



Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network in Mashhad City Aquifer Using Spatial-Temporal Modeling

M. Akbarzadeh¹, B. Ghahraman^{2*} and K. Davary³

Abstract

Optimization of monitoring network is the best possible process for decision-making among existing networks. Considering economical objectives and for reducing the cost of monitoring, optimization approach is based on decreasing monitoring stations in this study. Using an algorithm based on entropy and nitrate pollution index, optimizing the monitoring network was conducted with 287 wells in the period of 2002 to 2011. First, the average of each station rank was calculated based on statistical years. Then, some models were proposed for the network entropy in terms of station numbers and time. After fitting the best network entropy model, the results showed that 111 wells are sufficient as groundwater quality monitoring stations for Mashhad aquifer. In order to approve the proposed network, 111 random networks were selected in each year, and by comparing the entropy of those networks to the proposed network, the performance of selected network was confirmed. Also, the selected network performance was confirmed for the future of Mashhad aquifer.

Keywords: Pollution, Nitrate, Algorithm, Entropy, Kriging

Received: October 11, 2015

Accepted: February 24, 2016

بهینه‌سازی شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد با استفاده از مدل‌سازی فضایی-زمانی

مسلم اکبرزاده^۱، بیژن قهرمان^{۲*} و کامران داوری^۳

چکیده

بهینه‌سازی شبکه پایش، یک فرآیند تصمیم‌گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود است. به دلیل ملاحظات اقتصادی و کاستن از هزینه‌های پایش، رویکرد بهینه‌سازی در این پژوهش، کاهش ایستگاه‌های پایش است. با استفاده از الگوریتمی براساس معیارهای آنتروپی و برمبنای شاخص آلودگی نترات، نسبت به بهینه‌سازی شبکه پایش موجود با ۲۸۷ حلقه چاه در دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ اقدام شد. ابتدا میانگین رتبه هر ایستگاه در ۹ سال آماری بدست آمد. سپس برای آنتروپی شبکه برحسب تعداد ایستگاه و زمان مدل‌هایی پیشنهاد شد. پس از برازش بهترین مدل، نتایج نشان داد که تعداد ۱۱۱ حلقه چاه به عنوان ایستگاه‌های پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد کفایت می‌کند. به منظور تأیید شبکه پیشنهاد شده، با مقایسه آنتروپی شبکه مذکور با آنتروپی شبکه‌هایی تصادفی با تعداد ۱۱۱ حلقه چاه در هر سال آماری، کارایی شبکه منتخب تأیید شد. همچنین میزان کارایی شبکه منتخب برای آینده آبخوان مشهد نیز مورد تأیید قرار گرفت.

کلمات کلیدی: آلودگی، نترات، الگوریتم، آنتروپی، کریجینگ

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۷/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۵

1- PhD Student, Irrigation and Drainage, International Campus, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. Email: bijangh@um.ac.ir

3- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کاندیدای دکتری آبیاری و زهکشی، پردیس بین الملل دانشگاه فردوسی مشهد

۲ و ۳- اساتید گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول

است. در این الگوریتم‌ها، طی مراحل ایستگاه‌های پایش از نظر دربرداشتن اطلاعات رتبه‌بندی می‌شوند. سپس با در نظر گرفتن اطلاعات مشترک تلاش شده است تا ایستگاه‌های اضافی به گونه‌ای حذف شوند که علاوه بر کنار گذاشتن اطلاعات مازاد، اطلاعات لازم نیز از دست نرود. در برخی از این پژوهش‌ها که غالباً رویکرد کاهشی دارند، ابتدا تعدادی ایستگاه بالقوه در شبکه موجود است که با استفاده از الگوریتم آنتروپی، حداکثر تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای قرار گرفتن در شبکه بهینه دست می‌آید. سپس با الگوریتمی دیگر، موقعیت ایستگاه‌هایی که در شبکه بهینه قرار می‌گیرند تشخیص داده می‌شود یعنی موقعیت‌های بهینه از میان ایستگاه‌های بالقوه غربال می‌شوند. در برخی دیگر از پژوهش‌ها، ایستگاه‌های بالقوه از ابتدا موجود نیست، لذا در مرحله اول تعداد آنها با آنتروپی تعیین می‌شود و در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم آنتروپی، فرآیند بهینه‌سازی صورت می‌پذیرد. رویکرد این دسته از پژوهش‌ها غالباً افزایشی است به طوری که ابتدا ایستگاه‌های پیشنهادی با سایر ایستگاه‌ها برآورد می‌شوند. در این صورت اگر قابلیت پیش‌بینی داشته باشند لزومی به قرارگیری آنها در شبکه بهینه نیست. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این خصوص می‌توان به پژوهش (Yeh et al. 2011) با رویکرد افزایشی-کاهشی (جابجایی) اشاره نمود که اقدام به مکان‌یابی و تعدیل ایستگاه‌های باران‌سنجی نمودند. آنان با بلوک‌بندی منطقه، مرکز هر بلوک را برای قرارگیری در شبکه کاندید نمودند، سپس الگوریتمی را برای افزودن ایستگاه به شبکه پایش بهینه پیشنهاد دادند. آنان از این الگوریتم علاوه بر ارزش‌گذاری ایستگاه‌ها، برای حذف ایستگاه‌های بالقوه (موجود) و ارائه شبکه بهینه با رویکرد کاهشی استفاده کردند. از مهمترین نقدهای وارده به این پژوهش عدم توجه به روند زمانی داده‌ها در فرآیند بهینه‌سازی است. با توجه به اینکه در امر ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه‌های پایش، داده‌ها از نوع فضایی و زمانی هستند، مهم‌ترین رکن، استفاده از معیارهای آماری مناسب در این خصوص است.

Yakirevich et al. (2013) نیز برای بررسی و ارزیابی شبکه پایش، با فرض نرمال بودن توزیع داده‌های کیفی آب زیرزمینی از مدل تعدیل یافته آنتروپی شانون به نام اطلاع کولبک (Kullback Information) استفاده کردند. به پژوهش‌هایی از این دست نیز می‌توان نقدهایی وارد دانست زیرا علاوه بر اینکه توسعه پیش‌فرض‌ها در هر پژوهشی نشانه ضعف آن پژوهش است، یکی از پیش‌فرض‌های آنان نرمال بودن داده‌ها می‌باشد حال آنکه همیشه حجم داده‌ها در بعد زمان و مکان زیاد نیست و لزوماً توزیع آنها نرمال نمی‌باشد. به عبارت دیگر در حجم نمونه زیاد می‌توان از توزیع نرمال به عنوان ابزاری برای تسهیل عملیات ریاضی استفاده نمود. این

"پایش" فرآیندی نظارتی با طرحی علمی و پویا بر مبنای مشاهده، اندازه‌گیری، نمونه‌برداری و ارزیابی نتایج و ثبت آن می‌باشد. همچنین فرآیند بهینه‌سازی، فرآیند تصمیم‌گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود است. پایش بلند مدت بدون در نظر گرفتن بهینه‌سازی، سبب افزایش هزینه پایش می‌گردد. از این رو طراحی شبکه پایش کیفی منابع آب باید براساس اهداف مشخص و از پیش معین باشد. از انواع شبکه‌های پایش می‌توان به شبکه‌های باران‌سنجی، آب‌های زیرزمینی و شبکه ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رودخانه‌ها اشاره کرد. بهینه‌سازی انواع شبکه‌های پایش، از جمله پژوهش‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Mogheir et al., 2009).

Shafiei et al. (2013) شبکه‌ای بهینه را شبکه‌ای معرفی کردند که در آن پراکندگی ایستگاه‌ها به گونه‌ای باشد که بتوان ایستگاه‌های فاقد داده‌های مشاهده شده را با دقت مناسب برآورد کرد. Chadalavada et al. (2011) پس از شناسایی ایستگاه‌های بالقوه (چاه‌های پیشنهادی از سوی مرجع ذیصلاح) و برآورد روند آلودگی در چاه‌های جدید توانستند واریانس هر کدام از این چاه‌ها را به وسیله روش‌های زمین آماری صرفاً فضایی (و نه زمانی) به دست آورند. آنان بر پایه واریانس خطای پیش‌بینی هر یک از چاه‌ها، رتبه آنها را در شبکه مورد نظر تعیین کردند. براین اساس چاه‌هایی که واریانس پیش‌بینی کمتری دارند پیش‌بینی‌پذیری بیشتری داشته و لزومی به حضور آنها در شبکه بهینه نیست. در پژوهش آنان اگرچه رویکرد بهینه‌سازی در جهت افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش بوده، اما به نظر می‌رسد این روش را می‌توان برای رویکرد کاهشی نیز به کار برد.

Yeh et al. (2006) در پژوهش خود این طور بیان کردند که شبکه پایش بهینه باید اطلاعات کافی و نه اضافی را در اختیار قرار دهد، بدین معنی که ایستگاه‌های پایش نباید آنچنان پراکنده باشند که در بعضی مناطق اطلاعات اضافی و در بعضی مناطق اطلاعات کمی در اختیار قرار دهند. Ning and Chang (2005) نیز در پژوهش خود اظهار داشتند که تعیین موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌ها در شبکه پایش نیازمند اطلاعات تجربی، شهود و نظرات کارشناسی می‌باشد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های انجام شده در خصوص بهینه‌سازی شبکه‌های پایش، متمرکز بر استفاده از نظریه اطلاع (آنتروپی) و ویژگی‌های آن بوده است. در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته از الگوریتمی چند مرحله‌ای برای رسیدن به شبکه پایش استفاده شده

توزیع کمک خواهد کرد تا رابطه بین متغیرها به صورت خطی تعریف شود. در روابط رگرسیونی معادله خط به عنوان رابطه تقریبی بین داده‌ها سنجیده می‌شود ولی عملاً این موضوع با خطای زیادی همراه است. به همین منظور معیارهای متعددی برای بیان مقادیر به‌دست آمده در آزمایشات وجود دارد که لزوماً مبین رابطه خطی بین داده‌ها نیست. برپایه پژوهش‌های انجام شده، معیار آنتروپی می‌تواند رابطه غیرخطی را نیز تشریح کند. بنابراین استفاده از این معیار حتی برای داده‌هایی با حجم زیاد و توزیع نرمال نیز مناسب است (Singh, 2013). مطالعاتی هم وجود دارد که داده‌های اولیه خود را به وسیله شبیه‌سازی و با استفاده از مدل‌های ریاضی، افزایش داده و سپس از نظریه اطلاع استفاده کرده‌اند. زیرا اگر حجم داده‌ها کم باشد، کفایت داده‌ها نیز زیر سوال خواهد رفت به طور مثال Karamouz et al. (2009) داده‌های خود را در بازه زمانی مورد مطالعه، شبیه‌سازی و گسترش دادند و سپس از آنتروپی برای تعیین تعداد بهینه نقاط نمونه‌برداری از رودخانه استفاده کردند.

پژوهش‌هایی نیز وجود دارند که بدون در نظر گرفتن فرض‌های اولیه همانند نرمال بودن روش‌شناسی خود را بنا نهاده‌اند. در زمینه آب‌های زیرزمینی شاید مهمترین پژوهش‌ها مربوط به Mogheir and Singh باشد که طی مقالاتی هدفمند از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ با استفاده از نظریه اطلاع به بررسی و بهینه‌سازی شبکه پایش آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. پژوهش‌های آنان بر پایه مدل-سازی اطلاع متقابل بوده است. آنها اطلاع متقابل را تابعی از فاصله بین چاه‌ها در نظر گرفته و با رسم نمودار اطلاع متقابل در برابر فاصله، مدلی را برای آنها برآزش دادند. آنها با این نمودار توانستند فاصله‌ای که بیش از آن چاه‌ها بر یکدیگر تأثیر ندارند را پیدا نموده به وسیله آن شبکه بهینه را با رویکرد کاهشی طراحی نمایند. این نوع تحلیل‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده است. به طوری که (Masoumi and Kerachian 2010) نیز پژوهشی در زمینه ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه آب‌های زیرزمینی با بکارگیری منطق فازی و بر مبنای مدل‌های مذکور انجام دادند.

در پژوهش‌های اخیر با توجه به نیاز و شرایط موجود، نسبت به بهینه‌سازی شبکه پایش با رویکردهای کاهشی، افزایشی، جایجایی یا طراحی مجدد ایستگاه‌ها اقدام شده است. اساساً رویکردهای افزایشی، جایجایی و طراحی مجدد برای شبکه‌های باران‌سنجی یا هیدرومتری نسبت به شبکه‌های پایش آب‌های زیرزمینی کاربرد بیشتری دارد. در پژوهش حاضر مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۳۲۰ کیلومتر مربع است. با توجه به ۲۸۷ حلقه چاه موجود، به طور متوسط سهم هر حلقه چاه، پهنه‌ای به وسعت حدود ۱ کیلومتر مربع

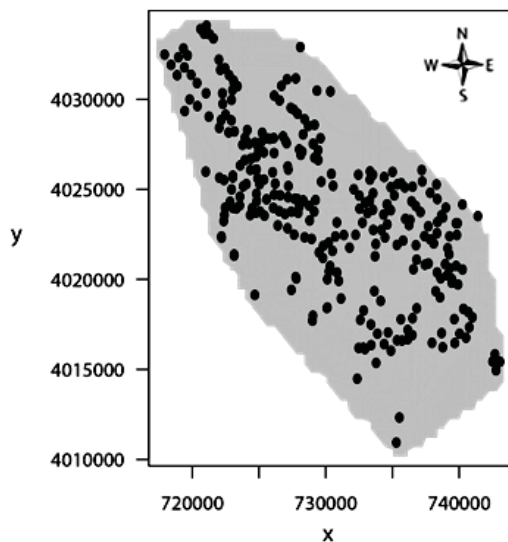
است. بنابراین با استناد به پژوهش (Alizadeh et al. 2009) در خصوص تعیین و پهنه‌بندی حریم بهداشتی چاه‌های آشامیدنی مشهد و در نظر گرفتن خطا در برآورد مساحت منطقه، اگر تعداد چاه‌های بالقوه زیاد نباشد، حداقل کافی به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه به هزینه سالانه نظارت، نمونه‌برداری، حمل و آنالیز داده‌ها و همچنین هزینه حفر و تجهیز هر چاه جدید که به طور متوسط حدود ۳ میلیارد ریال برآورد می‌شود، بهینه‌سازی شبکه پایش بر مبنای رویکردهای افزایشی، جایجایی و طراحی مجدد، با محدودیت عملیاتی و اقتصادی روبرو است. از این‌رو در پژوهش حاضر بهینه‌سازی شبکه پایش با رویکرد کاهشی انجام شده است. با این دیدگاه در پژوهش‌های بررسی شده دو کاستی عمده به نظر می‌آید. یکی اینکه فرض‌هایی همانند نرمال بودن داده‌ها که با توجه به حجم داده‌های نامعتبر (دورافتاده و غیره) و کوتاه بودن دوره آماری عملاً در بسیاری از پژوهش‌ها برقرار نمی‌باشد، سبب محدود شدن پژوهش می‌شود. دیگر آنکه عدم توجه به وابستگی داده‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه فقط می‌تواند شبکه بهینه‌ای را برای داده‌های موجود ارائه دهد و آینده پایش را تضمین نمی‌کند. عکس این موضوع سبب افزایش دقت در برآورد می‌شود.

پژوهش حاضر را می‌توان به‌طور ویژه با پژوهش (Akbarzadeh and Ghahraman 2013) مقایسه و بررسی نمود. آنان با رویکرد کاهشی، مبنای انتخاب ایستگاه‌ها را در شبکه بهینه، میزان پیش‌بینی‌پذیری معرفی نمودند. بدان معنا که شبکه بهینه با تعداد کمتری ایستگاه نسبت به شبکه موجود، تا چه میزان نیترا ت آبخوان را براساس پارامترهای کیفی شاخص و کمکی پیش‌بینی کند. بر این اساس در شبکه بهینه چاه‌هایی که امکان پیش‌بینی آنها توسط سایر چاه‌ها وجود دارد را حذف کردند. نتایج به‌دست آمده از مقایسه کریجینگ عام و برونی در پژوهش آنها حاکی از آن است که عامل کمکی در برآورد بهتر نقاط فاقد مشاهده پارامتر شاخص (نیترا ت) و پیش‌بینی شبکه موجود تأثیر بسزایی دارد. در نتیجه کریجینگ برونی که در آن از EC به عنوان متغیر کمکی در برآورد روند استفاده شده است، به عنوان کریجینگ برتر انتخاب شد. آنان در ادامه پژوهش خود، چاه‌های شبکه موجود را براساس معیارهای آنتروپی و اطلاع متقابل رتبه‌بندی کرده و به منظور انتخاب شبکه بهینه از اطلاعات متغیر کمکی EC استفاده نمودند. آنها شبکه‌ای را به عنوان شبکه بهینه معرفی نمودند که بتواند به‌وسیله کریجینگ برونی عملکرد بهتری داشته باشد. بدین معنی که شبکه بهینه دارای تعدادی چاه است که اگر از این تعداد کمتر باشد آنگاه کریجینگ عام از برونی عملکرد بهتری خواهد داشت. این روش هرچند می‌تواند از اطلاعات اضافی (داده‌های متغیر کمکی) برای تعیین شبکه بهینه

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه و داده‌ها

دشت مشهد با ابعادی به طول بیش از ۱۰۰ کیلومتر، عرض متوسط ۲۵ کیلومتر و وسعتی حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود واقع است که در آن سالانه حدود ۲۵۰ میلیون متر مکعب کسری مخزن وجود دارد و در نتیجه از سال ۱۳۴۸ در لیست دشت‌های بحرانی و ممنوعه می‌باشد. بخش عمده‌ای از دشت مشهد، شهر مقدس مشهد است که به عنوان مرکز استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران واقع است. این شهر از نظر وسعت و جمعیتی بیش از ۵ میلیون نفر، دومین کلان‌شهر ایران شناخته می‌شود. در تعیین مختصات منطقه، نقطه‌ای با UTM افقی ۷۱۵۰۰۰ و عمودی ۴۰۱۰۰۰۰ به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شد. براساس مختصات چاه‌های مورد مطالعه، مساحت منطقه آبخوان شهید مشهد در حدود ۳۲۰ کیلومتر مربع برآورد گردید. شکل ۱ نحوه پراکندگی ایستگاه‌های پایش (چاهها) در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های پایش موجود در محدوده آبخوان مورد مطالعه (مختصات UTM)

در پژوهش حاضر به منظور تحلیل فضایی-زمانی از بین پارامترهای کیفی، به عنوان شاخص آلودگی، مقادیر نیترات ۲۸۷ حلقه چاه که دارای اطلاعات ثبت شده در گستره آماري ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ بود، از امور نظارت بر کیفیت آب‌های مشهد کسب گردید. داده‌های هر چاه که با میانگین ۳ نوبت پایش در هر سال ثبت شده است شامل داده‌های دورافتاده یا نقاط فاقد مشاهده بود که داده‌های دورافتاده به وسیله روش ارائه شده توسط Haining (1993) شناسایی و از مجموعه داده‌ها کنار گذاشته شد. سپس این مقادیر همانند نقاط فاقد مشاهده

استفاده نماید اما همواره باید یک پارامتر کمی در اختیار باشد که همیشه در پژوهش‌ها امکان دسترسی به چنین پارامتر کمی وجود ندارد. از طرفی وقتی می‌توان کریجینگ فضایی-زمانی برونی را بکار گرفت که داده‌های موجود دارای روند باشند. علاوه بر این، استفاده از این روش بسیار زمان‌بر و دارای شروط اولیه زیادی از قبیل بررسی همسانگردی و همچنین رسم نیم‌تغییرناها و انتخاب مدل مناسب برای نیم‌تغییرنا است. به طور مثال در هر یک از انواع کریجینگ باید نیم‌تغییرنمای فضایی و نیم‌تغییرنمای زمانی تعیین شده و سپس به وسیله آنها نیم‌تغییرنمای فضایی-زمانی برآورد گردد. از این‌رو سوال اینجاست که آیا می‌توان با استفاده تنها از داده‌های نیترات مینایی را برای تعیین شبکه بهینه ارائه داد که نه نیازمند پارامتر کمی برای تعیین شبکه بهینه باشد و نه فرآیند پیچیده کریجینگ فضایی-زمانی برای تعیین شبکه بهینه را داشته باشد. از طرفی به این نکته نیز باید توجه نمود که شبکه معرفی شده توسط Akbarzadeh and Ghahraman (2013) تضمینی برای آینده پایش ن داده است. یعنی شاید شبکه موجود در آینده کارایی لازم را نداشته باشد.

بنابراین در پژوهش حاضر با هدف سنجش و پایش روند آلودگی به وسیله نیترات، فرآیند بهینه‌سازی فضایی-زمانی شبکه پایش آبخوان شهر مشهد با استفاده از معیار آنتروپی و با رویکرد کاهش صورت گرفته است. در پژوهش حاضر بر خلاف پژوهش‌های پیشین هیچ پیش‌فرضی بر روی داده‌ها در نظر گرفته نشده است. یعنی لزومی ندارد داده‌های موجود شرایطی خاص همانند نرمال بودن را داشته باشد. بطور خلاصه در پژوهش حاضر مقدار آنتروپی شبکه بر حسب تعداد ایستگاه‌ها در سال‌های مختلف تعیین و سپس وابستگی زمانی آنها به دست آمد. لذا از عامل زمان در فرآیند بهینه‌سازی و در مدل‌سازی برای تعیین شبکه بهینه استفاده شده است. بنابراین از مهمترین نوآوری‌های این پژوهش در نظر گرفتن بعد زمان در تعیین شبکه بهینه است. 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 داشتن پارامتر کمی برای تعیین شبکه بهینه وجود ندارد، همچنین لزومی بر انجام فرآیند سنگین کریجینگ فضایی-زمانی برای رسیدن به شبکه بهینه نیست و تنها با مدل‌سازی فضایی-زمانی آنتروپی می‌توان شبکه موجود را بهینه نمود.

در نظر گرفته شد و کل آنها (نقاط فاقد مشاهده اصلی و نقاط فاقد مشاهده حاصل از کنار گذاشتن داده‌های دورافتاده) طی فرآیند کریجینگ برآورد گردید. در ادامه، فرآیند بهینه‌سازی شبکه موجود به وسیله داده‌های تکمیل شده انجام شد.

۲-۲- تعیین شبکه بهینه

آنتروپی که یکی از معیارهای اندازه‌گیری عدم قطعیت است، میزان آشفتگی، بی‌نظمی و میزان تصادفی بودن را تشریح می‌کند. چندین نوع اندازه برای سنجش آنتروپی وجود دارد. اغلب پژوهش‌ها اطلاعات موردنظر را توسط آنتروپی (Shannon (1948) اندازه‌گیری می‌کنند. آنتروپی شانون حاصل متوسط اندازه عدم قطعیت در مورد وقوع مقادیر نیترا تا به صورت $z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n)$ است که در آن s_i ها موقعیت چاه‌ها هستند (مثلاً $z(s_1)$ نشان دهنده مقدار نیترا در موقعیت مکانی s_1 است) و n نیز تعداد چاه‌ها می‌باشد. از این رو آنتروپی شانون به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

که در آن p_i احتمال وقوع پیشامد $z(s_i)$ است.

چنانچه اعضای نمونه‌های بدست آمده $z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n)$ به ترتیب دارای احتمال‌های p_1, p_2, \dots, p_n بوده و شبکه چاه‌ها به صورت $Z = (z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n))$ تعریف شود، آنگاه آنتروپی این شبکه با رابطه ۲ تعریف می‌شود (Singh, 2013).

$$H(Z) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (2)$$

که در آن مقادیر احتمال از تقسیم مقدار نیترا تا هر چاه بر مجموع مقادیر نیترا تا همه چاه‌ها بدست می‌آید.

آنتروپی شبکه پایش، میزان تصادفی بودن (گسترده‌گی مقادیر) آن را نشان می‌دهد. براین اساس با توجه به رابطه ۲، هرچه مقدار $H(Z)$ بیشتر باشد، میزان تصادفی بودن شبکه نیز بیشتر است. براساس ملاحظات اقتصادی و رویکرد کاهش در فرآیند بهینه‌سازی، اطلاعات اضافی شبکه پایش شامل چاه‌هایی که پیش‌بینی‌پذیری بیشتری دارند (یعنی توسط سایر چاه‌ها با دقت بالا برآورد می‌شوند) باید به اندازه‌ای حذف شود که آنتروپی شبکه تعدیل یافته از حد بیشینه تفاوت چندانی نداشته باشد. به عبارت دیگر ایستگاه‌هایی برای ماندن در شبکه بهینه انتخاب شوند که از پیش‌بینی قابل اتکا از آلودگی در سال‌های آینده برخوردار باشند. یعنی آنتروپی در شبکه بهینه به مقدار بیشینه نزدیک باشد تا با دقت بیشتری بتوان

ایستگاه‌های حذف شده یا نقاط فاقد مشاهده را پیش‌بینی کرد (Singh, 2013).

اگر دو مجموعه یکی به صورت $Z_1 = (z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n))$ و دیگری به صورت $Z_2 = (z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_k))$ در اختیار باشد به گونه‌ای که $k \leq n$ باشد آنگاه رابطه ۳ برقرار است (Singh, 2013).

$$H(Z_2) \leq H(Z_1), \quad k \leq n \quad (3)$$

رابطه ۳ نشان می‌دهد که آنتروپی شبکه با کم شدن تعداد ایستگاه‌های پایش، کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۳ هر چاه سهمی در میزان تصادفی بودن شبکه دارد. به عبارت دیگر با حذف تعدادی چاه از شبکه موجود، میزانی از آنتروپی و تصادفی بودن آن کم می‌شود. شبکه اولیه (با تمامی ۲۸۷ حلقه چاه موجود) بیشترین آنتروپی یا به عبارتی بیشترین میزان تصادفی بودن را دارا است. بر مبنای رویکرد کاهش در بهینه‌سازی شبکه پایش هر چاهی که دقت برآورد پارامتر شاخص کیفی آن توسط سایر چاه‌ها بیشتر باشد سهم آن در آنتروپی شبکه کمتر است بنابراین در اولویت حذف قرار می‌گیرد.

با توجه به آنچه بیان شد طرح بهینه پایش شامل قرار دادن ایستگاه‌ها در موقعیت‌هایی می‌شود که پیش‌بینی در آنها از دقت بالایی برخوردار نبوده و نمونه‌گیری در آنها موجب افزایش دقت پیش‌بینی در سایر موقعیت‌ها شود بنابراین ایستگاه‌هایی که پیش‌بینی آنها با استفاده از سایر ایستگاه‌ها، از بیشترین دقت یا به عبارت دیگر کمترین آنتروپی برخوردار باشد در اولویت حذف از شبکه قرار می‌گیرند.

بر این اساس، در پژوهش حاضر پس از حذف هر ایستگاه از شبکه موجود، آنتروپی شبکه جدید (منهای آن ایستگاه)، آنتروپی پیش‌بینی آن ایستگاه (یعنی سهم این چاه در پیش‌بینی سایر چاه‌ها) نامیده شد. فرآیند تعیین شبکه بهینه برای هر سال آماری به شرح مراحل زیر می‌باشد.

۱- از مجموعه ۲۸۷ ایستگاه پایش (چاه) موجود، آنتروپی پیش‌بینی هر چاه با حذف آن از شبکه و براساس مشاهدات ۲۸۶ چاه باقی مانده محاسبه شد. سپس با برگرداندن چاه حذف شده به شبکه، چاه دیگری حذف شد و آنتروپی شبکه موجود منهای آن چاه برآورد گردید.

۲- چاهی که کمترین آنتروپی پیش‌بینی را داشته باشد از شبکه حذف می‌شود. رتبه این چاه ۲۸۷ (آخرین رتبه) می‌باشد.

۳- آنتروپی پیش‌بینی هر یک از ۲۸۶ چاه باقیمانده مشابه با تکرار مراحل ۱ و ۲ با حذف هر کدام و براساس مشاهدات ۲۸۵ چاه محاسبه

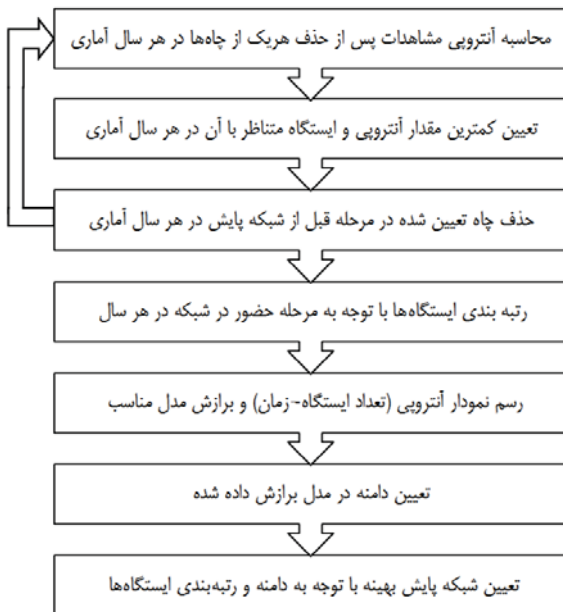
و چاه دارای کمترین آنتروپی پیش‌بینی حذف گردید، سپس آنتروپی شبکه بدون آن محاسبه و رتبه ۲۸۶ به چاه حذف شده نسبت داده شد.

۴- مراحل ۱ تا ۳ تا رتبه‌بندی همه ایستگاه‌ها ادامه یافت.

۵- نمودار مقادیر آنتروپی‌های تمامی شبکه‌ها نسبت به تعداد ایستگاه‌ها و زمان رسم گردید. لذا نمودار مذکور، مقادیر آنتروپی‌های تمام شبکه‌های جدید طی مراحل ۲۸۷ گانه تا رتبه‌بندی همه ایستگاه‌ها را در برگرفته و با توجه به اینکه عملیات در هر سال آماری به طور جداگانه انجام شده، سال‌های آماری، بُعد دیگر این نمودار پژوهش می‌باشد.

۶- در ادامه مدلی سه بعدی (شامل آنتروپی شبکه، تعداد چاه و زمان) برای نمودار برازش داده شد. این نمودار 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 درمی‌آید. از این‌رو مقادیر بزرگتر از دامنه، تأثیری بر آنتروپی شبکه ندارد)، برد یا سقف نمودار (مقدار بیشینه آنتروپی که پس از آن نمودار به حد ثابتی می‌رسد)، و عرض از مبدأ (نقطه‌ای که مقدار آنتروپی شبکه از آن شروع می‌شود) می‌باشد. از این‌رو دامنه این نمودار سه بعدی به عنوان تعداد بهینه ایستگاه‌های پایش در نظر گرفته شد.

۷- با توجه به رتبه‌بندی هر ایستگاه در ۹ سال آماری و دامنه بدست آمده از مرحله قبل شبکه بهینه پایش تعیین گردید. نمودار گردش کار مراحل انجام پژوهش نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار گردش کار مراحل بهینه‌سازی در پژوهش حاضر

۲-۳- اعتبارسنجی

در مراحل مختلف پژوهش حاضر، اعتبارسنجی در موضوعات متعددی (مدل‌ها و آنتروپی شبکه) انجام شد. به منظور مقایسه بین آنتروپی شبکه‌هایی با n چاه و در سال آماری tام با مقدار برآورد شده آن، از میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا استفاده شد که به ترتیب با MSE و MAE نشان داده شده است و از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آید.

$$MSE = \frac{1}{nt} \sum_{t,n} (H(n,t) - \hat{H}(n,t))^2 \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{nt} \sum_{t,n} |H(n,t) - \hat{H}(n,t)| \quad (5)$$

که در آنها $H(n,t)$ و $\hat{H}(n,t)$ به ترتیب مقدار واقعی و برآورد شده آنتروپی شبکه با n چاه و در سال t است.

در ادامه ۱۰۰۰ شبکه با حجم شبکه بهینه به تصادف از بین ۲۸۷ چاه اولیه انتخاب شد. سپس آنتروپی شبکه‌های مذکور محاسبه و میزان انحراف آنتروپی شبکه منتخب و آنتروپی شبکه‌های انتخاب شده از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$DIF_{i,t} = H_{M,t} - H_{i,t}, i = 1:1000 \quad (6)$$

که در آن $H_{M,t}$ آنتروپی شبکه به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی در سال tام و $H_{i,t}$ آنتروپی شبکه تصادفی tام در سال tام است.

مقدار $DIF_{i,t}$ مبین این است که میزان پیش‌بینی‌پذیری شبکه موجود و سایر شبکه‌هایی که می‌توان پیشنهاد داد، چه تفاوتی دارد. انتظار بر این است که شبکه بهینه در مقابل سایر شبکه‌ها با همین تعداد چاه میزان پیش‌بینی‌پذیری بیشتری داشته باشد.

۲-۴- برنامه‌نویسی

برای انجام هریک از مراحل پژوهش از نسخه 3.1.2 نرم افزار R استفاده شد. به منظور انجام فرآیند نرم افزاری در بهینه‌سازی، برای هر چاه یکی از کدهای ۱ تا ۲۸۷ منظور گردید به گونه‌ای که هر کد مبین چاهی با موقعیت جغرافیایی خاص باشد. در ادامه، برای رسیدن به رتبه هر چاه و آنتروپی شبکه، مراحل ۲۸۷ گانه در هر سال براساس الگوریتم پیشنهادی صورت پذیرفت.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- رتبه‌بندی چاه‌ها

سبب است که با کاهش تعداد چاه‌های هر شبکه آنتروپی در آن توجه به رابطه ۳ کاهش یافته است. یعنی در شبکه اولیه قابلیت پیش‌بینی تمام چاه‌ها وجود داشته سپس با کاهش تعداد چاه‌ها در شبکه، قابلیت پیش‌بینی چاه‌ها نیز کاهش می‌یابد. ارزیابی نمودار شکل ۴ نیز حاکی از آن است که با افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش مقدار آنتروپی شبکه افزایش می‌یابد.

اما این افزایش تا میزان معینی از تعداد چاه خواهد بود و پس از آن افزایش آنتروپی با افزایش یافتن تعداد چاه‌ها تغییر چندانی نمی‌کند. این همان دامنه نمودار بر حسب تعداد چاه است. چاه‌های شبکه بهینه باید به تعدادی باشد که آنتروپی شبکه از مقدار بیشینه (آنتروپی شبکه اولیه) فاصله چندانی نگیرد. با این تعداد ایستگاه می‌توان سایر ایستگاه‌ها را به صورتی قابل اتکا پیش‌بینی کرد. این مهم را می‌توان با استفاده از مقدار دامنه محاسبه نمود.

رتبه‌بندی تعدادی از چاه‌ها در سال‌های آماری مختلف بطور نمونه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین معیارهای پراکندگی شامل واریانس و ضریب تغییرات رتبه هر چاه نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود رتبه هر چاه در سال‌های آماری اغلب متفاوت است. این موضوع را می‌توان در شکل ۳ نیز ملاحظه نمود که مقادیر پراکندگی رتبه هر چاه در سال‌های مختلف تفاوت معنی‌داری دارد. ضریب تغییرات رتبه هر چاه در سال‌های مختلف حتی تا مقدار ۱۴۰۰ درصد نیز رسیده است. این معیار بیانگر پراکندگی رتبه هر چاه نسبت میانگین آن می‌باشد. این معیار اگر چه زیاد به نظر می‌رسد اما در ادامه تأثیرگذاری آن در بخش اعتبارسنجی نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

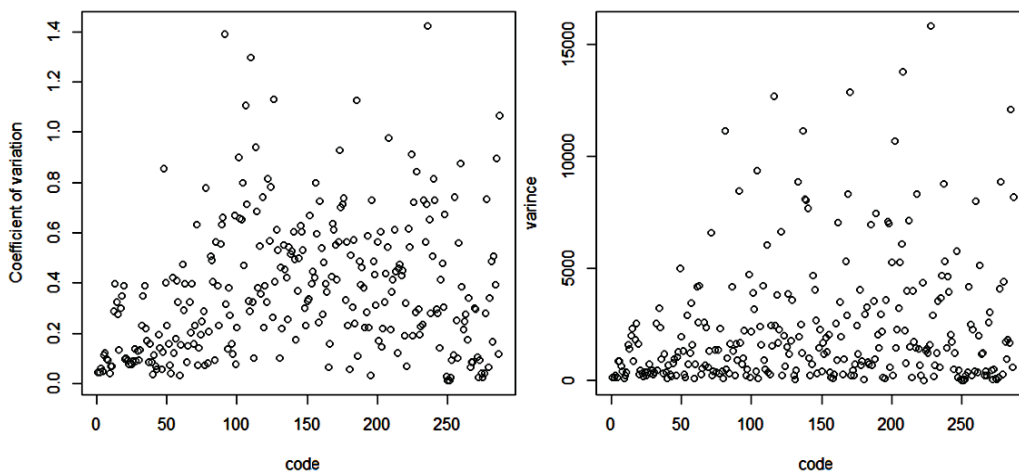
اگر به جای رتبه چاه در سال‌های مختلف، میانگین آن تعیین شود می‌تواند نماینده مناسبی برای آن باشد. در این راستا رتبه هر چاه برابر میانگین رتبه آن در کل دوره آماری در نظر گرفته شد. از این‌رو در سطر پایانی جدول ۱ مقادیر میانگین ارائه شده است.

۳-۲- مدل‌بندی آنتروپی شبکه چاه‌ها

در جدول ۲ مقادیر آنتروپی شبکه بیان شده است. برای درک بهتر نیز مقادیر جدول مذکور به صورت نمودار سه بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودار براساس الگوریتم پیشنهادی و شامل مقادیر آنتروپی شبکه در هر سال، پس از حذف یک ایستگاه در هرکدام از مراحل ۲۸۷ گانه می‌باشد. جدول ۲ نشان دهنده سیر نزولی آنتروپی با کاهش ایستگاه‌های پایش است. این موضوع بدان

جدول ۱- نمونه رتبه‌بندی چاه‌ها در سال‌های آماری مختلف

کد چاه سال	۱	۲	۳	۲۸۵	۲۸۶	۲۸۷
۱۳۸۱	۲۶۰	۲۶۸	۲۶۱	۱۰۳	۲۴۰	۸۴
۱۳۸۲	۲۴۷	۲۵۲	۲۴۹	۱۴	۲۲۲	۴۲
۱۳۸۳	۲۴۷	۲۴۴	۲۵۰	۳۲	۲۲۴	۴۴
۱۳۸۴	۲۴۴	۲۴۱	۲۴۰	۲۸	۲۱۶	۳۴
۱۳۸۵	۲۳۹	۲۵۶	۲۳۸	۵۴	۲۱۲	۴۰
۱۳۸۶	۲۳۱	۲۵۰	۲۳۳	۷۸	۲۰۱	۱۳
۱۳۸۷	۲۴۸	۲۵۳	۲۲۸	۲۵۶	۱۸۲	۳۰
۱۳۸۸	۲۴۷	۲۳۴	۲۴۵	۲۶۴	۱۷۷	۲۰۹
۱۳۸۹	۲۲۲	۲۳۶	۲۲۱	۲۷۴	۱۷۱	۲۶۹
میانگین	۲۴۲/۷۷	۲۴۸/۲۲	۲۳۷/۲۲	۱۲۲/۵۵	۲۰۵	۸۵



شکل ۳- واریانس (راست) و ضریب تغییرات (چپ) رتبه‌های چاه‌های ۲۸۷ گانه آبخوان شهر مشهد

جدول ۲- نمونه آنتروپی شبکه‌های پایش متناظر با حذف چاه‌های با کم‌ترین آنتروپی طی مراحل ۲۸۷ گانه در هر سال آماری

آنتروپی شبکه طی مراحل ۲۸۷ گانه						سال
۲۸۷	۲۸۶	۲۸۵	۳	۲	۱	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۱۲۳۹	۵/۳۸۵۴	۵/۳۹۰۰	۵/۳۹۴۵	۱۳۸۱
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۳۵۲۰	۵/۳۵۶۷	۵/۳۶۱۴	۱۳۸۲
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۳۴۸۹	۵/۳۵۳۶	۵/۳۵۸۳	۱۳۸۳
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۳۳۲۶	۵/۳۳۷۵	۵/۳۴۲۳	۱۳۸۴
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۳۳۴۷	۵/۳۳۹۶	۵/۳۴۴۴	۱۳۸۵
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۲۸۹۵	۵/۲۹۴۶	۵/۲۹۹۶	۱۳۸۶
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۲۶۸۷	۵/۲۷۳۸	۵/۲۷۸۹	۱۳۸۷
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۲۵۸۵	۵/۲۶۳۷	۵/۲۶۸۹	۱۳۸۸
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۵/۳۹۵۰	۵/۳۰۰۰	۵/۳۰۴۹	۱۳۸۹
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۴۱	۵/۳۲۸۴	۵/۳۲۲۲	۵/۳۲۴۳	میانگین
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۶	واریانس
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۲/۸۹۳۶	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۶	ضریب تغییرات

شکل ۴ نشان می‌دهد که تغییرات آنتروپی در سالی خاص به شکل نمایی است، در حالی که تغییرات سالانه آنتروپی برای تعداد مشخصی از ایستگاه‌ها تقریباً خطی است. برای برازش مدل مناسب و جهت تعیین دامنه نمودار مذکور، سه مدل تفکیکی به نمودار شکل ۴ برازش داده شد. مدل‌های پیشنهاد شده به ترتیب ضریبی، جمعی و ضریبی-جمعی به صورت روابط ۷ تا ۹ می‌باشد. ایده انتخاب این سه مدل براساس مدل‌های نیم‌تغییر نمای فضایی-زمانی انتخاب شده است (Akbarzadeh and Ghahraman, 2013).

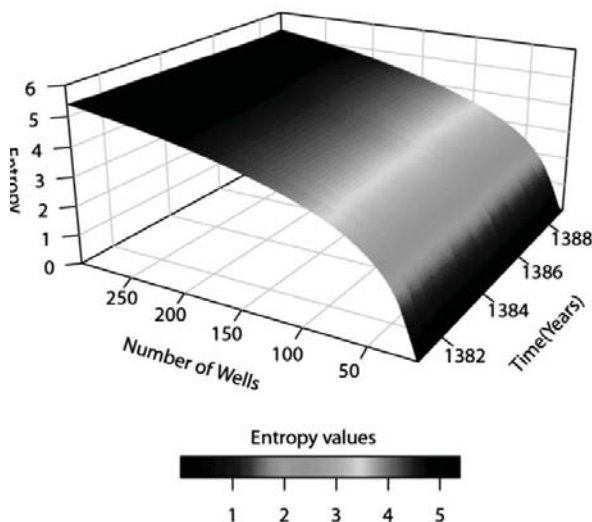
$$M1: H(n, t) = ct \left(1 - \exp \left\{ -\frac{n}{b} \right\} \right) + a \quad (7)$$

$$M2: H(n, t) = a \left(1 - \exp \left\{ -\frac{n}{b} \right\} \right) + ct \quad (8)$$

$$M3: H(n, t) = a \left(1 - \exp \left\{ -\frac{n}{b} \right\} \right) + ct + dt \left(1 - \exp \left\{ -\frac{n}{b} \right\} \right) \quad (9)$$

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

در تمامی معادلات فوق پارامتر b (برابر دامنه با توجه به ایده کسب شده از مدل‌های تغییرنمای فضایی-زمانی) برای تعیین تعداد ایستگاه‌های بهینه به عنوان هدف این پژوهش مشخص گردید. با توجه به غیرخطی بودن روابط، بجای استفاده از بهینه‌سازی کلاسیک و حتی استفاده از روش‌های فراکاوچی، از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. اما با توجه به وجود پارامترهای a ، b و c (فقط در مدل M3) بهینه‌سازی آن مدل به داده‌های به‌دست آمده دشوار است.



شکل ۴- نمودار آنتروپی شبکه‌ها (تعداد ایستگاه-زمان)

به طور کلی آنتروپی شبکه علاوه بر تعداد ایستگاه‌ها به عامل زمان نیز وابسته است. با این حال این وابستگی شدید نیست. ثبات تقریبی آنتروپی شبکه در هر سال، علاوه بر جدول ۲ در شکل ۴ نیز به وضوح دیده می‌شود. در مرحله اول پس از حذف اولین ایستگاه تفاوت آنتروپی شبکه در بین تمامی سال‌های آماری کمتر از ۰/۰۹ می‌باشد که این نشان از ثبات آنتروپی شبکه در سال‌های مختلف دارد. شکل ۴ نیز حاکی از آن است که آنتروپی شبکه‌ها در زمان‌های مختلف تفاوت چندانی نداشته است. اما همین اثر هم می‌تواند مدل‌بندی شود. یعنی وابستگی آنتروپی شبکه‌ها در زمان‌های مختلف (در دوره آماری) قابل مدل‌بندی است.

از این رو 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 ۱۰ کمینه شود.

$$\sum_{t,n} (H(n,t) - \hat{H}(n,t))^2 \quad (10)$$

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 ۷ و ۸ و ۹ می‌باشد.

این بدان معناست که در هر زمان (t) و برای هر تعداد (n) در رابطه ۱۰ برای مقادیر مختلف پارامترهای مدل (در هر مدل) مقدار $\hat{H}(n,t)$ به دست 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 باقی مانده شناخته می‌شود. با جمع این مقادیر مجموع مربع باقیمانده‌ها یا خطا (رابطه ۱۰) به دست می‌آید. در این میان پارامترهایی به عنوان پارامترهای نهایی برگزیده می‌شوند که این رابطه را کمینه کنند.

مقدار تابع هدف بهینه به قسمی انتخاب شده که تعداد چاه می‌توانسته هر عددی بین ۰ تا ۲۸۷ را اختیار نماید. تابع هدف تابعی است که می‌بایست برآورد گردد. هر کدام از معادلات ۷ و ۸ و ۹ تابع هدف هستند. این توابع برآورد گردید و در جدول ۳ با هم مقایسه شد. برای بدست آوردن سایر پارامترها نیز فاصله‌ای از ۰ تا بینهایت تعریف شد تا بتوان به وسیله تکرارهای متعدد جوابی منطقی از پارامترهای مدل‌های معرفی شده به دست آورد.

در جدول ۳ مقادیر پارامترها و میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا برای هر مدل آمده است. نتایج به دست آمده از جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل M3 به ترتیب مقادیر ۰/۰۴۹ و ۰/۱۲۹ را برای MSE و MAE اختیار نموده و در بین تمامی مدل‌ها کمترین مقدار را دارد. از این رو به عنوان مدل منتخب برگزیده شد (مشابه رسم تغییرنما). اما آنچه در این پژوهش مورد توجه است دامنه مدل

منتخب می‌باشد. به وسیله این عدد می‌توان تعداد بهینه چاه‌ها را در شبکه موجود تعیین نمود. این مقدار برابر ۱۱۰/۲۹۵ به دست آمده که نشان دهنده تعداد چاه‌های مورد نیاز برای کسب بیش‌ترین اطلاعات در شبکه پایش است. از این رو تعداد ایستگاه‌های پایش برابر ۱۱۱ نظر گرفته شد تا بیش‌ترین اطلاعات مورد نیاز در شبکه پایش تأمین گردد.

با توجه به ضریب متغیر زمان در مدل‌های برآورد شده به ویژه در مدل منتخب $(10^{-4} \times 5/774)$ و آنچه از نمودار شکل ۴ در خصوص سطح هموار و ملایم تغییرات آنتروپی شبکه نسبت به زمان ملاحظه می‌گردد، انتظار می‌رود میزان حساسیت مدل در طول زمان‌های مختلف کم باشد. این بدان معنی است که پیش‌بینی مناسبی برای شبکه موجود در سال‌های آینده به دست می‌آید. به عبارت دیگر مدل منتخب تحت تأثیر زمان نمی‌باشد بنابراین می‌توان آن را بدون اینکه زمان تأثیر زیادی بگذارد برای آینده نیز به کار برد.

۳-۳- انتخاب شبکه بهینه

پس از تعیین تعداد چاه‌ها برای شبکه بهینه، به منظور مشخص نمودن موقعیت این چاه‌ها با مرتب کردن میانگین رتبه چاه‌ها (در جدول ۱) ۱۱۱ حلقه چاه که کمترین مقدار میانگین رتبه را دارند به عنوان چاه‌های منتخب برگزیده شد که نقشه موقعیت آنها در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که بیان شد ضریب تغییرات رتبه چاه‌ها در سال‌های مختلف نسبتاً بالا است. به منظور بررسی نتایج مبتنی بر استفاده از میانگین رتبه برای بهینه‌سازی شبکه یا به عبارت دیگر بررسی تأثیر تغییرات رتبه چاه‌ها در سال‌های مختلف، در ادامه و در مدل منتخب، t برابر ۱۳۸۱ (سال مبدأ) قرار گرفت و برای تعداد مختلف چاه (n) (های مختلف) آنتروپی شبکه محاسبه گردید. این آنتروپی با آنتروپی شبکه در سال‌های بعدی مقایسه گردید. یعنی میزان اختلاف آنتروپی شبکه برآورد شده در سال ۱۳۸۱ و سایر سال‌ها محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود اگر بر مبنای سال ۱۳۸۱ آنتروپی شبکه محاسبه گردد میزان خطای آن از مقادیر واقعی در سال‌های مختلف بسیار کم خواهد بود.

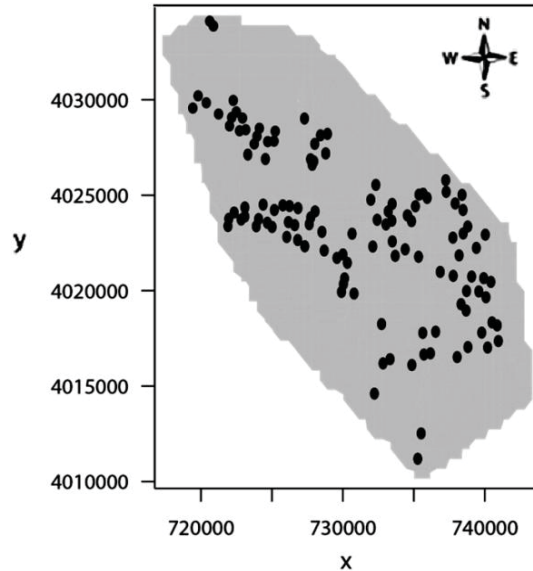
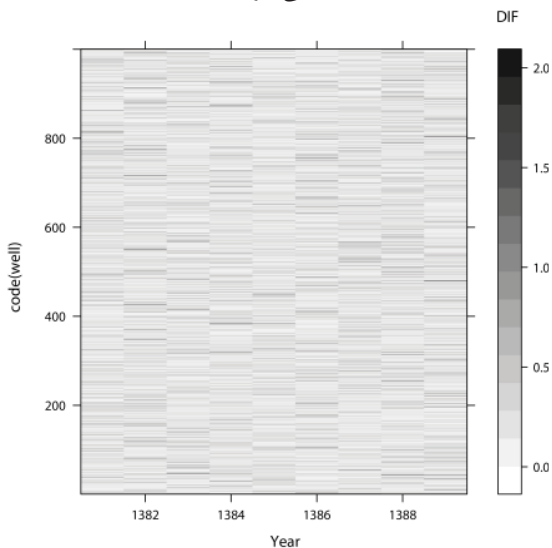
جدول ۳- برآورد پارامترهای مدل‌ها و نتایج ارزیابی آنها

a	b	c	d	MSE	MAE	پارامتر مدل
۳/۵۲۲	۱۱۰/۳۷۲	$4/294 \times 10^{-3}$	-	۰/۱۴۱	۰/۲۸۲	M1
۴/۸۷۶	۱۱۰/۴۵۳	$5/769 \times 10^{-3}$	-	۰/۰۵۳	۰/۱۸۷	M2
۵/۰۸۱	۱۱۰/۲۹۵	$5/774 \times 10^{-4}$	$-3/317 \times 10^{-2}$	۰/۰۴۹	۰/۱۲۹	M3

انتظار بر این است که شبکه بهینه از تمامی شبکه‌های موجود به حجم ۱۱۱، پیش‌بینی‌پذیری بیشتری داشته باشد. از این‌رو در ادامه برای سال‌های مختلف به صورت تصادفی ۱۰۰۰ شبکه به حجم ۱۱۱ ایستگاه (بین تمامی حالات موجود) انتخاب گردید. نتایج به‌دست آمده از رابطه ۶ در نمودار شکل ۷ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که در تمامی موارد میزان تفاوت آنتروپی شبکه بهینه و شبکه‌هایی به حجم ۱۱۱ (DIFi,t) مقدار مثبتی است. این بدان معناست که در تمامی سال‌های آماری مدل منتخب توانسته عملکرد بهتری نسبت به سایر شبکه‌های موجود داشته باشد.

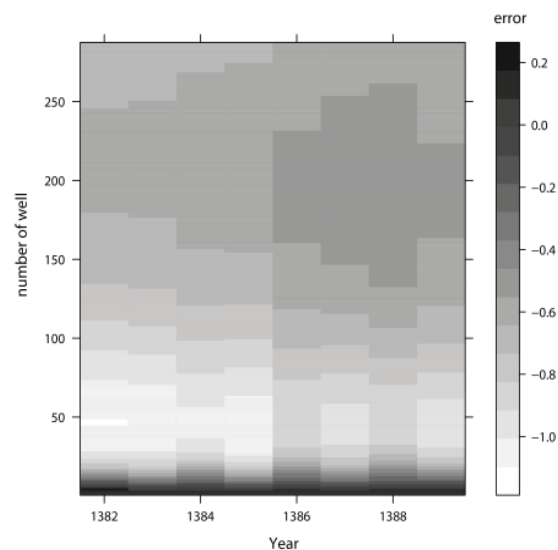
بر اساس روش‌شناسی پژوهش و ملاحظات اقتصادی که منجر به رویکرد کاهشی در طراحی شبکه بهینه پایش گردید، نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که شبکه بهینه معرفی شده نسبت به هر شبکه دیگری دارای قابلیت پیش‌بینی بهتری است و از طرفی این روند را می‌توان برای آینده آبخوان حفظ نمود. این شبکه می‌تواند در مقایسه با شبکه اولیه و هر شبکه دیگری حداقل اطلاعات ضروری را در اختیار گذارد و لازم به داشتن سایر چاه‌ها (اطلاعات اضافی) نیست. شبکه بهینه قابلیت این را خواهد داشت که مقدار نیترا در سایر چاه‌ها اعم از چاه‌های حذف شده را نیز پیش‌بینی نماید.

از طرفی نتایج این پژوهش با نتایج (Akbarzadeh and Ghahraman, 2013) همخوانی دارد. اما مزیت این نتایج نسبت به پژوهش آنها اولاً تضمین شبکه بهینه برای آینده است، ثانیاً نیازی به فرآیند پیچیده کریجینگ فضای-زمانی نیست، ثالثاً نیازی به پارامتر کمکی برای تعیین شبکه پایش بهینه وجود ندارد. از طرفی نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر با پژوهش Yeh et al. (2011) شباهت‌هایی دارد.



شکل ۵- موقعیت چاه‌ها در شبکه بهینه پایش کیفی آبخوان مشهد

نتایج به‌دست آمده نشان داد که با فاصله گرفتن از سال مبدأ میزان برآورد آنتروپی شبکه تفاوت چندانی نداشته است. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که نسبت به برآورد آنتروپی شبکه در سال‌های آینده اقدام گردد. به طور مثال در شبکه‌ای با حجم ۲۰۰ ایستگاه میزان آنتروپی شبکه در سال ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴ اختلافی حدود ۰/۵ دارد.



شکل ۶- میزان خطای برآورد آنتروپی در سال ۱۳۸۱

شکل ۷- میزان تفاوت آنتروپی شبکه بهینه و شبکه‌های به حجم ۱۱۱

اما تفاوت‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود که دستاوردهای پژوهش حاضر نیز بشمار می‌رود.

- (۱) در پژوهش آنان به دلیل کمبود ایستگاه، ایستگاه‌های جدید نیز پیشنهاد شده است. اما در پژوهش حاضر با توجه تعداد زیاد چاه‌های بالقوه و پراکندگی مناسب آنها و همچنین ملاحظات عملیاتی و اقتصادی، فقط بر مبنای رویکرد کاهشی بوده است.
- (۲) آنان مدلی دو بعدی براساس تعداد ایستگاه و آنتروپی ارائه کردند اما پژوهش حاضر براساس مدلی ۳ بعدی بر مبنای تعداد ایستگاه، زمان و آنتروپی، بنا نهاده شده است که به مراتب دقت بالاتری دارد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

نظر به اینکه اجرای برنامه‌های پایش منابع آب هزینه‌بر و نیاز به صرف وقت می‌باشد، بررسی روشی برای بهینه‌سازی شبکه موجود ضروری است. در فرآیند بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی، شناسایی تعداد و موقعیت چاه‌ها در هنگام مواجه با حجم بالای داده‌ها در گستره زمانی مورد پژوهش حایز اهمیت است. یعنی باید بررسی شود، حداقل چه میزان چاه 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 مدیریتی در بهینه‌سازی بوده است. در این پژوهش، در راستای نیل به پایش اصولی کیفیت منابع آب زیرزمینی، داده‌های نیترات که اهمیت آن مورد تأکید بوده، استفاده شده است. براین اساس سه پارامتر، شاخص کیفی مورد پایش، تعداد ایستگاه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های شبکه بهینه، از ارکان اصلی این پژوهش به شمار می‌روند.

با عنایت به روش‌شناسی پژوهش، در هر چاه به تفکیک رتبه‌بندی و طی مراحل ۲۸۷گانه، آنتروپی شبکه محاسبه گردید. نتایج نشان داد با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، آنتروپی شبکه افزایش می‌یابد تا جایی که دیگر افزایش چشمگیری نخواهد داشت. همچنین آنتروپی شبکه در طول زمان تغییرات چندانی نداشته و تغییرات آن با افزایش تعداد ایستگاه‌ها مدلی نمایی به خود گرفته است. مهمترین پارامتر مدل منتخب (جمعی-ضربی) دامنه تعداد ایستگاه‌ها است. این پارامتر برابر ۱۱۰/۲۹۵ به دست آمد. این مقدار بدان معناست که پس از حدود ۱۱۰ ایستگاه میزان آنتروپی شبکه افزایش چشمگیری نخواهد

داشت. از این‌رو تعداد ایستگاه‌های شبکه بهینه را می‌توان با توجه به دامنه به دست آمده در مدل محاسبه نمود. با توجه به مقدار اعشاری به دست آمده، برای اطمینان بیشتر از سطح اطلاعات موجود در شبکه تعداد ایستگاه‌های شبکه بهینه برابر ۱۱۱ پیشنهاد گردید. به منظور اعتبارسنجی، شبکه بهینه در هر سال آماری با شبکه‌هایی به حجم ۱۱۱ که به طور تصادفی انتخاب شد، مقایسه گردید. نتایج مقایسه آنتروپی این شبکه‌ها با شبکه بهینه حاکی از آن است که آنتروپی شبکه منتخب مقادیر بیشتری دارد. این بدان معناست که شبکه منتخب در طول سال‌های آماری مورد مطالعه بهترین عملکرد را داشته است.

همچنین ملاحظه شد که سال مبدأ یعنی ۱۳۸۱ می‌تواند به خوبی و با خطای کمی آنتروپی شبکه را در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ پیش‌بینی نماید. نکته حائز اهمیت نوسانات خطا در سال‌های مختلف است. خطای پیش‌بینی آنتروپی در سال‌های مختلف روند تقریباً یکسانی دارد از این‌رو می‌توان گفت که این خطا به میزان فاصله زمانی از سال ۱۳۸۱ بستگی ندارد. بنابراین شبکه بهینه می‌تواند در سال‌های آینده نیز برای آبخوان مشهد مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهش حاضر تأثیر زمان در بهینه‌سازی شبکه اعمال شد که به عنوان اصلی‌ترین دستاورد پژوهش به شمار می‌رود. به عبارت دیگر روشی جهت تعیین شبکه بهینه پایدار ارائه گردید به طوری که شبکه تولید شده می‌تواند تضمینی برای آینده آبخوان مشهد نیز باشد. از طرفی نشان داده شد که بدون در اختیار داشتن پارامتر کمی (اطلاعات اضافی) نیز می‌توان به شبکه پایش بهینه دست یافت.

در آینده پژوهش باید به این نکته توجه داشت که ممکن است مراجع ذیصلاح تمایل به حفر چاه‌های جدید نیز داشته باشند. در این صورت می‌توان در جهت گسترش ایستگاه‌های پایش در سطح آبخوان مورد مطالعه با روش‌های زمین آماری، چاه‌های جدید را تعیین نمود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Geostatics for the Enviromental Sciences
- 2- Isotrope
- 3- Anisotrope
- 4- Cross validation
- 5- Neurofuzzy Model

۵- مراجع

Akbarzadeh M and Ghahraman B (2013) A combined strategy of Entropy and spatio-temporal Kriging in determining optimal network for groundwater

- Mogheir Y, Lima JLMPd and Singh VP (2004) Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: II. Synthetic data. *Journal of Hydrological Processes* 18(13):2579-2590.
- Mogheir Y, Singh VP and Lima JLMPd (2006) Spatial assessment and redesign of a groundwater quality monitoring network using entropy theory, Gaza Strip, Palestine. *Journal of Hydrogeology* 14(5):700-712.
- Ning SK and Chang NB (2005) Screening the relocation strategies of water monitoring quality stations by compromise programming. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 41(5):1039-1052.
- Shafiei M, Ghahraman B and Saghafian B (2013) Evaluation and optimization of raingauge network using probability kriging (case study: Gorgan-Rud watershed). *Journal of Iran-Water Resources Research* 9(2):9-18 (in Persian).
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *Journal of Bell System Technical* 27:623-656.
- Singh VP (2013) *Entropy Theory and its Application in Environmental and Water Engineering*. John Wiley and Sons.
- Yakirevich A, Pachepsky YA, Gish TJ, Guber AK, Kuznetsov MY, Cady RE and Nicholson TJ (2013) Augmentation of groundwater monitoring networks using information theory and ensemble modeling with pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 501:13-24.
- Yeh HC, Chen YC, Wei C and Chen RH (2011) Entropy and kriging approach to rainfall network design. *Journal of Paddy and Water Environment* 9(3):343-355.
- Yeh MS, Lin YP and Chang LC (2006) Designing an optimal multivariate geostatistical groundwater quality monitoring network using factorial kriging and genetic algorithms. *Journal of Environmental Geology* 50(1):101-121.
- quality monitoring of Mashhad basin. *Journal of Water and Soil* 27(3):613-629 (In Persian).
- Alizadeh A, Afshin S and Danesh S (2009) Determine the health policy and zoning of drinking water wells in Mashhad. *Journal of Geographical Research* 92:109-127 (in Persian).
- Chadalavada S, Datta B and Naidu R (2011) Uncertainty based optimal monitoring network design for a chlorinated hydrocarbon contaminated site. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* 173(1-4):929-940.
- Haining RJ (1993) *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge University Press.
- Karamouz M, Nokhandan Ak, Kerachian R and Maksimovic C (2009) Design of on-line river water quality monitoring systems using the entropy theory: a case study. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* 155(1):63-81.
- Masoumi F and Kerachian R (2010) Optimal redesign of groundwater quality monitoring networks: a case study. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* 161(1-4):247-257.
- Mogheir Y and Singh VP (2002) Application of information theory to groundwater quality monitoring system. *Journal of Water Resources Management* 16(1):37-49.
- Mogheir Y and Singh VP (2003) Specification of information needs for groundwater resources management and planning in developing country: Gaza Strip case study. In: *Groundwater Hydrology*, Sherif MM, Singh VP and Al-Rashed M, Balkema (eds), Tokyo, 2:3-20.
- Mogheir Y, De Lima, JLMP and Singh VP (2009) Entropy and Multi-Objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Journal of Water Resources Management* 23(8):1603-1620.
- Mogheir Y, Lima JLMPd and Singh VP (2004) Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data. *Journal of Hydrological Processes* 18(11):2165-2179.