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice تعیین شد. همچنین مقدار فاصله بهینه از روش AHP فازی نیز محاسبه شد در ادامه با استفاده از نتایج گام قبلی و نیز استفاده از شاخص‌های دیگر همچون آنتروپی شانون و واریانس، سناریوهای مختلف جهت حذف یا افزایش تعداد ایستگاه‌های نمونه‌برداری معرفی و اجرا شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی رویکرد پیشنهادی در بهینه کردن تعداد و پراکندگی ایستگاه‌های پایش کمی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه‌ای می‌باشد.

بنابراین از مهمترین نوآوری‌های این پژوهش در نظر گرفتن بعد زمان است.

در فرایند بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی منابع آب شناسایی تعداد و موقعیت ایستگاه‌ها در هنگام مواجهه با حجم بالای داده‌ها در گستره زمانی مورد مطالعه اهمیت زیادی دارد. بر این اساس سه پارامتر متغیر کیفی مورد پایش، تعداد ایستگاه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های شبکه بهینه از ارکان اصلی این پژوهش هستند. با توجه به روش‌شناسی پژوهش در هر ایستگاه به تفکیک رتبه‌بندی و طی مراحل ۶۳ شاخص اختلال شانون محاسبه شد. بنابراین، در پژوهش حاضر فرایند بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی حوضه آبریز دز در محدوده استان لرستان با استفاده از اصل حداکثر شاخص اختلال شانون با رویکرد کاهش صورت می‌گیرد. مقدار شاخص اختلال شانون شبکه بر حسب تعداد ایستگاه‌ها در سالهای مختلف تعیین و سپس وابستگی زمانی آنها به دست خواهد آمد. بنابراین، از عامل زمان در فرایند بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه و داده‌ها

حوضه آبخیز دز دارای موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی است. دارای مساحت کل حدود ۲۱۷۲۵ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط حدود ۱۶۰۰ متر است. بارش متوسط سالانه در نواحی شمالی و شرقی حوضه دز نسبت به سایر مناطق حوضه بیشتر است. رودخانه دز در ابتدا از بهم پیوستن دو شاخه اصلی رودخانه تیره سیلاخور و ماربره در استان لرستان، شروع و سپس سرشاخه‌های دیگر رودخانه سپیددشت- سزار و سپیددشت- زاز رودخانه سزار به آن اضافه شده و سرانجام رودخانه دز در جنوب شرقی استان لرستان در محل رشته کوه زاگرس در محلی به نام تنگ پنج از اتصال دو رودخانه سزار و بختیاری تشکیل و وارد استان خوزستان می‌شود (Ahmadi et al., 2017). با توجه به توسعه کشاورزی در این منطقه، آب موجود بیشتر مصرف کشاورزی و تا حدی شرب دارد. در پژوهش حاضر به منظور تحلیل فضای-زمانی مقادیر پارامترهای SO_4 ، Cl ، HCO_3 ، K ، Na ، Ca ، Mg ، PH ، TH ، SAR ، EC ، TDS از داده‌های ثبت شده ۶۳ چاه، چشمه و قنات شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان در گستره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ بهره‌گرفته شده است (شکل ۱).

در پژوهش حاضر ضمن رفع کاستی‌های پژوهش‌های پیشین روشی ساده‌تر و اصولی‌تر برای رسیدن به شبکه بهینه ارائه شده است. در این پژوهش لزومی بر انجام فرایند سنگین کریجینگ فضایی-زمانی برای رسیدن به شبکه بهینه نیست و تنها با مدل‌سازی فضایی-زمانی آنتروپی می‌توان شبکه موجود را بهینه نمود. روش این پژوهش در راستای پژوهش Akbarzadeh and Ghahraman (2013) است؛ هر چند در این روش از ۱۲ پارامتر برای تعیین شبکه پایش بهینه استفاده شده است. در حالی که در آن پژوهش بهینه‌سازی شبکه پایش فقط بر اساس یک یا دو پارامتر انجام شده است. همچنین، در پژوهش حاضر شاخص اختلال شانون ۱۲ پارامتر در سالهای مختلف با هم مقایسه شده است. همچنین، پژوهش حاضر با پژوهش Yeh et al. (2011) شباهت‌هایی دارد؛ اما تفاوت‌هایی نیز بصورت زیر وجود دارد: ۱- در پژوهش آنان به دلیل کمبود ایستگاه، ایستگاه‌های جدید نیز پیشنهاد شده است؛ اما پژوهش حاضر فقط بر مبنای رویکرد کاهش داده است؛ ۲- آنان مدلی دو بعدی بر اساس تعداد ایستگاه و آنتروپی ارائه کردند؛ اما پژوهش حاضر بر اساس مدلی سه بعدی بر مبنای تعداد ایستگاه، زمان و اختلال شانون بیان شده است که دقت بالاتری دارد.

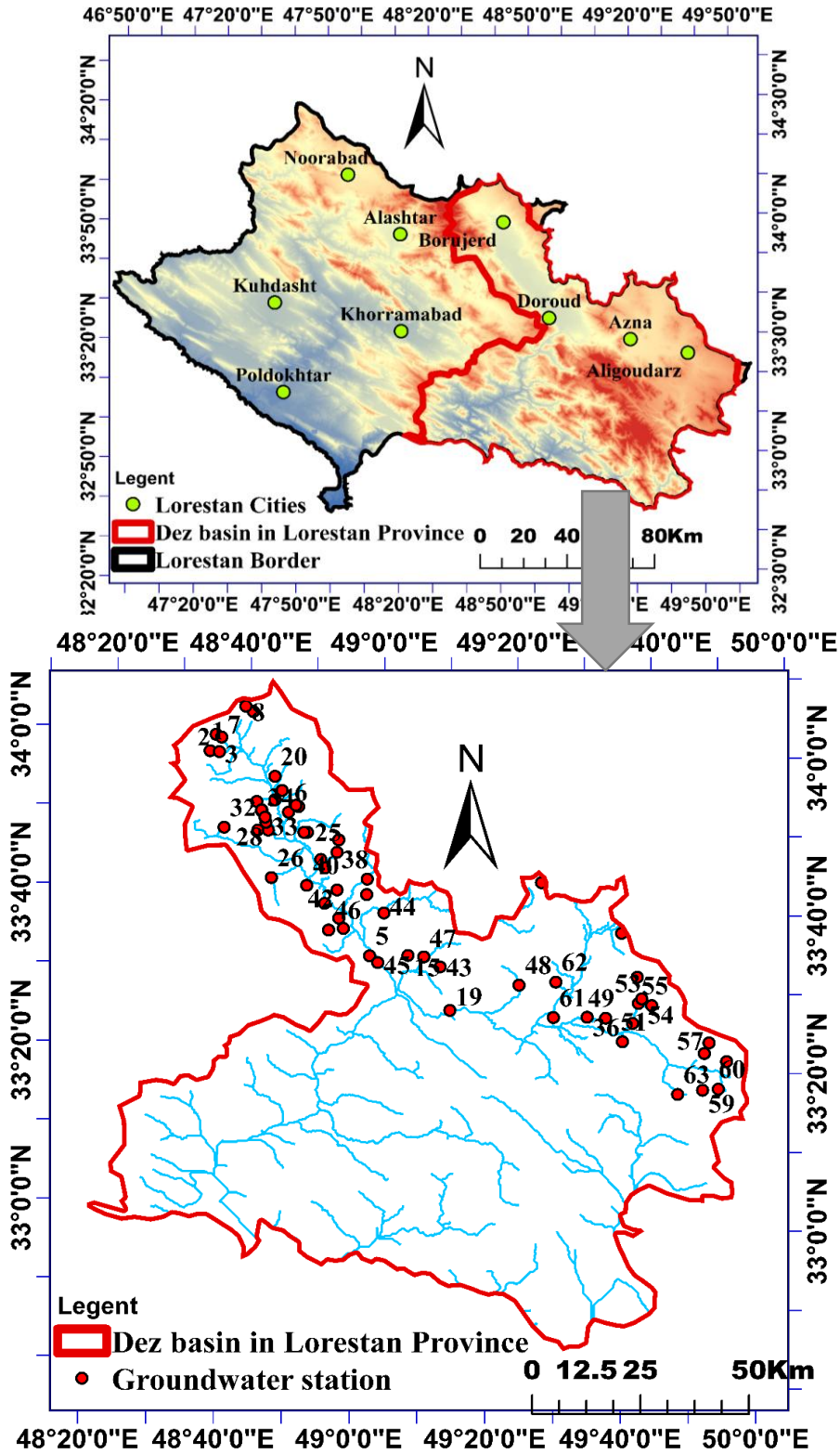


Fig. 1- Basin location and studied stations in Lorestan Province
 شکل ۱- موقعیت حوزه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان لرستان

در این مطالعه از داده‌های ۶۳ چاه، چشمه و قنات که مشخصات و موقعیت آنها در جدول ۱ و شکل ۱ آورده شده، استفاده شده است. داده‌های ناقص هر ایستگاه با استفاده از روش رگرسیون خطی بازسازی شدند و بهینه‌سازی با استفاده از داده‌های تکمیل شده انجام شد. بررسی‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای EXCEL، R 3.5.2 (کدنویسی فرمول‌ها و توابع) و MATLAB (برای ترسیم نمودارهای سه بعدی) و برای تهیه نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS 10.6 استفاده شده است.

۲-۲- تعیین شبکه بهینه

مراحل انجام پژوهش به طور خلاصه به شرح زیر است: فرایند تعیین شبکه بهینه برای هر سال آماری مطابق مراحل زیر صورت گرفت (Akbarzadeh and Ghahraman, 2013):

۱- از مجموعه ۶۳ ایستگاه پایش موجود برای آب زیرزمینی، شاخص اختلال شانون پیش‌بینی هر ایستگاه با حذف آن از شبکه و بر اساس مشاهدات ۶۲ ایستگاه محاسبه شد. سپس با برگرداندن ایستگاه حذف شده به شبکه، ایستگاه دیگری حذف شد و شاخص اختلال شانون شبکه موجود برآورد شد؛

۲- ایستگاهی که کمترین شاخص اختلال شانون پیش‌بینی را کسب کرد از شبکه حذف شد. رتبه این ایستگاه، به عنوان آخرین رتبه در نظر گرفته شد؛

۳- شاخص اختلال شانون پیش‌بینی هر یک از ۶۲ ایستگاه مشابه با تکرار مراحل ۱ و ۲ با حذف هر کدام و بر اساس مشاهدات ۶۱ محاسبه و ایستگاه دارای کمترین شاخص اختلال شانون پیش‌بینی حذف شد. سپس شاخص اختلال شبکه بدون آن محاسبه و رتبه ۶۲ به ایستگاه حذف شده نسبت داده شد؛

۴- رتبه‌بندی تمام ایستگاه‌ها طبق مراحل بالا انجام شد؛

۵- نمودار مقادیر شاخص اختلال تمامی شبکه‌ها نسبت به تعداد ایستگاه‌ها و زمان (سال) رسم شد؛

۶- در ادامه مدلی سه بعدی (شامل شاخص اختلال شبکه، تعداد ایستگاه و زمان) بر این نمودارها برازش داده شد. این نمودارها با توجه به تعداد ایستگاه‌ها و گستره زمانی مورد مطالعه دارای سه پارامتر دامنه (حدی از تعداد ایستگاه‌ها که از آن به بعد نمودار به حالت افقی در می‌آید. از این رو مقادیر بزرگتر از دامنه تأثیری بر شاخص اختلال شبکه ندارد)، برد یا سقف نمودار (مقدار بیشینه شاخص اختلال که پس

از آن نمودار به حد ثابتی می‌رسد)، و عرض از مبدأ (نقطه‌ای که مقدار شاخص اختلال شبکه از آن شروع می‌شود) است. از این رو دامنه این نمودار سه بعدی به عنوان تعداد بهینه ایستگاه‌های پایش در نظر گرفته شد.

۷- با توجه به رتبه‌بندی هر ایستگاه در ۱۰ سال آماری و دامنه بدست آمده از مرحله قبل شبکه بهینه پایش تعیین شد (شکل ۲).

۲-۳- شاخص اختلال شانون

شاخص اختلال شانون تفاوت بین حداکثر مقدار آنتروپی و مقدار واقعی آنتروپی در یک مجموعه داده است. مقدار داده‌های کیفی ایستگاه‌های منابع آب بر اساس متغیرهای مختلف متفاوت است بنابراین شاخص اختلال شانون تنوع آنتروپی را در مکان‌های مختلف بیان می‌کند هر چه این مقدار بیشتر باشد تنوع بالاتر است (Singh et al., 2019).

این شاخص بر پایه نظریه عدم اطمینان بنا شده و نشان‌دهنده تخمینی از میانگین درجه عدم اطمینان، در پیشگویی تعلق یک فرد است که به طور تصادفی از مجموعه‌ای با n فرد انتخاب شده است و از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Shannon Weaner, 1948):

۱- استانداردسازی داده‌ها از طریق فرمول زیر انجام می‌گیرد (Wu et al, 2011):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (1)$$

۲- شاخص اختلال شانون توسط معادله زیر محاسبه می‌شود (Djebou et al., 2014):

$$DI_a = H_{\max} - H_a = \log_2 N + \sum_{i=1}^n p_i \quad (2)$$

H_{\max} : حداکثر مقدار آنتروپی، H_a : مقدار واقعی آنتروپی در یک مجموعه داده، N : طول مجموعه داده، و P_i : احتمال وقوع مجموعه داده i .

۲-۴- اعتبارسنجی نتایج

در پژوهش حاضر، برای اعتبارسنجی از میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا که به ترتیب با روابط ۳ و ۴ نشان داده شده، استفاده شده است:

$$MSE = \frac{1}{mt} \sum_{t,m} (H(m, t) - \hat{H}(m, t))^2 \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{mt} \sum_{t,m} |H(m, t) - \hat{H}(m, t)| \quad (4)$$

Table 1- Characteristics of the stations studied in this research

جدول ۱- مشخصات ایستگاههای مورد مطالعه در این پژوهش

Selected Code	Station	Type **	X (UTM)	Y (UTM)	General area	Selected Code	Station	Type **	X (UTM)	Y (UTM)	General area
1	Cartil	1	48° 34' 28	33° 57' 43	Oshtorinan	34	Bradkel	1	48° 43' 12	33° 49' 38	Dorud-Borujerd
2	Qaed Taher	2	48° 35' 14	33° 59' 50	Oshtorinan	35	Hemianeh	2	48° 58' 57	33° 40' 25	Dorud- Borujerd
3	TodehZan	1	48° 35' 52	33° 57' 39	Oshtorinan	36	Shahrak Barun	3	49° 32' 38	33° 26' 7	Dorud- Borujerd
4	Goresme	2	48° 40' 38	34° 2' 56	Oshtorinan	37	HomehAligodarz	3	49° 39' 27	33° 25' 35	Dorud- Borujerd
5	Sanderkan	2	48° 59' 49	33° 32' 41	Oshtorinan	38	Bayatan	2	48° 58' 55	33° 42' 23	Dorud- Borujerd
6	Shisheh	1	48° 46' 40	33° 50' 25	Oshtorinan	39	Pahlevankal	2	48° 49' 56	33° 41' 14	Dorud- Borujerd
7	Char Bareh	4	48° 36' 5	33° 59' 30	Oshtorinan	40	Meidan	2	48° 49' 56	33° 41' 14	Dorud- Borujerd
8	Deh Yusuf Ali	4	48° 39' 28	34° 3' 34	Oshtorinan	41	Azna	2	48° 55' 44	33° 36' 0.2	Dorud- Borujerd
9	Dehriz	3	48° 38' 31	34° 4' 48	Oshtorinan	42	Kolanganeh	2	48° 54' 57	33° 37' 16	Dorud- Borujerd
10	Absardeh	1	48° 42' 14	33° 47' 57	Dorud- Borujerd	43	Soran	2	49° 10' 24	33° 31' 41	Dorud- Borujerd
11	Jahanabad	3	48° 48' 9	33° 51' 10	Dorud- Borujerd	44	Dokhaharan	1	49° 1' 39	33° 38' 12	Dorud- Borujerd
12	Zarem	3	48° 49' 38	33° 47' 59	Dorud- Borujerd	45	Siakaleh	2	49° 1' 5	33° 31' 53	Dorud- Borujerd
13	Arabab	3	48° 51' 51	33° 44' 37	Dorud- Borujerd	46	Azizabad	1	48° 53' 32	33° 35' 43	Dorud- Borujerd
14	ChalanCholCholan	3	48° 54' 30	33° 40' 50	Dorud- Borujerd	47	Zhan	2	49° 7' 54	33° 32' 53	Azna- Aligodarz
15	BahramAbad	3	49° 5' 33	33° 32' 58	Dorud- Borujerd	48	Zarnan	2	49° 22' 18	33° 29' 50	Azna- Aligodarz
16	Bolvar Imam	3	48° 45' 32	33° 53' 7	Dorud- Borujerd	49	Sharif Abad	2	49° 35' 25	33° 26' 6	Azna- Aligodarz
17	Sehrah Arak	3	48° 47' 44	33° 51' 20	Dorud- Borujerd	50	Galiyer	2	49° 37' 15	33° 36' 57	Azna- Aligodarz
18	Asadkhani	2	48° 49' 8	33° 47' 57	Dorud- Borujerd	51	Senj	2	49° 38' 3	33° 23' 12	Azna- Aligodarz
19	Dariab	1	49° 12' 10	33° 26' 14	Dorud- Borujerd	52	Mirvondeh	2	49° 39' 52	33° 31' 27	Azna- Aligodarz
20	Seh Asiabeh	3	48° 44' 22	33° 54' 52	Dorud- Borujerd	53	Mahmodabad	2	49° 40' 11	33° 28' 9	Azna- Aligodarz
21	Hajjabad	3	48° 52' 33	33° 43' 34	Dorud- Borujerd	54	Moshleh	2	49° 40' 39	33° 28' 44	Azna- Aligodarz
22	Khayan	2	48° 54' 24	33° 47' 12	Dorud- Borujerd	55	Shen	2	49° 42' 12	33° 27' 56	Azna- Aligodarz
23	ChoghaPahneh	3	49° 24' 57	33° 42' 56	Dorud- Borujerd	56	Joz	2	49° 50' 19	33° 22' 7	Azna- Aligodarz
24	Cheshmehghazi	1	48° 44' 33	33° 51' 53	Dorud- Borujerd	57	Gaikan	2	49° 50' 57	33° 23' 30	Azna- Aligodarz
25	Abbas Abad	2	48° 54' 13	33° 45' 37	Dorud- Borujerd	58	Gandomineh	2	49° 53' 40	33° 21' 12	Azna- Aligodarz
26	Safar Ali	1	48° 44' 36	33° 42' 0.1	Dorud- Borujerd	59	Fighan	3	49° 50' 16	33° 17' 27	Azna- Aligodarz
27	BanaFsheh	1	48° 42' 39	33° 50' 25	Dorud- Borujerd	60	ChamanSoltan	4	49° 52' 36	33° 17' 40	Azna- Aligodarz
28	Buriyabaf	1	48° 43' 47	33° 48' 0.1	Dorud- Borujerd	61	Jalesbar	3	49° 27' 38	33° 25' 54	Azna- Aligodarz
29	Neyzeh	1	48° 42' 38	33° 50' 33	Dorud- Borujerd	62	Gambeh	3	49° 27' 45	33° 30' 25	Azna- Aligodarz
30	Zereshkeh	1	48° 41' 50	33° 51' 34	Dorud- Borujerd	63	MoghanakSofla	3	49° 46' 35	33° 16' 48	Azna- Aligodarz
31	Karbalai Vali	1	48° 42' 38	33° 50' 32	Dorud- Borujerd						
32	Glem Souz	1	48° 37' 9	33° 48' 6	Dorud- Borujerd						
33	Keivere	1	48° 43' 22	33° 48' 59	Dorud- Borujerd						

** 1=Spring, 2= Qanat
3= Deep well, 4= Semideep well

۳-۲- مدل‌های آنتروپی شبکه ایستگاه‌ها

در جدول ۳ مقادیر شاخص اختلال شانون شبکه آورده شده است. برای درک بهتر نیز مقادیر جدول مذکور به صورت نمودار سه بعدی در شکل ۳ نمایش داده شده است. این نمودار بر اساس الگوریتم پیشنهادی و شامل مقادیر شاخص اختلال شانون شبکه در هر سال، پس از حذف یک ایستگاه در هر کدام از مراحل ۶۳ گانه می‌باشد. جدول مذکور نشان‌دهنده سیر نزولی شاخص اختلال شانون با کاهش ایستگاه‌های پایش است. به عبارتی با کاهش تعداد ایستگاه‌های هر شبکه، شاخص اختلال شانون کاهش یافته است. یعنی در شبکه اولیه قابلیت پیش‌بینی ایستگاه‌ها نیز کاهش می‌یابد. بررسی نمودار نیز نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش، مقدار شاخص اختلال شانون شبکه افزایش می‌یابد. اما این افزایش تا میزان معینی از تعداد ایستگاه خواهد بود و پس از آن افزایش شاخص اختلال شانون با افزایش یافتن تعداد ایستگاه‌ها، تغییر چندانی نمی‌کند.

که در آنها $H(m,t)$ و $\hat{H}(m,t)$ به ترتیب مقدار واقعی و برآورد شده شاخص اختلال شانون با m چاه، چشمه و قنات و در سال t است. هرچه مقدار این دو عدد کمتر و به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده این است که کار از دقت بالاتری برخوردار است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رتبه‌بندی ایستگاه‌ها

رتبه‌بندی ایستگاه‌ها در سالهای آماری مختلف و براساس پارامتر HCO_3 در جدول ۲ ارائه شده است. رتبه هر ایستگاه در سالهای آماری اغلب متفاوت است. این بدان معناست که مقادیر پراکندگی رتبه هر ایستگاه در سالهای آماری مختلف تفاوت معنی‌داری دارد. اگر به جای رتبه ایستگاه در سالهای مختلف میانگین آن تعیین شود، می‌تواند نماینده مناسبی برای آن باشد. در این راستا رتبه هر ایستگاه برابر میانگین رتبه آن در کل دوره آماری در نظر گرفته شد. از این رو سطر آخر جداول مقادیر میانگین ارائه شده است.

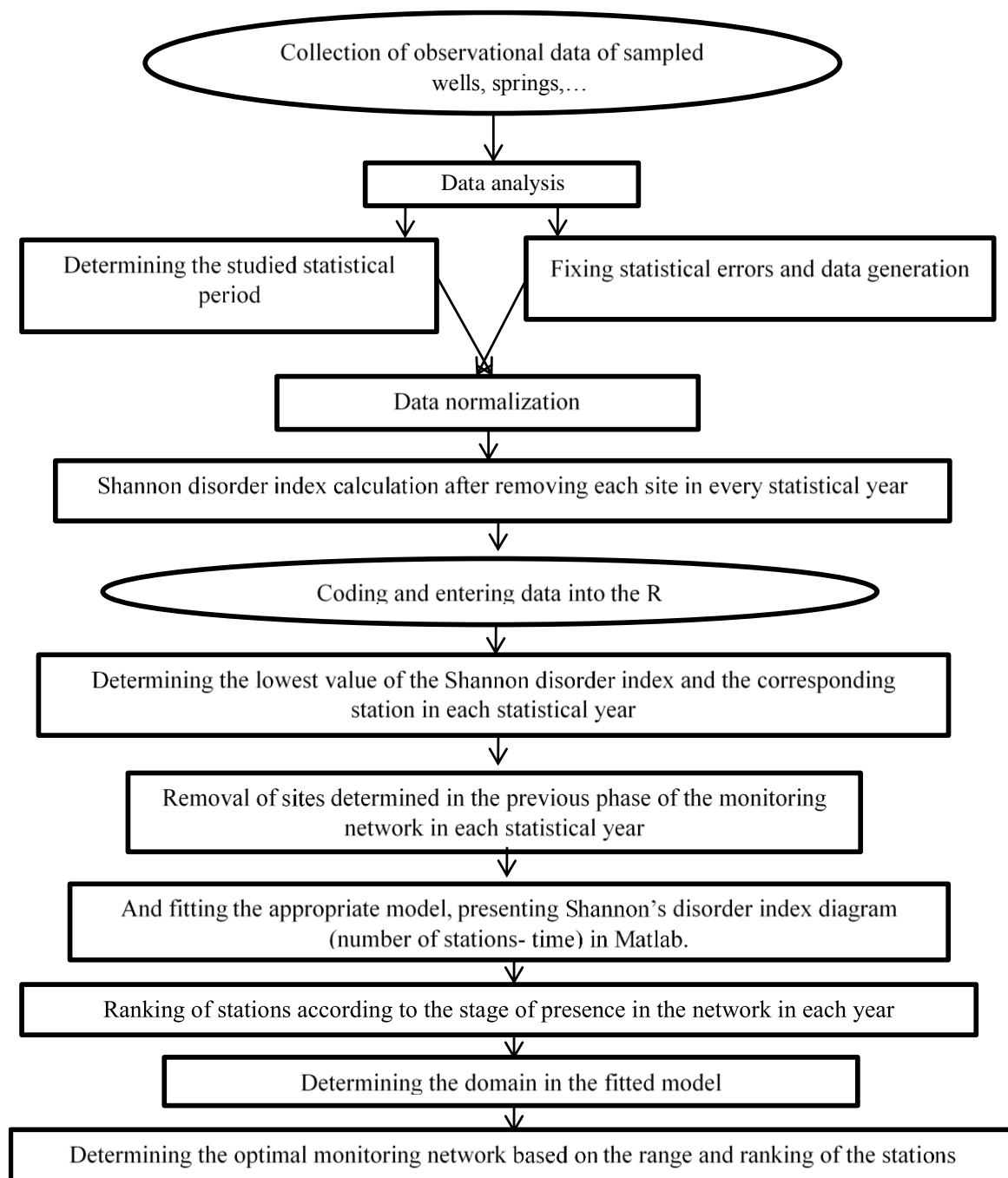


Fig. 2- Flowchart of the research steps

شکل ۲- نمودار جریانی مراحل پژوهش

به طور کلی شاخص اختلال شانون شبکه علاوه بر تعداد ایستگاه به عامل زمان نیز وابسته است. تفاوت شاخص اختلال شبکه در هر سال علاوه بر جداول، در شکل ۳ نیز دیده می‌شود. بنابراین، این عامل می‌تواند بصورت مدل درآید. یعنی وابستگی شاخص اختلال شبکه‌ها، در زمان‌های مختلف می‌تواند بصورت مدل درآید. نمودارها نشان‌دهنده آن است که تغییرات شاخص اختلال شانون در سالی خاص به شکل

این همان دامنه نمودار بر حسب تعداد ایستگاه است. همچنین از میان شاخص‌های کیفی ارزیابی شده در این منطقه، پارامتر پتاسیم (K) دارای بیشترین مقدار اختلال شانون است. بنابراین دارای حداکثر شاخص اختلال شانون و به عنوان شاخص برتر برگزیده شد.

تقریبی فراهم نمود. شبیه‌سازی مونت کارلو بیشتر برای توصیف روشی به منظور عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل به کار می‌رود. بنابراین مونت کارلو نوعی شبیه‌سازی است که به طور صریح و به صورت کمی، عدم قطعیت را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی مونت کارلو متکی به فرایند نمایش صریح عدم قطعیت با تعیین ورودی‌ها به عنوان توزیع‌های احتمال است. اگر ورودی‌های توصیف کننده یک سیستم غیرقطعی باشند، پیش‌بینی عملکرد پیش رو الزاماً غیر قطعی است، به این معنا که نتیجه هرگونه تحلیل مبتنی بر ورودی‌های نمایش داده شده با توزیع‌های احتمال، خود یک توزیع احتمال است. مراحل مختلف این روش به شرح زیر است:

- ۱- انتخاب نمونه‌های محدودی از پارامترهای ورودی مدنظر، ۲-
- تجزیه و تحلیل اطلاعات خام به دست آمده، ۳- تخمین و تعیین نوع توزیع آماری حاکم بر نمونه‌ها و به دست آوردن خصوصیات آماری آنها، ۴- تولید مقادیر تصادفی بر حسب نوع توزیع تطابق یافته و تعیین خصوصیات جدید آماری توزیع مربوط به پارامترهای ورودی، ۵-
- تخمین پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از مقادیر تصادفی تولید شده در مرحله قبل (Tobutt, 1982).

نمایی است، در حالی که تغییرات سالانه برای تعداد مشخصی از ایستگاه‌ها تقریباً خطی است. برای برازش مدل مناسب و جهت تعیین دامنه نمودار، سه مدل تفکیکی روی نمودار شکل ۳ برازش داده شد و مدل‌های پیشنهاد شده به ترتیب ضریبی، جمعی و ضریبی-جمعی به صورت روابط ۵ تا ۷ مشخص شدند. این سه مدل بر اساس مدل‌های نیم تغییرنمای فضایی- زمانی انتخاب شده است (Akbarzadeh and Ghahraman, 2013).

$$M_1: H(n, t) = ct(1 - \exp\{-\frac{n}{b}\}) + a \quad (5)$$

$$M_2: H(n, t) = a(1 - \exp\{-\frac{n}{b}\}) + ct \quad (6)$$

$$M_3: H(n, t) = a(1 - \exp\{-\frac{n}{b}\}) + ct + dt(1 - \exp\{-\frac{n}{b}\}) \quad (7)$$

که در آن $1 - \exp\{-\frac{n}{b}\}$ مدل نمایی و t مدل خطی است. همچنین در این معادلات، a عرض از مبدا، b دامنه، c شیب زمان، n تعداد ایستگاه‌ها، d شیب زمان و t زمان بر حسب سال است.

در معادلات فوق، پارامتر b (دامنه) به عنوان هدف اصلی این پژوهش برای تعیین تعداد ایستگاه‌های بهینه استفاده شده است. در این پژوهش از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. با استفاده از روش مونت کارلو می‌توان از طریق نمونه‌سازی آماری، برای مسائل کمی، پاسخ‌های

Table 2- Stations ranking for the studied periods based on HCO₃ parameters
جدول ۲- رتبه‌بندی ایستگاه‌ها در سال‌های آماری مختلف بر اساس پارامتر HCO₃

Mean1396	1395	1394	1393	1392	1391	1390	1389	1388	1387	Station Year/Code	Mean1396	1395	1394	1393	1392	1391	1390	1389	1388	1387	Station Year/Code		
24.7	25	24	27	14	21	32	21	15	23	45	17.8	34	4	2	2	16	2	16	36	17	28	1	
45.2	41	43	36	60	53	26	53	57	48	35	25.3	27	3	30	7	33	24	33	33	40	25	2	
25.4	16	13	22	1	60	25	60	24	5	28	28.4	28	51	24	11	22	3	22	47	32	63	3	
42.3	44	12	56	58	30	58	30	52	57	26	24.5	30	18	52	28	8	30	8	13	50	11	4	
16.8	31	11	18	20	9	11	9	5	25	29	24.7	23	62	28	4	25	29	25	10	8	36	5	
34.3	37	36	35	37	41	39	41	35	39	3	54.2	60	21	53	53	61	57	61	60	59	7	6	
40.2	5	61	55	43	47	47	44	51	2	39	41.8	49	57	62	15	50	10	50	56	31	41	7	
18.7	13	7	7	24	26	36	26	2	21	25	26.6	21	32	40	54	14	44	14	16	11	4	8	
16.3	20	2	8	23	11	22	11	12	14	40	38.1	4	25	50	34	31	54	31	43	49	6	9	
25.9	12	31	31	10	32	27	32	23	56	5	56.7	56	53	58	61	58	53	58	50	61	30	10	
31.1	18	35	29	33	36	41	36	34	37	12	25.2	36	50	16	3	12	51	12	32	16	31	11	
24.3	40	41	9	19	20	18	20	46	13	17	45.2	47	60	37	49	49	34	49	61	18	56	12	
29.6	6	34	3	46	44	35	44	6	44	34	32.3	14	55	17	29	28	40	28	28	33	45	13	
26.5	35	20	38	30	10	8	10	39	29	46	33.5	7	59	61	25	5	50	5	25	36	35	14	
39.4	53	40	15	51	46	17	46	48	28	50	17.8	34	4	2	2	16	2	16	36	17	28	15	
17.3	43	14	4	17	15	21	15	19	12	13	45.3	61	16	49	63	24	55	24	49	58	26	16	
19.3	2	22	11	31	27	16	27	4	10	43	17.1	26	17	23	8	13	14	13	9	6	29	17	
17.2	19	5	26	6	7	13	7	14	22	53	44.8	62	9	48	50	23	59	23	53	63	3	18	
19.7	52	33	13	35	4	9	4	11	20	16	42.3	11	44	47	57	40	49	40	51	52	2	19	
29.5	58	28	10	18	52	1	52	27	34	15	25.3	27	3	30	7	33	24	33	33	40	25	20	
23.5	51	27	14	26	3	52	3	18	19	22	20.6	46	19	1	9	29	12	29	21	3	40	21	
26.9	59	23	44	21	2	7	2	38	26	47	24.8	45	8	6	27	39	28	39	20	9	5	22	
23.9	24	42	12	22	38	6	38	17	30	10	48.9	50	52	63	52	35	62	35	62	15	63	23	
33.7	22	26	21	32	34	45	34	30	38	55	37.3	55	37	33	45	42	37	42	26	45	11	24	
39.5	9	6	60	55	63	23	63	42	55	19	41.3	33	58	5	41	56	43	56	31	54	36	25	
33.1	63	1	42	36	19	15	19	37	47	52	39	10	47	43	44	55	42	55	45	42	7	26	
21.8	15	30	57	16	18	20	18	3	27	14	47.9	42	46	39	47	54	60	54	55	41	41	27	
20.8	8	29	54	12	17	19	17	7	24	21	39.7	39	45	46	40	51	46	51	40	35	4	28	
28.7	48	49	20	62	1	33	1	29	43	1	28.7	3	39	32	39	48	48	48	22	2	6	29	
14.7	32	15	19	13	6	5	6	8	4	39	41.4	17	38	45	38	45	56	45	54	46	30	30	
13.9	1	10	25	5	37	4	37	1	1	18	48.9	38	56	41	56	62	31	62	59	53	31	31	
											55.6	54	54	51	48	57	61	57	58	60	56	32	

Table 3- Corresponding stations Shannon disorder with ignoring stations with the least Shannon disorder during 63 steps for each year based on HCO₃ parameter

جدول ۳- اختلال شانون ایستگاه‌ها متناظر با حذف ایستگاه‌های با کمترین اختلال شانون طی مراحل ۶۳ گانه در هر سال آماری

بر اساس پارامتر HCO₃

Mean	1396	1395	1394	1393	1392	1391	1390	1389	1388	1387	Station Yea/Code r	Mean	1396	1395	1394	1393	1392	1391	1390	1389	1388	1387	Station Yea/Code r
1.896	0.686	3.448	1.986	1.026	2.691	1.683	1.904	2.881	1.803	0.851	33	3.051	2.323	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.227	4.015	1
1.874	0.686	3.393	1.966	1.026	2.658	1.668	1.883	2.829	1.789	0.843	34	3.051	2.323	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.227	4.015	2
1.850	0.686	3.334	1.944	1.026	2.623	1.652	1.859	2.774	1.771	0.835	35	3.051	2.323	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.227	4.015	3
1.825	0.685	3.271	1.920	1.025	2.586	1.635	1.834	2.717	1.752	0.826	36	3.051	2.323	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.227	4.015	4
1.798	0.685	3.205	1.894	1.024	2.547	1.618	1.806	2.658	1.730	0.817	37	3.051	2.323	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.226	4.015	5
1.770	0.685	3.134	1.866	1.022	2.507	1.599	1.776	2.596	1.706	0.808	38	3.051	2.322	2.924	4.327	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.226	4.015	6
1.740	0.684	3.060	1.836	1.018	2.465	1.580	1.743	2.532	1.681	0.798	39	3.051	2.322	2.924	4.326	3.471	2.218	3.051	2.218	2.738	3.225	4.015	7
1.708	0.681	2.982	1.805	1.012	2.422	1.561	1.707	2.465	1.654	0.789	40	3.050	2.322	2.923	4.326	3.471	2.218	3.051	2.218	2.737	3.224	4.014	8
1.674	0.677	2.901	1.773	1.004	2.378	1.540	1.668	2.396	1.626	0.778	41	3.050	2.321	2.923	4.326	3.471	2.218	3.051	2.218	2.735	3.222	4.014	9
1.638	0.671	2.816	1.738	0.994	2.329	1.518	1.627	2.325	1.597	0.768	42	3.049	2.319	2.922	4.325	3.471	2.217	3.050	2.217	2.734	3.220	4.013	10
1.600	0.664	2.727	1.702	0.983	2.276	1.495	1.582	2.251	1.566	0.757	43	3.048	2.318	2.921	4.323	3.470	2.217	3.049	2.217	2.732	3.217	4.011	11
1.560	0.655	2.635	1.664	0.970	2.221	1.471	1.535	2.175	1.531	0.745	44	3.046	2.316	2.920	4.322	3.468	2.215	3.048	2.215	2.729	3.213	4.009	12
1.518	0.646	2.539	1.625	0.956	2.163	1.445	1.484	2.096	1.495	0.733	45	3.044	2.314	2.919	4.320	3.467	2.214	3.046	2.214	2.726	3.209	4.006	13
1.474	0.633	2.440	1.583	0.940	2.102	1.418	1.431	2.014	1.455	0.719	46	3.041	2.312	2.918	4.318	3.465	2.212	3.044	2.212	2.722	3.204	4.003	14
1.427	0.620	2.337	1.540	0.924	2.038	1.389	1.375	1.930	1.411	0.705	47	3.037	2.308	2.916	4.315	3.462	2.209	3.041	2.209	2.718	3.199	3.997	15
1.378	0.603	2.231	1.494	0.906	1.972	1.360	1.316	1.843	1.366	0.690	48	3.034	2.304	2.914	4.311	3.460	2.206	3.038	2.206	2.713	3.192	3.991	16
1.327	0.585	2.122	1.446	0.888	1.903	1.329	1.254	1.754	1.318	0.673	49	3.029	2.299	2.912	4.307	3.456	2.202	3.034	2.202	2.706	3.185	3.985	17
1.274	0.563	2.008	1.395	0.869	1.832	1.297	1.189	1.663	1.267	0.655	50	3.023	2.294	2.908	4.302	3.451	2.198	3.030	2.198	2.698	3.177	3.977	18
1.217	0.539	1.891	1.338	0.848	1.755	1.263	1.121	1.568	1.215	0.636	51	3.017	2.288	2.904	4.296	3.445	2.192	3.025	2.192	2.689	3.168	3.969	19
1.159	0.513	1.771	1.277	0.827	1.674	1.227	1.050	1.472	1.161	0.616	52	3.010	2.281	2.900	4.288	3.438	2.186	3.020	2.186	2.679	3.159	3.959	20
1.096	0.485	1.647	1.208	0.803	1.584	1.189	0.976	1.371	1.106	0.594	53	3.001	2.274	2.894	4.280	3.428	2.177	3.014	2.177	2.667	3.148	3.948	21
1.027	0.454	1.518	1.132	0.775	1.482	1.129	0.899	1.266	1.047	0.572	54	2.991	2.266	2.888	4.271	3.417	2.168	3.008	2.168	2.655	3.137	3.936	22
0.952	0.420	1.385	1.050	0.745	1.361	1.051	0.819	1.156	0.984	0.548	55	2.034	0.686	3.765	2.101	1.027	2.895	1.792	2.035	3.254	1.879	0.903	23
0.871	0.382	1.247	0.963	0.712	1.229	0.961	0.736	1.041	0.913	0.523	56	2.026	0.686	3.752	2.096	1.027	2.885	1.784	2.027	3.230	1.876	0.901	24
0.784	0.341	1.106	0.868	0.674	1.086	0.861	0.647	0.922	0.836	0.495	57	2.018	0.686	3.737	2.088	1.027	2.872	1.776	2.017	3.203	1.872	0.897	25
0.690	0.297	0.950	0.763	0.629	0.934	0.753	0.555	0.798	0.753	0.465	58	2.008	0.686	3.719	2.080	1.027	2.856	1.767	2.007	3.172	1.867	0.894	26
0.588	0.249	0.782	0.648	0.575	0.774	0.634	0.459	0.667	0.661	0.433	59	1.996	0.686	3.695	2.071	1.027	2.838	1.757	1.996	3.139	1.861	0.889	27
0.475	0.197	0.600	0.519	0.503	0.602	0.509	0.358	0.528	0.543	0.392	60	1.983	0.686	3.665	2.060	1.027	2.818	1.746	1.984	3.103	1.854	0.884	28
0.341	0.140	0.409	0.378	0.369	0.421	0.367	0.254	0.375	0.402	0.296	61	1.968	0.686	3.630	2.048	1.027	2.797	1.735	1.971	3.064	1.846	0.878	29
0.184	0.074	0.208	0.210	0.196	0.233	0.196	0.135	0.201	0.222	0.164	62	1.952	0.686	3.591	2.035	1.027	2.773	1.723	1.957	3.022	1.837	0.872	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	1.935	0.686	3.547	2.020	1.027	2.748	1.710	1.941	2.978	1.826	0.865	31
												1.916	0.686	3.500	2.004	1.027	2.721	1.697	1.924	2.931	1.815	0.858	32

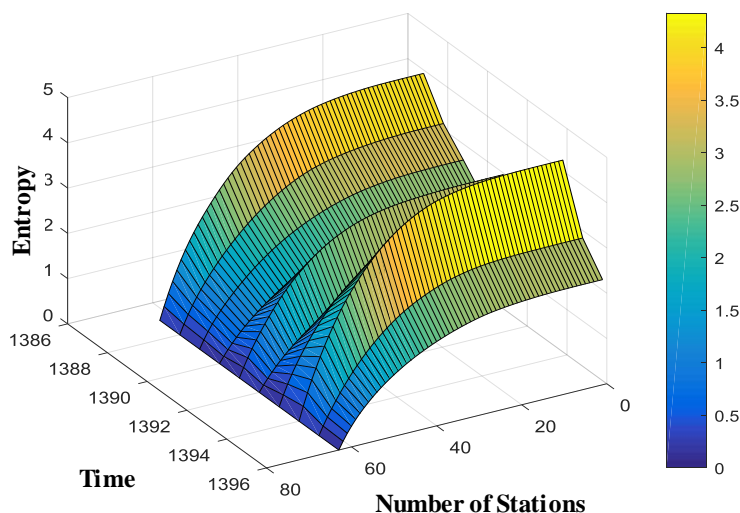


Fig. 3- Stations Shannon disorder figure based on HCO_3 parameter
 شکل ۳- نمودار اختلال شانون ایستگاه‌ها بر اساس پارامتر HCO_3

از پارامترهای مدل‌های معرفی شده به دست آورد. در جدول ۴ مقادیر پارامترها و میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا برای هر مدل آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای پارامتر SO_4 مدل M1 با کمترین مقادیر MAE و MSE، مدل M1، HCO_3 مدل M2، K مدل M1، Na مدل M1، Ca مدل M2، Mg مدل M1، pH مدل M1، TDS مدل M1، TH مدل M1، SAR مدل M2 و EC مدل M1 نسبت به سایر مدل‌ها به عنوان مدل‌های منتخب برگزیده شدند (مشابه رسم شکل). اما آنچه در این پژوهش مورد توجه است دامنه مدل منتخب می‌باشد به وسیله این عدد می‌توان تعداد بهینه ایستگاه‌ها را در شبکه موجود تعیین نمود این مقدار برای پارامتر SO_4 ۳۳، Cl ۳۴، HCO_3 ۴۱، K ۲۴، Na ۴۰، Ca ۳۴، Mg ۳۰، pH ۴۳، TDS ۳۳، TH ۳۳، SAR ۴۱ و EC ۲۸ بدست آمده که نشان دهنده تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای کسب بیشترین اطلاعات در شبکه پایش است.

۳-۳- انتخاب مناسب‌ترین شبکه

پس از تعیین تعداد ایستگاه‌ها برای شبکه بهینه به منظور مشخص نمودن موقعیت ایستگاه‌ها با مرتب کردن میانگین رتبه آنها (مشابه پارامتر HCO_3 ارائه شده در جدول ۲) تعداد ایستگاه‌ها بر اساس پارامترهای SO_4 ، Cl ، HCO_3 ، K ، Na ، Ca ، Mg ، pH ، TH ، TDS ، SAR و EC به ترتیب تعداد ۳۳، ۳۴، ۴۱، ۴۰، ۳۴، ۳۰، ۴۳، ۳۳ و ۳۳ ایستگاه که کمترین مقدار میانگین رتبه را دارند به عنوان ایستگاه‌های منتخب برگزیده شدند (شکل ۱ و جدول ۱).

با توجه به وجود پارامترهای a، b، c و d، فقط در مدل M_3 بهینه‌سازی آن مدل به داده‌های بدست آمده دشوار است از این‌رو از روش حداقل مربعات استفاده شد. این روش در دستگاه معادلاتی به کار می‌رود که تعداد معادلات آن بیش از تعداد مجهولات است. در این روش با استفاده از تکرار عددی (مونت کارلو). پارامترها به گونه‌ای به دست آمده که رابطه ۸ کمینه شد (Akbarzadeh and Ghahraman, 2015):

$$\sum_{t,n} (H(n,t) - \hat{H}(n,t))^2 \quad (8)$$

که در آن $H(n,t)$ و $\hat{H}(n,t)$ به ترتیب مقادیر واقعی (مقدار آنتروپی شبکه) و برآورد شده از هر یک از مدل‌های معادلات ۵، ۶ و ۷ است. این بدان معناست که در هر زمان (t) و برای هر تعداد (n) در رابطه ۸ برای مقادیر مختلف پارامترهای مدل (در هر مدل) مقدار $\hat{H}(n,t)$ بدست آمده و با مقدار $H(n,t)$ (مقدار آنتروپی شبکه در زمان t و تعداد n). مقایسه گردد $(H(n,t) - \hat{H}(n,t))$. مربع این مقدار $(H(n,t) - \hat{H}(n,t))^2$ به عنوان مربع باقیمانده شناخته می‌شود. با جمع این مقادیر مجموع مربع باقیمانده‌ها یا خطا (رابطه ۸). بدست می‌آید. در این میان پارامترهایی به عنوان پارامتر نهایی برگزیده می‌شوند که این رابطه را کمینه کنند.

مقدار تابع هدف بهینه بصورتی انتخاب شده که تعداد ایستگاه می‌توانسته هر عددی بین ۱ تا ۶۳ را شامل شود. هر کدام از معادلات ۵، ۶ و ۷ تابع هدف هستند. این توابع برآورد شد و در جداول ۴، با هم مقایسه شد. برای بدست آوردن سایر پارامترها نیز فاصله‌ای از صفر تا بی‌نهایت تعریف شد تا بتوان به وسیله تکرارهای متعدد جوابی منطقی

Table 4- Estimation of the model parameters and their evaluation results for groundwater based on Shannon disorder index

جدول ۴- برآورد پارامترهای مدلها و نتایج ارزیابی آنها برای آب زیرزمینی بر اساس روش شاخص اختلال شانون

Based on parameter	a	b	c	d	MSE	MAE	Parameter
							Model
So4	5.477	32.623	1×10^{-5}	-	8.304	2.168	M1
So4	0.541	32.513	3.77×10^{-3}	-	8.702	2.240	M2
So4	1.002	32.706	3.50×10^{-3}	1.15×10^{-6}	9.09	2.299	M3
Cl	3.692	33.661	1×10^{-3}	-	6.726	2.139	M1
Cl	3.004	33.941	2.52×10^{-3}	-	7.571	2.246	M2
Cl	2.922	33.174	2.44×10^{-3}	8.96×10^{-6}	7.522	2.243	M3
Hco3	4.000	40.259	1×10^{-5}	-	3.661	1.640	M1
Hco3	4.000	40.993	3.02×10^{-4}	-	2.973	1.437	M2
Hco3	4.001	40.992	9.31×10^{-5}	1.90×10^{-5}	3.064	1.471	M3
K	8.02	23.552	1×10^{-5}	-	12.358	2.366	M1
K	5.445	23.661	2×10^{-4}	-	13.884	3.441	M2
K	3.222	23.550	1×10^{-4}	2.44×10^{-5}	13.514	3.241	M3
Na	9.000	39.259	1×10^{-5}	-	12.917	2.694	M1
Na	7.029	39.633	1.99×10^{-3}	-	13.837	3.114	M2
Na	0.785	39.663	1.75×10^{-3}	2.09×10^{-3}	13.380	3.253	M3
Ca	1.099	33.268	6.71×10^{-4}	-	1.412	0.964	M1
Ca	1.000	33.855	9.77×10^{-4}	-	1.340	0.961	M2
Ca	1.001	33.757	9.77×10^{-4}	7.03×10^{-7}	1.341	0.962	M3
Mg	3.064	29.612	1.005×10^{-6}	-	2.094	1.114	M1
Mg	3.000	29.980	9.38×10^{-4}	-	3.715	1.552	M2
Mg	0.812	29.865	1.58×10^{-3}	1.02×10^{-3}	3.407	1.472	M3
pH	1.000	42.248	1.03×10^{-5}	-	0.701	0.754	M1
pH	1.010	42.428	1.98×10^{-4}	-	0.774	0.742	M2
pH	1.000	42.059	9.97×10^{-5}	1.95×10^{-7}	0.794	0.425	M3
TDS	2.648	32.791	1×10^{-5}	-	1.762	1.014	M1
TDS	2.000	32.909	1.12×10^{-3}	-	2.607	1.278	M2
TDS	2.026	32.713	1.01×10^{-3}	1.22×10^{-4}	2.714	1.307	M3
TH	2.009	32.762	7.43×10^{-4}	-	3.071	1.487	M1
TH	2.000	32.869	1.35×10^{-3}	-	3.395	1.550	M2
TH	2.005	32.245	9.74×10^{-4}	1.36×10^{-4}	3.687	1.617	M3
SAR	9.000	40.922	1.88×10^{-7}	-	15.315	4.002	M1
SAR	8.021	40.556	1.48×10^{-3}	-	15.351	4.226	M2
SAR	5.321	40.369	1.22×10^{-3}	2.36×10^{-5}	15.772	4.514	M3
EC	2.093	27.425	3.46×10^{-4}	-	2.214	1.244	M1
EC	1.014	27.426	1.47×10^{-3}	-	2.315	1.265	M2
EC	0.0000283	27.613	1.18×10^{-3}	6.30×10^{-4}	2.552	1.347	M3

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نظر به اینکه اجرای برنامه‌های پایش منابع آب هزینه‌بر و نیاز به صرف وقت است، بررسی روشی برای بهینه‌سازی شبکه موجود ضروری است. در فرآیند بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی، شناسایی تعداد و موقعیت چاهها در هنگام مواجهه با حجم بالای داده‌ها در گستره زمانی مورد پژوهش حائز اهمیت است. یعنی باید بررسی شود حداقل چه میزان چاه، چشمه و قنات در سطح منطقه مورد مطالعه لازم است تا بیشترین اطلاعات را در مورد نوسانات آلودگی در اختیار قرار دهد. در پژوهش‌های پیشین مبنای کار با توجه به نوع شبکه، تعداد و پراکندگی ایستگاه‌های موجود و رویکرد مدیرتی در بهینه‌سازی بوده است. در این پژوهش در رسیدن به پایش اصولی کیفیت آب منابع آب زیرزمینی، از داده‌های ۱۲ متغیر که اهمیت آن در آلودگی مورد تأکید بوده استفاده شده است.

نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج (Ghahraman 2013) و Akbarzadeh and Ghahraman (2015) همخوانی دارد. در این پژوهش تعداد ۱۲ پارامتر برای تعیین شبکه پایش بهینه استفاده شده است، در حالی که در پژوهش‌های قبلی بهینه‌سازی شبکه پایش فقط بر اساس یک یا دو پارامتر انجام شده است. همچنین در پژوهش حاضر اختلال شانون ۱۲ پارامتر در سالهای مختلف با هم مقایسه شده است. از طرفی نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر با پژوهش (Yeh et al. 2011) شباهت‌هایی دارد. اما تفاوت‌هایی نیز وجود دارد: به این صورت که در آن پژوهش، به دلیل کمبود ایستگاه، ایستگاه‌های جدید نیز پیشنهاد شده است. اما پژوهش حاضر فقط بر مبنای رویکرد کاهشی بوده است. علاوه بر این در آن پژوهش، مدلی دو بعدی بر اساس تعداد ایستگاه و آنتروپی ارائه شده است، اما پژوهش حاضر، بر اساس مدلی سه بعدی بر مبنای تعداد ایستگاه، زمان و اختلال شانون است که احتمالاً از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به اینکه اجرای برنامه‌های پایش منابع آب، هزینه‌بر و نیاز به صرف وقت دارد. بررسی روشی برای بهینه‌سازی شبکه موجود ضروری است. در فرآیند بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی منابع آب، شناسایی تعداد و موقعیت ایستگاه‌ها در هنگام مواجهه با حجم بالای داده‌ها در گستره زمانی مورد مطالعه اهمیت زیادی دارد. بر این اساس، پارامترهای شاخص کیفی مورد پایش، تعداد ایستگاه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های شبکه بهینه از ارکان اصلی این پژوهش هستند. بنابراین، با توجه به روش پژوهش، در هر ایستگاه به تفکیک، رتبه‌بندی صورت گرفته و طی مراحل ۶۳ گانه، اختلال شانون شبکه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، اختلال شانون

شبکه افزایش می‌یابد (یعنی شبکه اولیه با ۶۳ ایستگاه بیشترین شاخص اختلال شانون را دارد). تا جایی که دیگر افزایش چشمگیری نخواهد داشت و تغییرات آن با افزایش تعداد ایستگاه‌ها مدل‌نمایی به خود گرفته است. سپس با حذف هریک از ایستگاه‌ها و کم شدن تعداد ایستگاه‌ها، اختلال شانون نیز کاهش می‌یابد. این روند برای تمام پارامترهای ذکر شده است. مهمترین پارامتر مدل منتخب دامنه (تعداد ایستگاه) است. این پارامتر برای $SO_4=32.623$ ، $Cl=33.661$ ، $Ca=39.259$ ، $Na=23.552$ ، $K=40.993$ ، $HCO_3=32.762$ ، $TDS=32.791$ ، $pH=42.248$ ، $Mg=29.612$ ، 33.855 ، $TH=40.922$ و $EC=27.425$ است.

این مقادیر بدان معناست که بر اساس پارامتر SO_4 پس از حدود ۳۳ ایستگاه، $Ca=40$ ، $Na=24$ ، $K=41$ ، $HCO_3=34$ ، $Cl=34$ و $SAR=41$ ، $Th=33$ ، $TDS=33$ ، $ph=43$ ، $Mg=30$ ، 34 و $EC=28$ میزان شاخص اختلال شانون شبکه افزایش چشمگیری نخواهد داشت. از این رو تعداد ایستگاه‌های شبکه بهینه را می‌توان با توجه به دامنه بدست آمده در مدل محاسبه نمود. با توجه به مقدار اعشاری بدست آمده، برای اطمینان بیشتر از سطح اطلاعات موجود در شبکه تعداد ایستگاه‌های شبکه بهینه برای $SO_4=33$ ، $Cl=34$ ، $Ca=34$ ، $Na=40$ ، $K=24$ ، $HCO_3=41$ ، 34 ، 30 ، $ph=43$ ، $TDS=33$ ، $Th=33$ و $SAR=41$ و $EC=28$ پیشنهاد شد. در پژوهش حاضر تأثیر زمان در بهینه‌سازی شبکه اعمال شد که به عنوان اصلی ترین دستاورد پژوهش به شمار می‌رود. همچنین اختلال شانون ۱۲ پارامتر ذکر شده نیز با هم مقایسه و پتاسیم (K) دارای حداکثر مقدار و به عنوان شاخص برتر انتخاب شد. ناقص بودن آمار ایستگاه‌ها در بعضی از سالها و استفاده از روشهای بازسازی آمار برای تکمیل داده‌ها، همچنین عدم دسترسی به آمار پارامتر نیترات از پارامترهای مهم کیفی آلودگی آب از محدودیت‌های این پژوهش هستند. با توجه به این که در بسیاری از حوضه‌های آبخیز، ممکن است تعداد ایستگاه‌های سنجش پارامترهای کیفیت آب برای اهداف مختلف کم باشد، سازمان‌های مختلف ممکن است تمایل به تأسیس ایستگاه‌های جدیدی داشته باشند لذا پیشنهاد می‌شود با استفاده از شاخص اختلال شانون و مدل‌های فضایی- زمانی نسبت به گسترش مناسب ایستگاه‌ها اقدام نمود.

۵- سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان بخاطر در اختیار قرار دادن داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، تشکر به عمل می‌آید.

پی نوشتها

- 1- Empirical Bayesian Kriging
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Bayesian Maximum Entropy
- 4- Water Quality Monitoring Stations
- 5- Value of Information
- 6- Entropy Transform
- 7- Analytical Hierarchy Process

۶- مراجع

- Ahmadi F, Radmanesh F, Parham Gh, and Mirabasi Najafabadi R (2017) Application of Archimedean joint functions in flood frequency analysis of Dez catchment. *Iranian* 48(3):1031-1045 (Persian)
- Akbarzadeh M and Ghahraman B (2013) A combined strategy of Entropy and spatio-temporal Kriging in determining optimal network for ground water quality monitoring of Mashhad basin. *Journal of Water and Soil* 27(3):613-629 (Persian)
- Akbarzadeh M, Ghahraman B, And Davari K (2015) Optimization of Mashhad aquifer groundwater quality monitoring network using spatio-temporal modeling. *Iran-Water Resources Research* 12(1):133-144
- Changhyoun L, Kyungrock P, Do Guen Y, Joong Hoon K (2014) Efficient method for optimal placing of water quality monitoring stations for an ungauged basin. *Journal of Environmental Management* 132(4):24-31
- Djebou D C S, Singh VP, Frauenfeld OW (2014) Analysis of watershed topography effects on summer precipitation variability in the southwestern United States. *Journal of Hydrology* 511:838-849
- Derikvandi M, Zeinivand H, Tahmasebipour N, and Haghizadeh A (2021) Application of principle of maximum entropy in determining the optimum number of surface water quality monitoring stations. *Iran Water and Soil Research* 52(3):783-794 (In Persian)
- Ghorbani Mooselu1 M, Liltved H, Nikoo M R, Hindar A, Meland S (2021) Assessing optimal water quality monitoring network in road construction using integrated information-theoretic techniques. *Journal of Hydrology* 589(2020):125-366
- Rajai T, Masoumi F, Ahmadi Siavashani F S (2022) Optimal location of river system water quality monitoring stations using discrete information transfer entropy. *Iran Irrigation and Drainage Journal* 15(2):295-306 (In Persian)
- Shannon C E (1948) A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27(4):623-656
- Tobutt D (1982) Monte Carlo simulation methods for slope stability. *Computers & Geosciences* 8(2):199-208
- Salmana R, Nikoob MR, Shojaezadehc Sh, Hatami P, Beigloud B, Sadeghe M, Adamowskif JF, Alamdari N (2021) A novel Bayesian maximum entropy-based approach for optimal design of water quality monitoring networks in rivers. *Journal of Hydrology* 603(2021):126-822
- Singh KR, Ajays RD, Kumar KB (2019) An investigation on water quality variability and identification of ideal monitoring locations by using entropy based disorder indices. *Science of the Total of Environment* 647(2019):1444-1455
- Wu JP, Li H, Qian M (2011) Groundwater quality in Jingyuan County, a semi-humid area in Northwest China. *E-Journal of Chemistry* 8(2):787-793
- Yeh HC, Chen YC, Wei C, and Chen RH (2011) Entropy kriging approach to rain fall network design. *Journal of Paddy and Water Environment* 9(3):343-355