



بهره‌گیری از آنتروپی و کریجینگ بیزین تجربی در بهینه‌سازی و درونیابی مکانی تراز آب در شبکه‌ی پایش آب‌های زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی دشت سیلاخور)

مهدی کماسی^{۱*}، حسام گودرزی^۲

وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

چکیده

بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش، یک فرآیند برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود، افزودن ایستگاه‌های جدید و یا بازطراحی شبکه‌ی پایش براساس اهداف از پیش تعیین شده است. پژوهش حاضر به توسعه‌ی یک مدل بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش با دو هدف بیشینه بودن مقدار آنتروپی در ایستگاه‌های پایش و کمینه کردن هزینه‌های پایش تراز آب زیرزمینی پرداخته است. در این پژوهش از داده‌های ۲۹ ایستگاه موجود برای بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش تراز آب زیرزمینی در دشت سیلاخور واقع در استان لرستان استفاده شده است. در گام نخست با بهره‌گیری از روش آنتروپی، مقدار آنتروپی در هر یک از ۲۹ ایستگاه شبکه تعیین می‌گردد. 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 شبکه‌ی موجود تعیین شد. در گام بعدی درونیابی مکانی داده‌ها با بهره‌گیری از روش کریجینگ بیزین تجربی (EBK) در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نتایج حاصل از چهار مدل نیم‌تغییرنمای 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. شبکه‌ی پایش بهینه به دست آمده در مقایسه با شبکه‌ی مشاهداتی موجود توانسته است 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 (RMSE) برای مدل واریوگرام K-Bessel Detrended با مقدار ۲۰/۸۷ متر است که نسب به سه مدل دیگر نیم‌تغییرنمای نتایج بهتری دارد.

کلمات کلیدی: بهینه‌یابی ایستگاه، بی‌نظمی، آب زیرزمینی، EBK، آبخوان.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه حضرت‌آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران (نویسنده‌ی مسئول).
E-mail: Komasi@abru.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب‌وسازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه حضرت‌آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

مقدمه

مدیریت بهینه آب‌های زیرزمینی نیازمند اطلاعات کافی از مجموعه ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان مورد مطالعه می‌باشد. ارزیابی و پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از طریق مدل‌های خاص، به پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند. در سال‌های اخیر، با اثبات توانایی‌های مدل‌های هوشمند در مدل‌سازی سری‌های زمانی کاربرد این مدل‌ها در زمینه مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است (بث^۱ و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۸). طراحی شبکه‌های مشاهداتی از جمله مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. در مسایل بهینه‌سازی چند هدفه، اندازه‌گیری از لحاظ فراوانی مکانی و زمانی بسیار ضروری و مهم می‌باشد. بهینه‌سازی در شبکه‌ی پایش، فرآیند تصمیم‌گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود است. مطالعه، طراحی و اجرای هرگونه شبکه‌ی پایش بلندمدت بدون در نظر گرفتن فرآیند بهینه‌سازی، هزینه‌های پایش را افزایش خواهد داد. از این رو مطالعه و طراحی شبکه‌ی پایش کمی و کیفی منابع آب باید بر مبنای فرآیندی دقیق صورت گیرد، فرآیندی که در آن، اهداف کاملاً مشخص و معین شده باشند. از انواع شبکه‌های پایش می‌توان به پایش ایستگاه‌های باران‌سنجی، آب‌های زیرزمینی و نمونه‌برداری از رودخانه‌ها اشاره کرد. برای اجرای این مهم می‌توان از مدل‌ها و الگوریتم‌هایی همچون روش‌های زمین‌آمار، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های هوشمند بهره‌گیری نمود. از میان این روش‌ها مدل‌های هوشمندی چون شبکه‌ی عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به دلیل سرعت پردازش و دقت بالا و صرف وقت نسبتاً کم، نسبت به روش‌های دیگر توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند. رویکرد و روش پژوهش در مدیریت منابع آب را می‌توان به دو دسته اصلی هیدروژئولوژیکی و آماری تقسیم کرد. با رواج استفاده از ابزارهای داده‌کاوی در علوم مهندسی آب در دهه‌ی اخیر، این رویکرد نیز در دسته‌ای از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است (قادر و مکی^۲، ۲۰۱۴: ۱۱۵؛

1- Bath

2- Khader and Mckee

حسینی و کراچیان، ۲۰۱۷: ۴۳۳؛ مختاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۵۳). به همین سبب، می‌توان رویکرد داده‌کاوی را هم به عنوان نسل سوم از رویکردهای طراحی شبکه منظور کرد. در سال ۲۰۰۳، مغیر^۱ و همکاران برای طراحی محل نمونه‌برداری شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی از تئوری آنترپی بهره گرفتند. آن‌ها برای مجموعه‌ای از متغیرهای کیفی آب زیرزمینی مدل انتقال اطلاعات^۲ و مدل همبستگی^۳ را تعریف و نتیجه‌گیری نمودند که مدل انتقال اطلاعات موقعیت مکانی چاه‌ها را بهتر از مدل همبستگی تعیین می‌کند. در پژوهشی دیگر اکبرزاده و قهرمان (۱۳۹۲) به استفاده همزمان از آنترپی^۴ و کریجینگ^۵ در بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد پرداختند. در این روش ابتدا چاه‌ها بر اساس معیار آنترپی رتبه‌بندی و سپس بر اساس کریجینگ، شبکه‌ی بهینه پایش تعیین شده است. لیچ^۶ و همکاران (۲۰۱۶) تغذیه‌ی آب زیرزمینی را اساس طراحی شبکه‌ی پایش در نظر گرفتند و با استفاده از مدل بهینه‌سازی آنترپی دوگانه به طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی پایش آب‌های زیرزمینی پرداختند. بهره‌گیری از آنترپی، روش مناسبی برای دستیابی به اطلاعات مشترک در بین چاه‌های مشاهداتی برای بهینه‌سازی بوده است. با توجه به ناشناخته و پیچیده بودن تغییرات مکانی داده‌ها، از روش‌های مختلف درونیابی استفاده می‌شود و این روش‌ها با استفاده از رویکرد اعتبارسنجی تقابلی مقایسه می‌شوند و از بین آنها روشی که کمترین خطا را در پیش‌بینی دارد، انتخاب می‌گردد. به طور کلی روش‌های مختلفی برای درونیابی مکانی وجود دارد که در نگاه کلی می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های قطعی شامل وزن‌دهی عکس فاصله، توابع پایه‌ی شعاعی، چندجمله‌ای‌های کلی و محلی و روش‌های زمین آماری شامل کریجینگ تقسیم‌بندی کرد. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته از روش درونیابی کریجینگ برای برآورد تراز ایستابی در محدوده‌ی مورد مطالعه خود برای تشکیل پایگاه

1- Mogheir

2-Transinformation Model

3- Correlation Model

4- Entropy

5- Kriging

6- Leach

داده استفاده نموده‌اند (پورشهایی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱، اسکویل و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۱۷۵، مرآتی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳۷). قربانی و همکاران (۱۳۹۷)، به ارزیابی روش کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دقت روش کریجینگ بیزین تجربی در مقایسه با سایر روش‌های کریجینگ در تخمین سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده و توانسته است مقدار خطا را تا حد مطلوبی کاهش دهد. روش کریجینگ بیزین تجربی طیف هموارتری را از تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد و الگوی ترسیم شده تراز آب زیرزمینی با این روش نیز متناسب با شیب عمومی منطقه مورد مطالعه است.

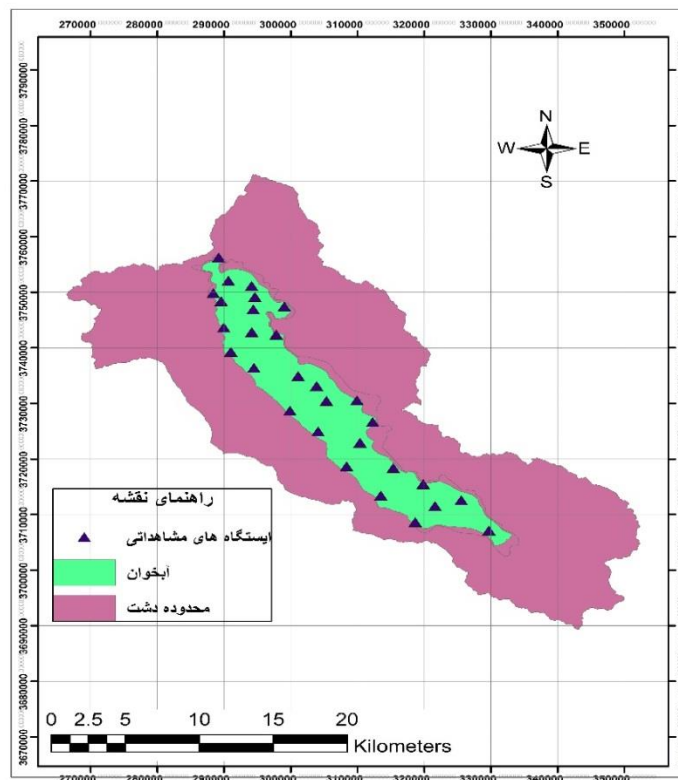
با رویداشت به توانایی روش کریجینگ بیزین تجربی در پیش‌بینی مکانی تراز آب زیرزمینی و معیار آنتروپی در شناسایی بی‌نظمی سری‌های زمانی و تطابق آن با میزان تغذیه آبخوان، پژوهش حاضر به بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش تراز آب زیرزمینی در دشت سیلاخور با استفاده از داده‌های بیست‌ونه چاه پیژومتری می‌پردازد. در مدل ترکیبی از معیار آنتروپی در شناسایی بی‌نظمی دو سری زمانی بارش و تراز آب زیرزمینی در ایستگاه‌های موجود در آبخوان استفاده شده است و پس از آن از روش EBK برای درونیابی تراز آب زیرزمینی بهره‌گیری شده است.

مواد و روش‌ها

- معرفی مطالعه موردی

محدوده‌ی مطالعاتی در این پژوهش دشت سیلاخور بخشی از شهرستان‌های دورود و بروجرد واقع در استان لرستان می‌باشد و بین طول‌های $48^{\circ}28'$ تا $49^{\circ}30'$ طول شرقی و عرض‌های $33^{\circ}15'$ تا $34^{\circ}10'$ عرض شمالی واقع شده‌است. این ناحیه با وسعت نسبتاً زیاد به میزان $2545/8$ کیلومتر مربع در شمالی‌ترین قسمت حوزه آبریز کارون بزرگ بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه‌های سیلاخور، ماربره و تیره تشکیل می‌دهند. شکل (۱)، منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای مدلسازی و

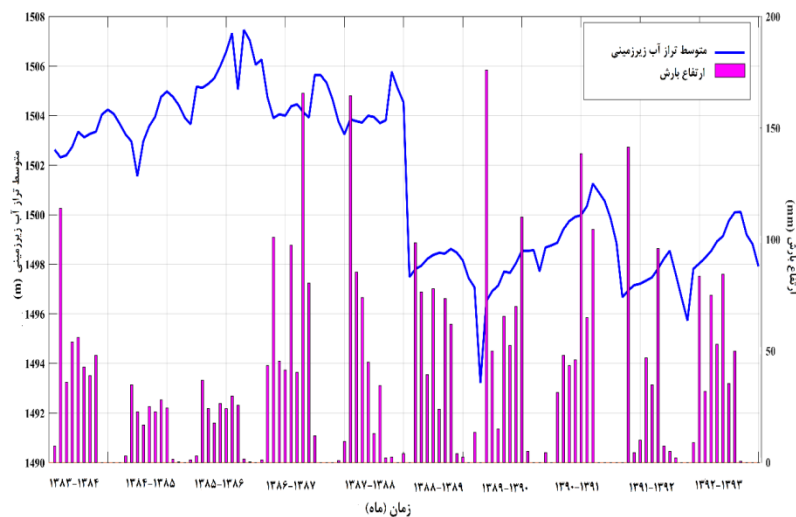
طراحی شبکه‌ی بهینه در این پژوهش از داده‌های آماری هفده سال اخیر دشت سیلاخور استفاده گردید که مشخصات آماری برای ایستگاه‌های مختلف آن در جدول (۱) بیان شده است. همچنین شکل (۲)، سری زمانی ماهانه ۱۲۰ ماهه مقایسه‌ی بارندگی و تغییرات تراز متوسط آب زیرزمینی دشت سیلاخور از سال آبی (۱۳۸۴-۱۳۸۳) تا (۱۳۹۳-۱۳۹۲) را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آبخوان دشت سیلاخور از نوع آبخوان تحت فشار می‌باشد. در این دشت ۲۹ ایستگاه متفاوت موجود است که در هر منطقه سطح پیزومتری آبخوان توسط یک چاه پیزومتری اندازه‌گیری شده است (کماسی و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۳).



شکل (۱) محدوده‌ی دشت و آبخوان سیلاخور

جدول (۱) مشخصات آماری شبکه مشاهداتی آبخوان سیلاخور

سری زمانی ماهانه (۲۰۴ ماه)	میانگین (m)	کمینه (m)	بیشینه (m)
تراز متوسط آب زیرزمینی (متر)	۱۴۹۹/۷۴	۱۴۹۶/۲۹	۱۵۰۳/۲۱
بارش (میلی متر)	۴۲/۷۶	۰	۲۵۵/۲۵



شکل (۲) مقایسه سری زمانی تغییرات تراز متوسط آب زیرزمینی و تغییرات بارش در دشت سیلاخور

– مبانی روش زمین آمار کریجینگ

روش زمین آمار کریجینگ یک درون‌یاب مکانی است که برای به دست آوردن برآورد خطی ناریب استفاده می‌شود. بهترین برآوردکننده‌ی خطی ناریب باید حداقل واریانس خطای برآورد را داشته باشد. معادله‌ی کلی کریجینگ به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌گردد (شایان و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۳۹).

$$Z^*(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

در رابطه‌ی (۱)، مقدار محاسبه شده در مکان x_p ، $Z(x_i)$ مقدار معلوم در مکان x_i وزن مرتبط با داده‌ها است. فرم کلی معادلات کریجینگ به شکل رابطه‌ی (۲) است.

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^v \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{il} \gamma_{lv}(x_i, x_j) - \mu_v = \gamma_{uv}(x_j, x) \\ \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{il} = \begin{cases} 1, & 1 = u \\ 0, & 1 \neq u \end{cases} \end{cases} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که u و v متغیرهای کوواریته اولیه و ثانویه هستند. در روش کریجینگ تغییرات u و v دارای همبستگی متقاطع است. برای آنالیز کریجینگ نیم تغییرنا متقاطع باید در ابتدا تعیین شود. مطلق بودن تخمین در درونیابی از ویژگی‌های عمده‌ی مدل کریجینگ است. بدین مفهوم که مقدار تخمین کمیت در نقاط نمونه‌برداری با مقدار اندازه‌گیری شده برابر می‌باشد و واریانس تخمین صفر می‌گردد (بث و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۱۸۳).

- روش کریجینگ بیزین تجربی (EBK)

این روش یکی از روش‌های درونیابی است که در تحلیل‌های زمین آمار استفاده می‌گردد و نسبت به سایر روش‌های زمین آمار نیازی به تنظیم دستی پارامترها برای دستیابی به جواب‌های دقیق ندارد و طی فرآیند مدل‌سازی این تنظیمات را به صورت خودکار انجام می‌دهد. تفاوت این روش با سایر روش‌های کریجینگ در احتساب خطای‌های برآورد نیم‌تغییرنا است. این در حالی است که در سایر روش‌های کریجینگ، نیم‌تغییرنا از مکان‌هایی با داده‌های مشخص استفاده می‌کند و سپس از این نیم‌تغییرنای منفرد برای پیش‌بینی در مکان‌های نامشخص استفاده می‌شود. از جمله مزایای روش EBK می‌توان نیاز به حداقل عملیات در مدل‌سازی، پیش‌بینی خطای استاندارد دقیق‌تر از سایر روش‌های کریجینگ، پیش‌بینی دقیق داده‌های غیرایستا و دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌های کریجینگ برای داده‌های کوچک اشاره نمود (فینزگار و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۳۵).

- معیار آنترופی

آنترופی را می‌توان به عنوان معیاری از میزان آشفتگی در داخل یک سیستم تعریف نمود. اگر X متغیر تصادفی گسسته با مقادیر x_1, x_2, \dots, x_n و احتمالات متناظر p_1, p_2, \dots, p_n باشد، آنترופی شانون از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود (سینک، ۲۰۱۱):

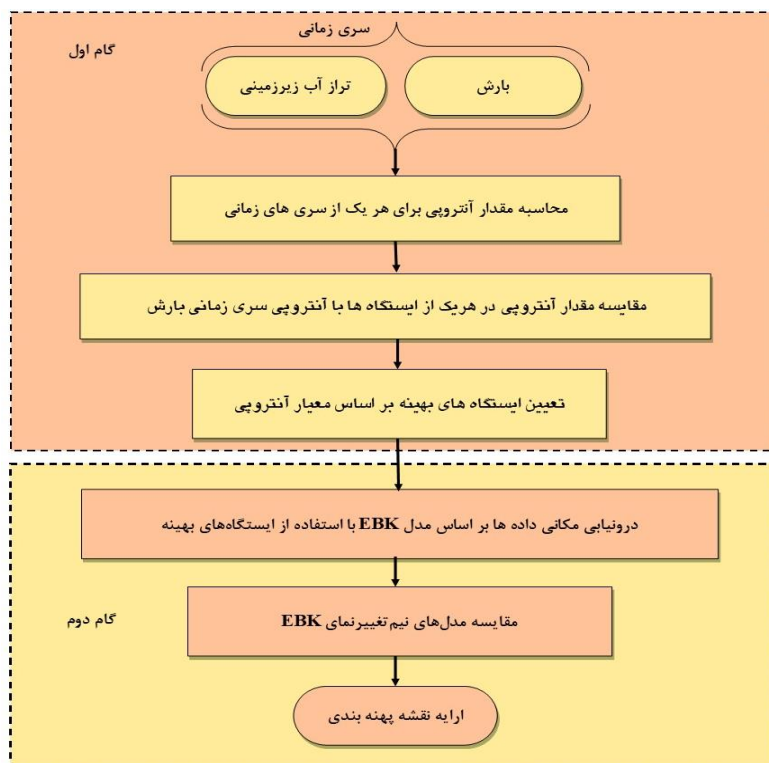
$$H(x) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i) \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

که در این رابطه‌ی $H(X)$ آنترופی X است که تابع آنترופی شانون نیز نامیده می‌شود. P توزیع احتمال است و به صورت $P=\{p_i, i=1,2,3,\dots,N\}$ تعریف می‌شود. احتمال وقوع یک پدیده، عدم قطعیت آن و میزان آنترופی یا اطلاعات با هم مرتبط هستند. اگر احتمال وقوع پدیده‌ای زیاد باشد، میزان آنترופی آن کم است و بالعکس. به عبارت دیگر، برای تبیین پدیده‌های با احتمال وقوع کم و عدم قطعیت زیاد، اطلاعات آنترופی زیادی لازم است. معیار آنترופی در واقع گویای میزان نوسانات سری زمانی است و مقدار این معیار با شدت نوسان سری رابطه‌ی مستقیم دارد (سینک، ۲۰۱۱). آنترופی شبکه‌ی پایش، میزان گستردگی مقادیر آن را نشان می‌دهد یعنی هرچه مقدار $H(X)$ بیشتر باشد، میزان گستردگی شبکه نیز بیشتر است. در مساله‌ی بهینه‌سازی ایستگاه‌هایی حذف می‌شوند که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار آنترופی نداشته باشند.

- مدل ترکیبی

همانگونه که بیان شد هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش تراز آب‌های زیرزمینی با بهره‌گیری از معیار آنترופی و مکانیابی تراز آب در دشت سیلاخور به روش EBK است. در گام نخست با محاسبه‌ی مقدار آنترופی در هر یک از ایستگاه‌ها، ایستگاه‌های بهینه برای شبکه‌ی پایش جدید مشخص می‌شوند. در گام دوم، بر اساس ایستگاه‌های بهینه به دست آمده مکانیابی تراز آب زیرزمینی بر اساس مدل EBK صورت می‌پذیرد. شکل (۳)، روندنمای این مدل را نشان می‌دهد. معیار آنترופی مطابق

با رابطه‌ی (۳) در نرم‌افزار Matlab کد نویسی شد و پس از آن تخمین مکانی در نرم‌افزار ArcGIS صورت پذیرفت.



شکل (۳) روندنمای مدل بهینه مدیریت مکانی-زمانی آب‌های زیرزمینی (منبع نویسندگان)

- آماره‌های ارزیابی مدل‌ها

به منظور ارزیابی و صحت سنجی داده‌های درونیابی شده در مدل مکانی EBK از سه معیار ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطای استاندارد شده (RMSSE) و ضریب همبستگی^۱ (CC) که در روابط (۴) تا (۶) نشان

1- Correlation Coefficient

داده شده است، استفاده گردید. بهترین و دقیقترین مدل، مدلی است که در آن مقدار CC به یک و مقدار RMSE به صفر نزدیکتر باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_{mi})^2} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$RMSSE = \frac{RMSE}{s} \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$CC = \frac{\sum Z_p * Z_m}{n}, \quad Z_p = \frac{X_p - \bar{X}_p}{n}, \quad Z_m = \frac{X_m - \bar{X}_m}{n} \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

که در این روابط، هرکدام از پارامترها به ترتیب عبارتند از: X_{pi} : مقدار داده مشاهده شده، X_{mi} : مقدار داده‌ی محاسبه شده توسط مدل، \bar{X}_p : میانگین مقدار مشاهده شده، \bar{X}_m : میانگین مقدار داده محاسبه شده توسط مدل، n : تعداد داده‌ها (کماسی و شرقی، ۲۰۱۶: ۱۹۳۷).

نتایج و بحث

در گام نخست داده‌های ۱۰ سال تراز آب زیرزمینی در دشت سیلاخور به صورت ماهانه تنظیم و به عنوان ورودی به نرم‌افزار Matlab معرفی گردید. از آنجایی که سری زمانی فرآیندهای هیدرولوژیکی بسیار پیچیده است بنابراین تجزیه سری زمانی به چند بازه‌ی زمانی کوچک موجب درک بهتر و درست‌تر از رفتار کوتاه و بلندمدت سری زمانی داده‌ها می‌شود. به همین منظور سری تراز آب زیرزمینی به ده بازه‌ی زمانی ۱۲ ماهه برای هر ایستگاه تقسیم شد تا برنامه برای هرکدام از این زیرسری‌ها مقدار آنتروپی در هر یک از ۲۹ ایستگاه موجود را محاسبه نماید. در ابتدا مطابق با رابطه‌ی (۳) مقدار آنتروپی برای هر بازه‌ی زمانی محاسبه گردد. پس از محاسبه‌ی مقدار آنتروپی تراز آب زیرزمینی، مقدار آنتروپی برای سری زمانی بارش در همان بازه‌ی زمانی نیز محاسبه می‌گردد. جدول (۲)، مقدار آنتروپی را برای سری زمانی بارش و جدول (۳) مقدار آنتروپی را برای هر کدام از ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.

جدول (۲) مقدار آنتروپی در سری زمانی بارش

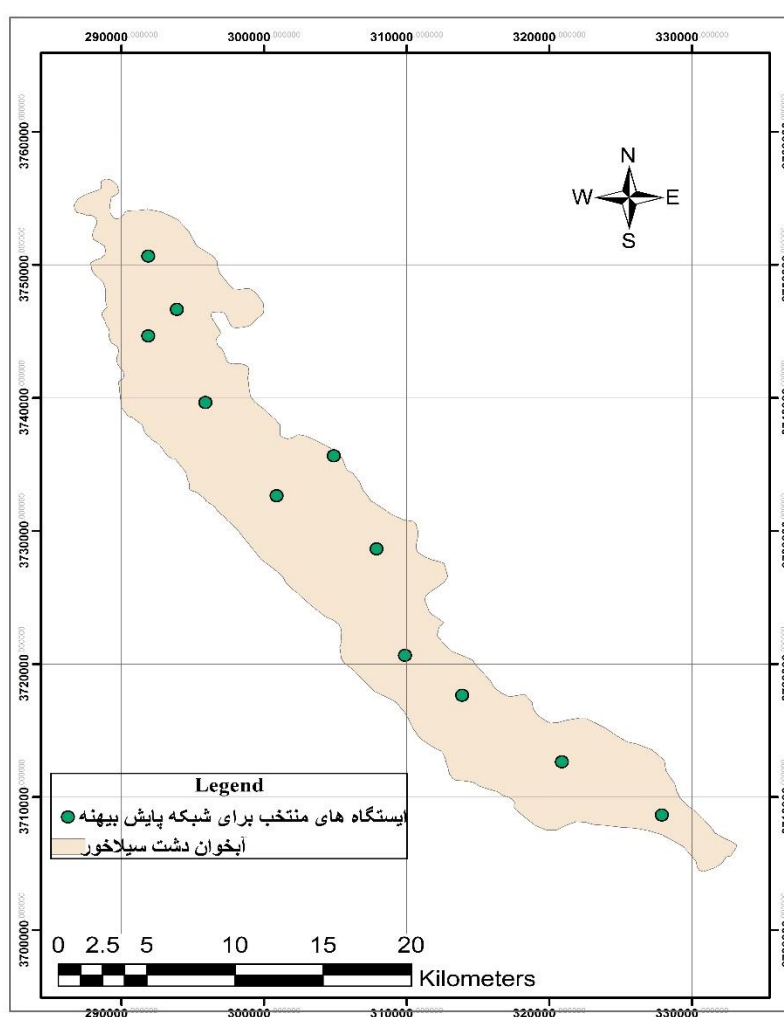
سری زمانی	-۱۳۸۴	-۱۳۸۵	-۱۳۸۶	-۱۳۸۷	-۱۳۸۸	-۱۳۸۹	-۱۳۹۰	-۱۳۹۱	-۱۳۹۲	-۱۳۹۳
سری زمانی	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲
آنتروپی بارش	۰/۲۸	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۸۵	۰/۴۲	۰/۳۷

جدول (۳) مقدار آنتروپی در سری زمانی تراز آب زیرزمینی در هر یک از ایستگاه‌ها

ایستگاه	-۱۳۸۴	-۱۳۸۵	-۱۳۸۶	-۱۳۸۷	-۱۳۸۸	-۱۳۸۹	-۱۳۹۰	-۱۳۹۱	-۱۳۹۲	-۱۳۹۳
منتخب	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲
۱	*	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۲۷
۲	*	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۳۰	۰/۲۵
۳		۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۳۸	۰/۱۱	۰/۶۸	۰/۰۷
۴	*	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۱۶
۵	*	۰/۲۸	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۴۲	۰/۳۷
۶		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۳	۰/۰۵	۰/۰۰
۷		۰/۱۴	۰/۴۹	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۴۲
۸	*	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۲۳
۹		۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۴۸	۰/۰۲	۰/۵۵	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۰۱
۱۰		۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۱	*	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴
۱۲		۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۶۲	۰/۴۰
۱۳		۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۶۴	۰/۴۵	۰/۷۲	۰/۳۰	۰/۶۸
۱۴	*	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱
۱۵		۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۵
۱۶		۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۷
۱۷	*	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۱
۱۸		۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۵۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۴
۱۹	*	۰/۴۷	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۰۸	۰/۴۷	۰/۳۰	۰/۱۲	۰/۲۸	۰/۲۹
۲۰		۰/۴۸	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۴۶	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۰۳
۲۱		۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۶
۲۲		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱
۲۳		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴
۲۴		۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲
۲۵		۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲
۲۶	*	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۶۵	۰/۹۵	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۳۴	۰/۲۹
۲۷		۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۳۳	۰/۰۲
۲۸	*	۰/۲۰	۰/۳۱	۰/۸۶	۰/۵۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۵۱	۰/۰۶
۲۹		۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۳۸

مطابق با پژوهش قضاوی و رضانی‌سربندی (۱۳۹۶)، که به بررسی تأثیر میزان بارش بر تغییرات کمی و کیفی آب آبخوان پرداخته بودند، بی‌نظمی سری زمانی بارش بر مقدار تغذیه‌ی آبخوان مؤثر است. در واقع مقدار آنتروپی بارش و تغییرات آن در بازه‌های زمانی مختلف بر مقدار و تغییرات آنتروپی تراز آب زیرزمینی در همان بازه‌ی زمانی تأثیرگذار است. به این مفهوم که مقدار آنتروپی به دست آمده در هریک از ایستگاه‌های شبکه‌ی پایش باید مطابقت مناسبی از منظر تغییرات با آنتروپی سری زمانی بارش داشته باشد. اگر مقدار آنتروپی بدست آمده از ایستگاهی مطابق با تغییرات آنتروپی سری زمانی بارش نباشد، بیانگر آن است که آن ایستگاه نتوانسته است تراز آب را بر مبنای بی‌نظمی سری زمانی بارش و تغذیه‌ی آبخوان نشان دهد. مقایسه‌ی جدول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که تغییرات آنتروپی برای یازده ایستگاه از میان ایستگاه‌های موجود مشابه تغییرات آنتروپی سری زمانی بارش است و نیز مقدار آنتروپی این ایستگاه‌ها نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشتر است. این موضوع بیانگر آن است که ایستگاه‌های منتخب متناسب با تغییرات آنتروپی بارش از خود واکنش نشان می‌دهند. به عبارت دیگر قرائت تراز آب زیرزمینی در این ایستگاه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف مطابق با تغییرات بارش بوده و نتایج حاصل از آن‌ها دور از واقعیت و انتظار نیست. این یازده ایستگاه در جدول (۳) با ستاره مشخص شده است. تعدادی از ایستگاه‌ها در برخی از بازه‌های زمانی مقدار آنتروپی را صفر نشان می‌دهد. این مقدار بیانگر آن است که در آن بازه زمانی ایستگاه مورد نظر مطابق با نوسانات بارش نمی‌تواند معیار دقیقی از تراز ایستابی در دشت سیلاخور را نشان دهد. همچنین پایش این ایستگاه‌ها نه تنها پایش بینی مکانی را دقیق‌تر نمی‌کند بلکه هزینه‌های ناشی از پایش را تحمیل می‌نماید. نتایج به دست آمده از گام اول یک شبکه با ۱۱ ایستگاه را از بین ۲۹ ایستگاه موجود مشخص می‌نماید. مقدار RMSE این شبکه ۰/۷۸ متر است. مطابق با گام به جای پایش یک شبکه با ۲۹ ایستگاه می‌توان از داده‌های به دست آمده از یک شبکه با ۱۱ ایستگاه استفاده نمود. در این گام با کاهش ۶۲٪ از ایستگاه شبکه، هزینه‌های پایش شبکه و

مقدار RMSE بهینه شده است. این موضوع به سبب انتخاب بهینه نقاط پایش در بین نقاط شبکه‌ی موجود می‌باشد. شکل (۴) توزیع مکانی این شبکه‌ی جدید را نشان می‌دهد.



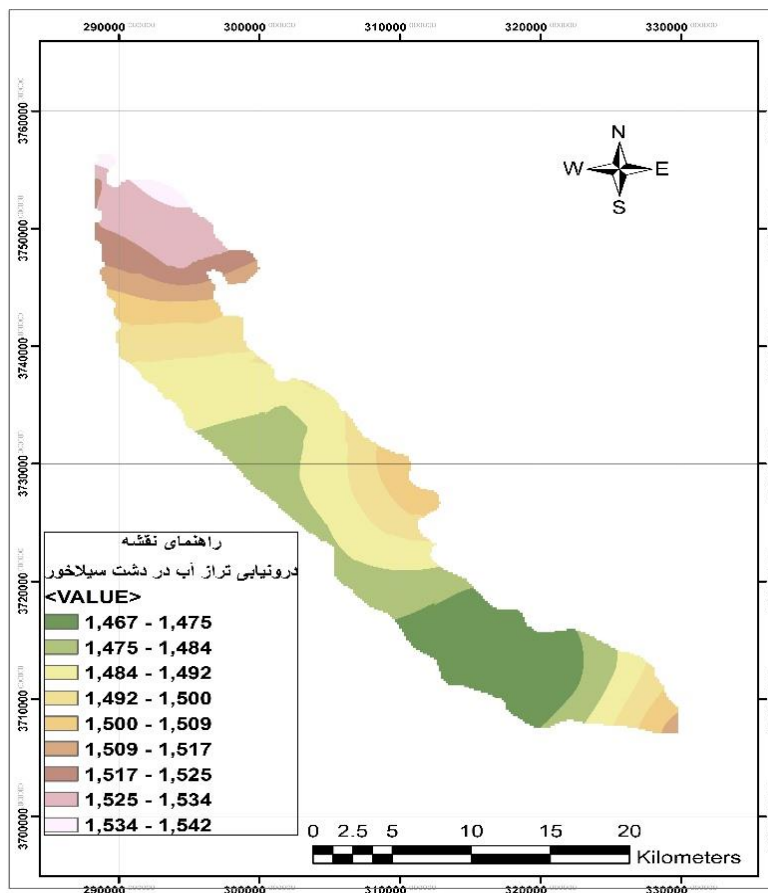
شکل (۴) ایستگاه‌های منتخب در شبکه‌ی پایش بهینه بر اساس معیار آنتروپی

همانگونه که در شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود، معیار آنتروپی علاوه بر حذف ایستگاه‌های ناکارآمد از نگاه تشخیص بی‌نظمی، توزیع مکانی ویژه‌ای از ایستگاه‌ها را نیز ارایه کرده است. درونیابی مکانی داده‌ها در نرم‌افزار ArcGIS و در بخش Geostatistical Analys به روش EBK مدلسازی شد. برای تراز یابی در این بخش، داده‌های ماهانه تراز آب در ایستگاه‌های بهینه بدست آمده در گام نخست به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطلق بودن تخمین در درونیابی و مکانیابی از ویژگی‌های عمده مدل EBK می‌باشد. بدین مفهوم که مقدار تخمین کمیت در نقاط نمونه‌برداری با مقدار اندازه‌گیری شده برابر است و واریانس تخمین صفر می‌گردد. این ویژگی سبب می‌شود که تخمین‌گر EBK در رسم خطوط هم‌تراز از حداکثر نقاط نمونه‌برداری عبور نموده و تمایلی به بسته شدن و دور زدن را نداشته باشد و از مرز محدوده‌ی مورد مطالعه فراتر رود. مدل EBK از چهار نیم‌تغییرنما برای درونیابی مکانی تراز آب زیرزمینی استفاده می‌نماید.

نتایج مربوط به ارزیابی متقابل برآورد تراز آب زیرزمینی در جدول (۴) ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشخص است، کمترین مقدار خطای جذر مربع خطا استاندارد شده بین مقادیر واقعی و برآورد شده در روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended با مقدار $0/99$ است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended، بر اساس معیار میانگین توان دوم خطا ($20/87$) و بیشترین ضریب همبستگی ($0/82$) بهترین روش درونیابی می‌باشد. روش‌های کریجینگ بیزین با مدل‌های Whittle Detrended، K-Bessel و Exponential Detrended به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. شکل (۵)، پهنه‌بندی تغییرات سطح ایستابی را برای داده‌های محاسباتی نشان می‌دهد. با بررسی مراکز جمعیتی در اطراف چاه‌ها، روند برداشت بیش از حد از این چاه‌ها در منطقه سبب کاهش سطح ایستابی در منطقه شده است. نیز همانگونه که از شکل (۵) برمی‌آید سطح ایستابی به سمت شمال شرقی روند کاهشی دارد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با پیشروی به سمت شمال شرقی تراز ارتفاعی سطح زمین افزوده شده و به دنبال آن عمق سطح ایستابی اضافه شده است.

جدول (۴) خطاهای تخمین زده شده برای هر یک از روش‌های نیم تغییرنما در مدل EBK

CC	RMSEE	RMSE (m)	نیم تغییرنما
۰/۸۲	۰/۹۹	۲۰/۸۷	K-Bessel Detrended
۰/۸۱	۰/۹۳	۲۱/۷۵	K-Bessel
۰/۸۱	۰/۹۵	۲۱/۵۹	Whittle Detrended
۰/۸۰	۱/۰۲	۲۲/۰۰	Exponential Detrended



شکل (۵) نقشه بهینه‌بندی بر اساس یازده ایستگاه منتخب شبکه‌ی پایش بهینه

نتیجه گیری

شبکه‌ی پایش آب‌های زیرزمینی می‌تواند ارایه‌دهنده‌ی اطلاعاتی از قبیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان، توزیع بار هیدرولیکی در زمان و مکان، میزان جریان آب زیرزمینی، میزان تغذیه و میزان برداشت، کیفیت آب، جهت جریان، میزان مواد آلاینده و خصوصیات منابع آلوده‌کننده باشد. به کمک این داده‌ها می‌توان رفتار آبخوان در آینده را پیش‌بینی کرد و رویکردهای مدیریتی مناسب را برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی در پیش گرفت. نظر به اینکه اجرای برنامه‌های پایش منابع آب هزینه‌بر و نیاز به صرف وقت می‌باشد، بررسی روشی برای بهینه‌سازی شبکه‌ی موجود ضروری است. در فرآیند بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش منابع آب زیرزمینی، شناسایی تعداد و موقعیت چاه‌ها در هنگام مواجهه با حجم بالای داده‌ها در گستره‌ی زمانی مورد پژوهش حایز اهمیت است. شبکه‌ی پایش کمی آب زیرزمینی نقش ویژه‌ای در مطالعات آب زیرزمینی و پیش‌بینی رفتار آینده جریان آب زیرزمینی در آبخوان ایفا می‌کند. بنابراین در این پژوهش سعی شده است با بهره‌گیری از معیار آنتروپی یک شبکه‌ی پایش سطح آب زیرزمینی از میان ایستگاه‌های موجود انتخاب گردد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که تنها مقدار آنتروپی سری زمانی تراز آب زیرزمینی ۱۱ ایستگاه از میان ۲۹ ایستگاه موجود مطابق با سری زمانی بارش است. در واقع با بهره‌گیری از تغییرات آنتروپی سری زمانی بارش و تأثیر آن بر میزان تغذیه‌ی آبخوان، ایستگاه‌های فعال شناسایی شده است. شبکه‌ی بهینه، با کاهش ۶۲٪ از ایستگاه‌ها، هزینه پایش را کاهش داده و مقدار RMSE به دست آمده برای این شبکه برابر ۰/۷۸ متر است که مقدار مناسبی را نشان می‌دهد. در گام بعدی درون‌یابی مکانی تراز آب زیرزمینی بر اساس داده‌های ۱۱ ایستگاه بهینه صورت پذیرفت. کمترین مقدار خطای جذر مربع خطا استاندارد شده بین مقادیر واقعی و برآورد شده در روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended با مقدار ۰/۹۹ است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended، بر اساس معیار میانگین توان دوم خطا (۲۰/۸۷) و بیشترین ضریب همبستگی (۰/۸۲) بهترین روش درون‌یابی می‌باشد.

References

- Akbarzadeh M, Ghahraman B, (2013), **A combined strategy of entropy and spatio-temporal kriging in determining optimal network for groundwater quality monitoring of Mashhad basin.** Journal of water and soil. Vol. 27, No. 3, PP. 613-629.
- Barzegar, R., Fijani, E., Moghaddam, A.A. and Tziritis, E., (2017), **Forecasting of groundwater level fluctuations using ensemble hybrid multi-wavelet neural network-based models,** Science of the Total Environment, Vol. 599, PP. 20-31.
- Bhat, S., Motz, L., Pathka, C., and Kuebler, L. (2012), **Designing Groundwater Level Monitoring Network Using Geostatistical A Case Study and Central Florida U.S.A.**World. Environmental and Water Resources Congress, PP. 48-58.
- Bhat, S., Motz, LH., Pathak, C. and Kuebler, L., (2015), **Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA.** Environmental monitoring and assessment, Vol. 187, No. 1, PP. 4183.
- Esquivel, J.M., Morales, G.P., & Esteller, M.V. (2015), **Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis,** Water resources management, Vol. 29, No. 9, PP.3175-3194.
- Finzgar, N., Jez, E., Voglar, D. and Lestan, D., (2014), **Spatial distribution of metal contamination before and after remediation in the Meza Valley, Slovenia,** Geoderma, Vol. 217, PP. 135-143.
- Ghazavi., R. & Ramezani, M. (2017), **Investigation the Effects of Precipitation Change and Groundwater Overextraction on Both Quantitative and Qualitative Changes of Groundwater (Rafsanjan Plain),** Journal of Hydrogeomorphology, Vol. 3 No. 12, PP. 111-129.
- Ghorbani, K., Farnia, E. & Salarijazi, M. (2018), **Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in ground water level zoning,** Journal of water and soil conservation, Vol. 25, No. 1, PP. 165-182.
- Hosseini, M., & Kerachian, R. (2017), **A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks.** Environmental monitoring and assessment, Vol. 189, No. 9, PP. 433.

- Khader, A.I. and McKee, M., (2014), **Use of a relevance vector machine for groundwater quality monitoring network design under uncertainty**, Environmental modelling & software, Vol. 57, PP. 115-126.
- Komasi, M. and Sharghi, S., (2016), **Hybrid wavelet-support vector machine approach for modelling rainfall-runoff process**, Water Science and Technology, Vol. 73, No. 8, PP.1937-1953.
- Komasi, M., Sharghi, S. & Nourani, V. (2017), **Identifying Effective Factors on Decline in Groundwater Level Using Wavelet-Entropy Index (Case Study: Silakhor Plain Aquifer)**, Journal of Hydrogeomorphology. Vol. 3, No. 9, PP. 63-86.
- Leach, JM., Coulibaly, P. and Guo Y., (2016). **Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge**, Advances in water resources. Vol. 96, No. 1, PP. 108-19.
- Merati, E.,T,A., Parsafar, N. (2017), **Qualitative Zoning of Groundwater Resources Using Geostatistical and GIS Methods (Case Study: Soleymanshah Watershed)**, Water and Soil Science, Vol. 27, No. 2, PP.237-248.
- Mogheir, Y., De Lima, J.L.M.P., & Singh, V.P. (2003), **Assessment of spatial structure of groundwater quality variables based on the entropy theory**, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 7, No. 5, PP. 707-721.
- Mokhtari, D., Zandkarimi, A. & Zandkarimi, S. (2016), **The Application of the Geo-statistical Methods in Optimizing and Strengthening the Network of the Rain Gauge Stations in Kordestan Province**, Journal of Hydrogeomorphology, Vol. 2, No. 8, PP. 53-72.
- Pourshahabi, S., Talebbeydokhti, N., Rakhshandehroo, G. and Nikoo, M.R., (2018). **Spatio-Temporal Multi-Criteria Optimization of Reservoir Water Quality Monitoring Network Using Value of Information and Transinformation Entropy**, Water Resources Management, PP.1-16.
- Shayan, S., Yamani, M. & Yadegari, M. (2017), **Zoning of the Land Subsidence in the Hamedan Qarachai Watershed**, Journal of Hydrogeomorphology. Vol. 3, No. 9, PP. 139-158.
- Singh, V.P., (2011), **Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory**, Journal of Hydrologic Engineering, No. 5, PP. 421-433.