فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست
سال سیزدهم، شماره ۴۹، زمستان ۹۸

تعیین چاه‌های پیزومتری شاخص در پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی با لحاظ اطلاعات مکانی و زمانی چاه‌ها

نوید هوشنگی

استادیاردانشگاه صنعتی اراک، دانشکده مهندسی علوم زمین، گروه مهندسی نقشه برداری، اراک، ایران، hooshangi@arakut.ac.ir

چکیده

دقت تخمین سطح آب‌های زیرزمینی تابعی از تراکم، مکان و دقت نقاط برداشت‌شده می‌باشد. هرچه تراکم چاه‌های پیزومتری افزایش یابد دقت تخمین سطح بهتر می‌شود، اما حفر و نگه‌داری چاه‌های پیزومتری همواره هزینه‌بر و زمان‌بر است. هدف اصلی این تحقیق کمینه کردن تعداد چاه‌های پیزومتری و مشخص کردن چاه‌های شاخص جهت پیش‌بینی دقیق سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد. نوآوری اصلی این تحقیق لحاظ نمودن اطلاعات مکانی و زمانی در بهینه سازی تعداد چاه‌ها می‌باشد. این تحقیق در سه مرحله‌ی اصلی انجام شد: ۱) اخذ اطلاعات ۷۵ چاه پیزومتری دشت تبریز و جست‌وجوی اکتشافی آن‌ها، ۲) پیاده‌سازی الگوریتم جامعه مورچه‌ها در تلفیق با روش کریجینگ ساده و مشخص کردن چاه‌های شاخص در هر سال، ۳) محاسبه‌ی ارزش نهایی چاه‌ها متناسب با تعداد دفعاتی که هر چاه در محاسبات مربوط به سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ حضور داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که از ۷۵ چاه موجود، در هر ماه به‌طور متوسط ۱۸ چاه اطلاعات محدودی به محاسبات اضافه می‌کند. از این ۷۵ چاه تنها دو چاه در هیچ کدام از محاسبات ۳۶ ماه مورد بررسی به عنوان چاه با ارزش شناخته نشده‌اند و ۱۵ چاه همواره جز چاه‌ها با ارزش نسبی کمتر از ۱۱ درصد هستند. لذا تعداد چاه‌های پیزومتری را می‌توان به اندازه‌ی ۲۰ درصد (۱۵ چاه) کاهش داد، بدون این‌که در تخمین سطح آب زیرزمینی منطقه کم بود داده‌ای حس شود. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از اطلاعات زمانی چاه‌ها و روش پیشنهادی می‌توان چاه‌های شاخص را شناسایی و با صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ی کمتر تا حدی به دقت سطح اولیه رسید.

واژگان کلیدی: شبکه پایش آب‌های زیرزمینی، الگوریتم جامعه مورچه‌ها، کریجینگ، اطلاعات مکانی زمانی، دشت تبریز.

مقدمه

یکی از مشخصه‌های مهم در پروژه‌های منابع آب زیرزمینی، پایش سطح ایستابی است که باید تا حد امکان با دقت زیادی اندازه‌گیری شود (گنجی خرم دل و همکاران، ۱۳۹۴). نظارت مستمر بر میزان تغییرات سطح و کیفیت آب زیرزمینی در مدیریت منابع آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است (میرزائی ندوشن و همکاران، ۱۳۹۸؛ Destandau et al., 2020) در بیشتر مناطق کشور اطلاعات سطح ایستابی یک دشت، از طریق اندازه‌گیری سطح آب چاه‌های پیزومتری نسبت به سطح زمین جمع‌آوری می‌شوند (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۵). عموماً چاه‌های مشاهداتی زیرزمینی به صورت ماهیانه و در مکان‌های نمونه‌گیری ثابت به صورت نقطه‌ای پایش می‌شوند. مکان و تعداد این چاه‌ها نقش اساسی در تخمین سطح آب زیرزمینی کل منطقه دارد (Farlin et al., 2019). در اکثر برنامه های پایش و نظارت، طراحی شبکه‌ی نمونه‌گیری بر اساس رویه های معتبر آماری صورت نمی‌گیرد (Duan et al., 2019). در این گونه نمونه‌برداری نقطه‌ای، فرض بر این است که عدد به‌دست‌آمده در یک چاه متعلق به کل آن منطقه است. تعمیم نتایج به سایر نقاط فاقد آمار ایجاب می‌کند که شبکه‌ی چاه‌ها از تراکم مناسبی برخوردار باشد، به‌طوری‌که تخمین مقدار بقیه نقاط بتواند با دقت بالایی صورت بگیرد. چراکه هدف تعیین و تخمین جامعه است و نمونه‌برداری برای تجزیه‌وتحلیلی است که در نهایت به جامعه تعمیم داده شود. در این صورت، اهمیت هر نمونه بستگی به میزان اطلاعاتی دارد که در مورد جامعه ارائه می‌دهد. به‌منظور طراحی و تو سعه‌ی یک سامانه‌ی پایش در بخش مدیریت منابع آب زیرزمینی لازم است علاوه بر موضوع کفایت و تعداد اولیه داده‌ها، موقعیت و تعداد چاه‌ها به صورت پیوسته مدنظر برنامه‌ریزان قرار بگیرد (گنجی خرم دل و همکاران، ۱۳۹۴). در طراحی

اولیه‌ی شبکه‌های پایش نمونه‌برداری تصادفی مد نظر قرار می گیرد، اما برای نمونه برداری ثانویه اطلاعات قبلی می تواند مورد تحلیل قرار گیرد (Duan et al., 2019). ارزیابی شبکه‌ی پایش موجود در بر رسی سطوح و تعیین ایستگاه‌های پایش اصلی و فرعی گامی مهم در بهبود کارایی و بهنگام سازی شبکه پایش می‌باشد (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴). چاه‌های پیزومتری از نظر تعداد و تراکم نقش مهمی در پایش منابع آب زیرزمینی دارند(Farlin et al., 2019). تعیین نقاط مهم جهت نمونه‌برداری به لحاظ کاهش حجم نمونه‌ها و صرفه‌جویی در هزینه و زمان و افزایش دقت نمونه‌برداری بسیار مهم است (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Sheikhy Narany et al., 2015). با توجه به وسعت آبخوان‌ها و فراوانی منابع آب، آماربرداری عموماً هزینه‌بر بوده و برداشت اطلاعات همه‌ی چاه‌ها اغلب مدت‌زمان زیادی طول می‌کشد (Chandan et al., 2017). دقت نمونه‌برداری از نظر مکان ایستگاه و مقدار برداشت‌شده در تخمین سطح مؤثر می‌باشد. محدودیت بودجه و هزینه های ابزار پایش از یک طرف و اهمیت کنترل کمی و کیفی آب زیرزمینی از طرف دیگر موجب می‌شود که تعیین چاه های انتخابی و محدود شدن آماربرداری‌های دوره‌ای ضروری باشد (افشار و همکاران، ۱۳۸۵؛ نظری و همکاران، ۱۳۹۰).

در شبکه‌ی پایش آب‌های زیرزمینی ضرورت دارد که تعدادی از چاه‌ها به عنوان چاه‌های شاخص در بخش‌های مختلف آبخوان انتخاب گردیده و در فصول مختلف به طور مستمر مورد اندازه‌گیری قرار گیرند (نظری و همکاران، ۱۳۹۰). هدف از بهینه‌سازی شبکه پایش این است که با کمترین هزینه بیش‌ترین اطلاعات از شبکه‌ی منابع آبی زیرزمینی به دست آید. تهیه و به کارگیری روش‌های علمی طراحی شبکه‌ی پایش یکی از مسائل پیچیده در هیدرولوژی به شمار می‌آید. روش‌های پایش سطح آب زیرزمینی شامل روش‌های آماری (نمونه‌گیری ساده تصادفی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و روش‌های رگرسیون)، روش‌های پیشرفته‌ی زمین‌آمار (روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ، کوکریجینگ و غیره)، بهینه‌سازی (شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک) و روش نوین مانند تئوری آنتروپی و تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. در ادامه به اختصار نکات بارز روش‌های موجود بیان می‌شود.

تحلیل‌های آماری: در روش‌های تحلیل آماری برای تعیین چاه های شاخص، از آماره های مختلف از جمله رژیم آبدهی، نوع ساختار و نوع چاه، نوع کشت و غیره استفاده می‌شود (نظری و همکاران، ۱۳۹۰). از تحلیل آماری چندمتغیره از جمله آنالیز خوشه‌ای به‌وفور برای کاهش حجم داده‌ها و تعیین نمونه‌های مؤثر در پراکندگی کیفیت منابع آبی استفاده شده است. آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آنالیز فاکتور های اصلی (PFA) به عنوان یکی از تکنیک های کاهش داده در ارزیابی ایستگاه های کنترل پارامترهای کیفی آب رودخانه کارون استفاده گردیده است (نوری و همکاران، ۱۳۸۶). روش PCA در تعیین چاه‌های مؤثر در دشت قیدار و دشت تبریز نیز بر اساس شناسایی مؤلفه‌های توصیف‌کننده واریانس سیستم استفاده شده‌اند (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴).

تحلیل های زمین‌آماری: در تحلیل‌های زمین‌آماری، آماره‌های مکانی داده‌ها مانند شباهت مکانی استفاده می شود. هرشفیلد (۱۹۶۵) برای اولین بار استفاده از مفهوم همبستگی مکانی، پیشنهاد کرد که میانگین فاصله بین ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شود که منجر به یک ضریب همبستگی مکانی ۰/۹ بین آمار ایستگاه‌ها شود (David, 1965). زمین‌آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی به‌وفور برای اضافه یا کم کردن چاه‌های جدید (طراحی بهینه شبکه پایش) استفاده شده که عموماً به منظور کاستن مقادیر خطای محاسبه شده در روش کریجینگ بوده است (Chandan et al., 2017; Farlin et al., 2019). گنجی خرم‌دل (۱۳۹۴) از روش کریجینگ برای ارزیابی طراحی شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی استفاده کرد (گنجی خرم دل و همکاران، ۱۳۹۴).

روش‌های بهینه‌سازی: روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های پایش می‌باشند. در سال ۲۰۰۵، جلالی و افشار از الگوریتم جامعه مورچه ها برای طراحی و بهره‌برداری بهینه هیدرو سیستم‌ها استفاده کردند (افشار و همکاران، ۱۳۸۵). افشار و همکاران (۱۳۸۷) به مکان یابی بهینه ایستگاه‌ها پایش در شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها پرداختند (افشار و همکاران، ۱۳۸۵). از الگوریتم ژنتیک نیز به‌وفور منظور بهینه‌سازی شبکه پایش کیفیت آب رودخانه استفاده شده است .نتایج

این تحقیقات نشـــان داد که به کمک روش‌های فراابتکاری می‌توان با دقت قابل قبولی تعدادی از چاههای مشـــاهداتی اضافی را حذف کرد.

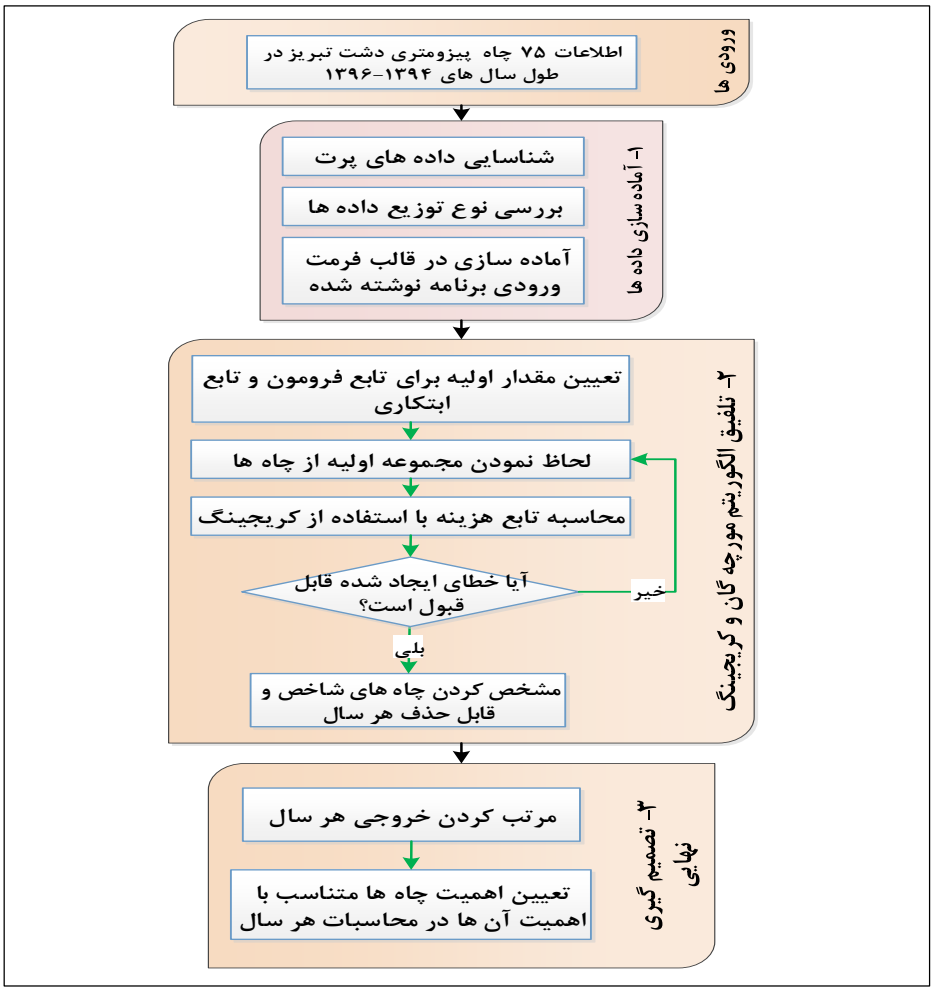
تئوری آنتروپی: این روش بر اســاس تئوری اطلاعات و با اندازه‌گیری آنتروپی و همبســتگی شــکل‌گرفته کار می‌کند. در این روش به منظور یافتن بهترین مجموعه‌ی مکانی برای قرار دادن ایستگاه‌های پایش، یک مسئله‌ی بهینه سازی چند متغیره حل می‌شـــود. اکبر زاده و همکاران (۱۳۹۵) پس از برازش بهترین مدل آنتروپی شـــبکه با اســـتفاده از میانگین رتبه هر ایســـتگاه و بر مبنای شـــاخص آلودگی نیترات به بهینه‌ســـازی شـــبکه پایش پرداختند (اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۵). اکبر زاده و قهر مان (۱۳۹۲) به تعیین شبکه بهینه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت مشهد با اســـتفاده از آنتروپی و کریجینگ فضایی – زمانی کردند

تصمیم‌گیری چند معیاره: تصمیم‌گیری یکی از موضوعات تحقیق در عملیات و علم مدیر یت اســـت. روش های تصمیم‌گیری چند معیاره یکی از روش‌های رایج در تلفیق چندین معیار تصـــمیم‌گیری که عموماً در تناقض با یکدیگر هستند می‌باشد. روش‌های MCDM در تحقیقات معدودی برای طراحی شـــبکه پایش اســـتفاده شـــده‌اند. در (منا و همکاران، ۱۳۸۵) وضـــعیت کیفی آب رود کارون در محل ایســتگاه‌های نمونه‌برداری موجود بررســی و با اســتفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره محل و تعداد ایستگاه‌ها با رویکرد تأثیر منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای ارزیابی و اولویت‌بندی شدند.

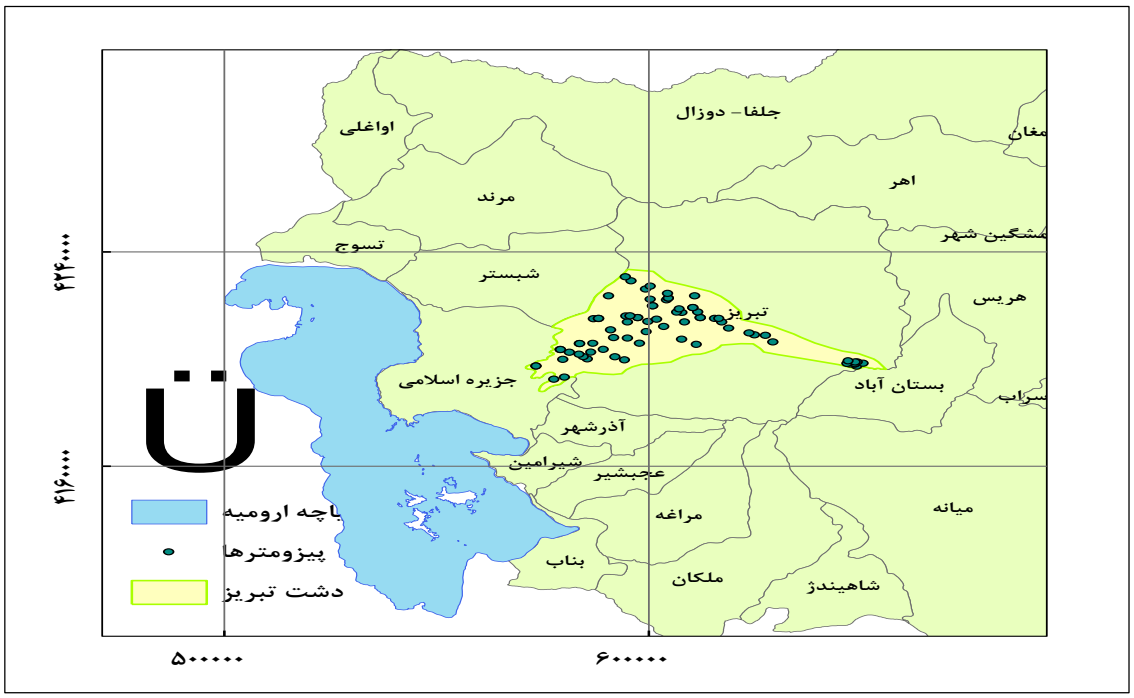
نتایج ســوابق تحقیق پیشــین نشــان می‌دهد که اســتفاده از زمین‌آمار و به خصوص روش کریجینگ کارایی قابل‌توجهی در پیش‌بینی و پایش منابع آب زیرزمینی دا شته و نسبت به سایر روش‌های طراحی شبکه بیشتر کاربرد داشته است. در ســـال های اخیر طراحی شـــبکه های پایش با روش های بهینه‌ســـازی مانند ژنتیک، الگوریتم جامعه مورچه ها در تحقیقات داخلی بیشـــتر مورد توجه قرار گرفته اســـت. در روش‌های بر خواســـته از زمین‌آمار ابتدا بر اســـاس نقاط موجود درون‌یابی صورت می‌گیرد سپس متنا سب با میزان خطا در هر نقطه تعدادی از نقاط حذف می‌شـــوند. ضـــعف این کار در این اســـت که حذف یک‌باره دســـته‌ای از نقاط ممکن اســـت شـــدیداً خطا در یک منطقه را افزایش دهد. برای جلوگیری از این رخداد حذف نقطه‌به‌نقطه پیشـــنهاد شده است (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴). حذف نقطه‌به‌نقطه با تو جه که در آن روال و رو ند نقاطی که در آینده قرار ا ست حذف شوند در نظر گرفته نمی شود، بهینه‌ی کلی را نتیجه نمی‌دهد. ازاین‌رو بهتر ا ست روش‌های بهینه سازی و درون‌یابی (مانند کریجینگ) با هم تلفیق شـــوند. در تلفیق روش های بهینه‌ســـازی با کریجینگ، ابتدا با اســـتفاده از روش های بهینه‌ســـازی دســـته‌ی از نقاط از محاســـبات حذف‌شـــده، ســـپس میزان خطای کلی با روش کریجینگ محاســـبه می‌شـــود. در این روش جواب بهینه زمانی نتیجه خواهد شد که د سته‌ای از نقاط حذف شده و میزان خطای کریجینگ کمترین تغییر را دا شته با شد. ضعف ا صلی این رویکرد این است که عموماً در تحقیقات موجود، این روش برای یک ســـری از اطلاعات (مثلاً اطلاعات یک ماه یا یک سال) اجرا می‌شود. درحالی‌که یک چاه ممکن است در یک ماه یا یک سال اطلاعات مفیدی در اختیار شبکه پایش قرار ندهد ولی در ماه‌ها و سال‌های دیگر چاهی شاخص با شد. ازاین‌رو در این تحقیق برای رفع این نقص رویکردی ارائه می شود که با تلفیق بهینه سازی الگوریتم مورچگان و روش کریجینگ محاســبات در طول دوره‌ای ســه ســاله محاســبه شـــود، تا عملکرد چاه ها در زمان های مختلف نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار بگیرد.

هدف اصـــلی این تحقیق تعیین چاه‌های شـــاخص جهت پایش پیوســته در تخمین ســطح آب‌های زیرزمینی با تلفیق الگوریتم جامعه مورچه‌ها و روش کریجینگ ســاده در یک دوره‌ی زمانی می‌باشد. اکثر روش‌های موجود تنها به تحلیل مکانی اطلاعات بر روی یکســـری از داده‌ها (مثلاً داده های یک ماه) می‌پردازند و تحلیل زمانی داده‌های را مد نظر قرار نمی‌دهند. نوآوری اصـلی این تحقیق ارائه‌ی راهکاری برای تعیین چاه‌های شـــاخص با لحاظ اطلاعات مکانی و زمانی چاه‌های پیزومتری می‌باشـد. بدین منظور اطلاعات چاه‌های دشت تبریز در دوره‌ی سه ساله مدنظر قرار گرفت.

در ادا مه در بخش "مواد و روش ها" ابتدا منطقه‌ی مورد مطالعه (دشـــت تبریز) تشـــریح شـــده و در ادامه روش پیشـــنهادی در قالب ســـه مرحله‌ی جمع‌آوری و تحلیل اکتشـــافی داده‌ها، پیاده‌ســـازی الگوریتم جامعه مورچه‌ها و تلفیق آن با کریجینگ ساده و محاسبه‌ی ارزش نهایی چاه‌ها بیان می شود. در بخش "نتایج و بحث" به پیاده سازی روند پیشنهاد شده پرداخته و نتایج حاصل ارائه می‌شود. در



شکل ۱- مراحل تعیین چاه‌های شاخص با لحاظ اطلاعات مکانی و زمانی



شکل ۲- محدوده منطقه مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های پیزومتری

بخش "نتیجه‌گیری" جمع‌بندی‌ای بر نتایج تحقیق ارائه شده و موضوعاتی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

داده ها و روش کار در بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش

این تحقیق در سه مرحله‌ی اصلی انجام شد. شکل ۱ مراحل اجرای این تحقیق را نشان می‌دهد. در ابتدا اطلاعات چاه‌های پیزومتری دشت تبریز اخذ و تحلیل اکتشافی بر روی آن‌ها انجام شد. در مرحله‌ی دوم الگوریتم مورچگان با تلفیق روش کریجینگ ساده پیاده‌سازی و به ازای اطلاعات ۳ سال اجرا و چاه‌های شاخص و چاه‌های قابل‌حذف در هر سال مشخص شد. در مرحله آخر ارزش نهایی چاه‌ها متناسب با تعداد دفعاتی که هر چاه در محاسبات هر سال حضور داشته‌اند، محاسبه شد.

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

دشت تبریز حدود سه هزار هکتار وسعت دارد و بعد از دشت‌های میانه و جلفا بزرگ‌ترین دشت موجود در استان آذربایجان شرقی می‌باشد (شکل ۲). آب مورد نیاز اراضی کشاورزی دشت تبریز علاوه بر منابع آب‌های سطحی همانند آجی چای، کومرچای و سنیخ‌چای، از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌گردد. دشت تبریز را می‌توان یک آبخوان دو لایه در نظر گرفت که از آبخوان آزاد و تحت‌فشار تشکیل شده است. آبخوان‌های تشکیل شده در تراس های رودخانه آجی چای چندلایه‌ای بوده و از نوع آزاد و تحت‌فشار می‌باشند (ندیری، ۱۳۸۳).

سطح آب های زیرزمینی دشت تبریز از جمله عوامل تأثیرگذار در مسیریابی خط متروی شهر تبریز و نحوه‌ی عملیات اجرایی این پروژه می‌باشد (ندیری، ۱۳۸۳). بعد از مسیریابی خطوط مترو و اتمام عملیات این پروژه و با توجه به هزینه نگه‌داری، نیازی به حفظ همه‌ی این چاه‌ها نخواهد بود (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴). لذا با انتخاب برخی از این چاه‌ها به‌عنوان مؤثرترین چاه، و بهینه کردن تعداد چاه‌ها و هزینه، شبکه موجود برای کارهای آینده نیز قابل‌استفاده می‌باشد. در دشت تبریز چاه‌های مشاهداتی پراکندگی خاصی دارند و تراکم چاه‌ها پیزومتری در برخی مناطق بیشتر است. در این مطالعه از آمار و اطلاعات ۷۵ چاه پیزومتری که در سفره‌ی اول تبریز قرار دارند استفاده شد. این چاه‌ها به‌طور متوسط در بازه‌های ۱/۵–۲/۵ کیلومتر از هم قرار دار ند. پیزومتر ها و همچنین نتایج آماربرداری سراسری در سال ۱۳۹۴– ۱۳۹۶ شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی به منظور کاهش تعداد چاه‌های شبکه‌ی پایش استفاده شد.

روش پیشنهادی

در این بخش روش پیشنهادی برای اجرای تحقیق در سه مرحله بیان می‌شود.

مرحله اول: جمع‌آوری و تحلیل اکتشافی داده‌ها

تحلیل اکتشافی داده‌های مکانی یکی از بخش‌های مهم در کنترل خطای داده‌ها و تأثیرگذار در نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های درون‌یابی می‌باشد (Esri, 2019). قبل از اجرای روش درون‌یابی کریجینگ باید ماهیت داده‌ها مشخص شود. در تحلیل اکتشافی داده‌ها به یافتن خطاها، ساختار داده ها، الگو های مکانی و نحوه‌ی توزیع داده ها پرداخته می شود. به‌طورکلی اهداف موجود در جستجوی داده‌ها را می‌توان به ترتیب زیر بیان کرد:

یافتن خطا: خطا ناشی از منابع مختلفی مانند جمع‌آوری، واردکردن، ثبت، ذخیره‌سازی، فراخوانی، به‌کارگیری و تحلیل اطلاعات و در نهایت تهیه مدل‌ها می‌باشد. داده‌های پرت نتایج تجزیه‌وتحلیل داده‌ها را تحت تأثیر قرار داده و نتایج به‌دست‌آمده را دور از واقعیت می‌کنند. اشتباهات در جمع‌آوری، داده‌های پرت، ثبت و واردکردن دادها با انجام آنالیزهای آماری در این مرحله قابل‌شناسایی هستند (Esri, 2019). این خطاها در مراحل مختلف درون‌یابی خود را نشان می‌دهند.

بررسی نوع توزیع: روش درون‌یابی کریجینگ با پیش‌فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها کار می‌کنند که باید قبل از اجرا کنترل شود (گنجی خرم دل و همکاران، ۱۳۹۴). نرمال بودن داده‌ها با تحلیل‌های توصیفی (چولگی و کشیدگی) و یا تحلیل‌های استنباطی (آزمون کلموگروف–اسمیرنوف و شاپیرو ویلک) انجام می‌گیرد. درصورتی‌که داده‌ها نرمال نباشد برای نرمال‌سازی داده‌ها می‌توان از روش‌های تبدیلی لگاریتم گیری، آرک‌سین و ریشه دوم و باکس–کاکس استفاده کرد (Salah, 2009; Gong et al., 2014).

بررسی روند: رفتار کلی داده‌هایی که مستقل از تغییرات کوچک می‌باشد روند گویند (Esri, 2019). هر سطح از دو بخش تشکیل یافته است. بخش اول روند کلی می‌باشد و بیان‌کننده‌ی ساختار کلی سطح است. بخش دوم تغییرات رنج پایین است که تصادفی بوده وتحت تاثیر خود تحت‌تأثیرخودهمبستگی مکانیمی‌باشد (Hooshangi et al., 2015). هدف از بررسی روند مشاهده‌ی رفتار کلی یک کمیت می‌باشد. حذف روند به‌عنوان پیش‌فرض اجرای روش کریجینگ در فرآیند درون‌یابی است.

مرحله دوم: الگوریتم جامعه مورچه ها و تلفیق آن با روش کریجینگ

برای تعیین مکان بهینه‌ی ایستگاه های پایش در شبکه‌های آب‌رسانی از مدل‌های بهینه‌سازی مختلفی می توان استفاده کرد (افشار و همکاران، ۱۳۸۵؛ Destandau et al., 2020). روش کریجینگ یکی از روش‌های رایج درون‌یابی (اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در نقاطی که اندازه‌گیری زمینی در آن‌ها انجام نشده است) در پدیده‌های مختلف می‌باشد. در روش کریجینگ، بالا بودن مقدار خطای خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) نشان از بالا بودن مقدار خطا بوده و دلیلی بر ناکافی بودن تعداد ایستگاه‌های آماربرداری می‌باشد (میرزائی ندوشن و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس این اصل، زمانی که نقطه یا نقاطی از مجموعه‌ی داده‌ها حذف شود و خطای حاصل از درون‌یابی (RMSE) افزایش نیابد، آن نقطه تأثیر اندکی در فرآیند شکل‌گیری سطح داشته و می‌تواند از مجموعه‌ی نقاط حذف شود. چاهی که در مقدار RMSE نقش بالاتری دارد، به‌عنوان چاه شاخص و مهم قلمداد می‌شود. در این تحقیق از روش الگوریتم جامعه مورچه‌ها برای انتخاب مناسب‌ترین دسته از نقاط به‌گونه‌ای که مقدار RMSE حداقل افزایش را در طول فرآیند درون‌یابی با استفاده از روش کریجینگ ساده داشته باشد، استفاده شد.

الگوریتم جامعه مورچه‌ها از روش‌های فرا ابتکاری و مناسب برای حل مسائل بهینه سازی پیچیده است که جزء روش‌های هوش جمعی مبتنی بر رفتار کلونی مورچه‌ها به حساب می‌آید. این روش یکی از نمونه‌های همکاری غیرمستقیم می باشد که الهام گرفته از جایگذاری فرومون توسط نوع به خصوصی از مورچه‌ها می‌باشد (افشار و همکاران، ۱۳۸۵). از برتری‌های الگوریتم مورچه فرار از نقاط بهینه موضعی و کمتر بودن زمان اجرای الگوریتم می‌باشد. گسسته بودن فضای تصمیم از یک طرف و تعداد کثیری از متغیرهای صفر و یک در سیستم مدل‌سازی از طرف دیگر، استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها را در بهینه‌سازی شبکه پایش بسیار توجیه‌پذیر کرده است. ضمن آن‌که تنوع جواب های ایجاد شده به کمک این الگوریتم، امکان تصمیم‌گیری با توجه به محدودیت‌های مختلف اقتصادی، فیزیکی و غیره را فراهم می‌سازد (افشار و همکاران، ۱۳۸۵).

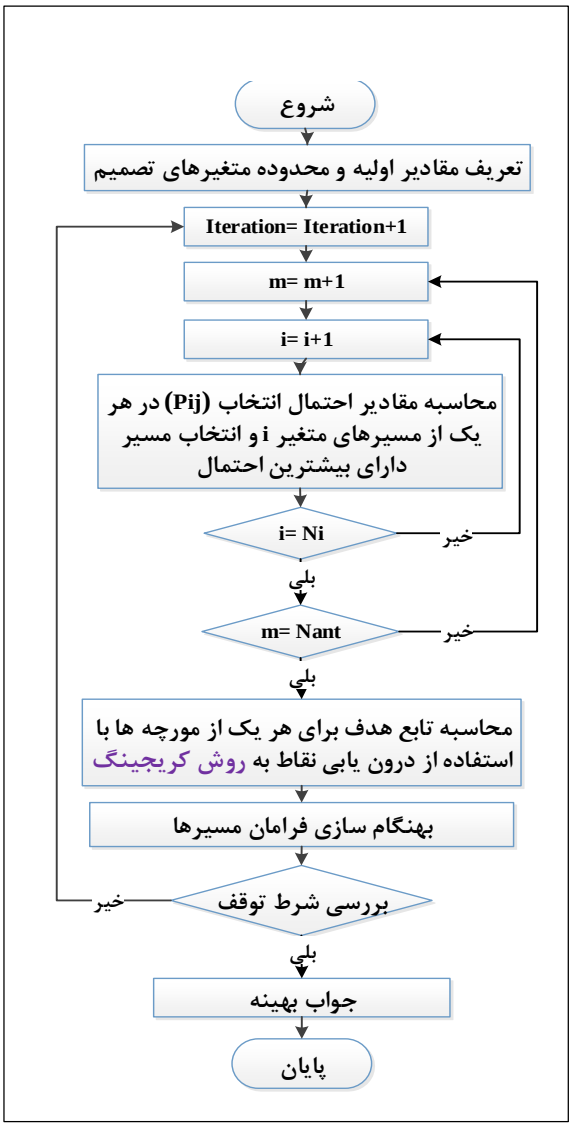
محاسبات صورت گرفته برای الگوریتم مورچگان در تعیین چاه‌های شاخص همانند شکل ۳ می‌باشد.

حذف چاه‌ها کمینه شود. بدین منظور برای ایجاد سطح نهایی و محاسبه‌ی تابع هدف به اقتباس از مقالات اخیر (Li et al., 2019) از روش درون‌یابی کریجینگ ساده استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای درون‌یابی توسعه داده شده است (Hooshangi et al., 2015).

کریجینگ مناسب برای پدیده‌هایی است که می‌دانیم یک همبستگی مکانی از نظر فاصله و جهت وجود دارد. در روش‌های زمین‌آماری شباهت بین نمونه‌ها که به عنوان تابعی از فاصله نمونه‌ها ارزیابی می شود، پایه اصلی درون‌یابی می‌باشد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۵)، لذا چاه‌های پیزومتری تا جایی باید حذف شوند که شباهت بین نمونه‌ها از بین نرود. فرآیند محاسبات در روش کریجینگ در شکل ۴ بیان شده است.

در اعتبار سنجی روش کریجینگ تعدادی از نقاط حذف و درون‌یابی با بقیه‌ی نقاط انجام می‌گیرد و در نهایت مقادیر محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده با هم مقایسه شوند. این مقایسه بین مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده با فرمول‌های متعددی انجام می‌گیرد. از جمله فرمول‌های رایج در اعتبارسنجی جذر میانگین مربعات (RMSE) می‌باشد که توسط رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(Z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2} \quad (1)$$



شکل ۳- نمودار گردشی الگوریتم مورچگان

در رویکرد پیشنهادی تابع هدف به‌گونه‌ای تعریف می شود که برای تعداد ایستگاه‌های حذف شده، دقت حاصل از

(۲)

$$\text{اهمیت نسبی هر چاه} = \frac{\text{مجموع دفعاتی که هر چاه در محاسبات هر سال به عنوان چاه شاخص شناخته شده}}{\text{مجموع دفعاتی که هر چاه در طول سال‌ها برداشت شده است}}$$

مرحله سوم: تعیین ارزش نهایی چاه‌ها

این بخش در واقع نوآوری اصلی این تحقیق می‌باشد. در تحقیقات پیشین صرفاً ارزش چاه‌ها در یک سری از داده‌ها محاسبه می‌شود، درحالی‌که در یک منطقه ممکن است اطلاعات اندازه‌گیری‌های چندین سال موجود باشد. در این مرحله اطلاعات و داده های اندازه‌گیری شده در طول زمان‌های مختلف مدنظر قرار می‌گیرد. جهت محاسبه‌ی فراوانی مؤثر از رابطه ۲ استفاده شد:

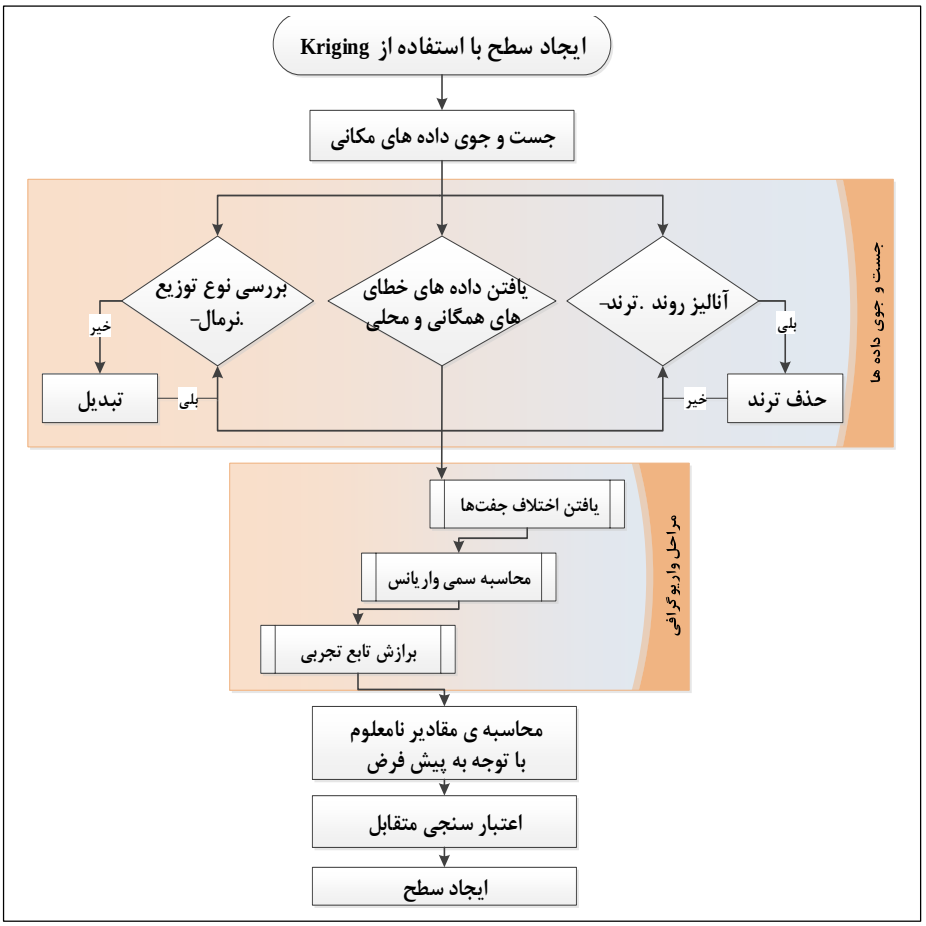
بر اساس فرمول فوق برای هر چاه اهمیت نسبی محاسبه شده و چاهی که اهمیت نسبی آن بالاتر است به عنوان چاه شاخص‌تر انتخاب می‌شود.

بحث ونتایج

نتایج حاصل از اجرا و ارزیابی سه مرحله‌ی پیشنهادی، در این بخش ارائه می‌شود. اطلاعات مربوط به ۷۵ چاه پیزومتری دشت تبریز در هر ماه از سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ اخذ شد. خلاصه‌ای از داده‌های چاه‌های پیزومتری در فروردین سال ۱۳۹۴ در جدول ۱ ارائه شده است. در این مرحله جهت کنترل خطای داده‌های چاه‌های پیزومتری از نزولی یا صعودی بودن سیر اعداد در طول ماه‌های متفاوت استفاده گردید. عموماً مقدار سطح آب زیرزمینی در ماه‌های مهر تا اردیبهشت افزایشی و از اردیبهشت تا شهریور کاهشی می‌باشد، ازاین‌رو ابتدا داده‌ها در متلب با توجه به اختلاف بین هر دو ماه متوالی خطایابی شدند. اگر اعداد حاصل از اختلاف دو ماه بیشتر از ۴ متر و میزان اختلاف حاصل بین ماه‌های n-1 و n منفی و بین دو ماه n+1 و n متوالی دیگر مثبت باشد، ماه وسطی خطا محسوب می‌باشد؛ زیرا سیر افزایشی مقدار آب که ناشی از عواملی چون نزولات بارشی می‌باشد که تغییرات ماهانه‌ی آن‌ها در یک رنج محدود می‌باشد. با انجام این آنالیز تقریباً ۹۷٪ از نقاط در محدوده موردنظر حضور داشتند و تنها ۳٪ داده‌ها به عنوان خطا معرفی شدند که در چاه‌های خطادار، میانگین همان چاه در دو ماه متوالی مد نظر قرار گرفت با توجه به تراکم ناصحیح چاه‌ها تقریباً در همه‌ی ماه‌های سال توزیع نرمال مشاهده نشد. نمونه‌ای از بررسی‌ها برای اردیبهشت سال ۱۳۹۴ در شکل ۵.الف نمایش داده‌شده است. آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف، شاپیرو ویلک نیز در سطح اطمینان ۵٪ فرض نرمال بودن داده ها در ماه های مختلف را رد کردند. در این مطالعه برای نرمال‌سازی داده‌ها به اقتباس از مطالعات هوشنگی و آل شیخ (۲۰۱۵) از روش نرمال‌سازی لوگ استفاده شد. روند مشاهده شده برای داده‌ها عموماً از نوع درجه ۲ بود که نمونه‌ای از آن‌ها برای اردیبهشت سال ۱۳۹۴ در شکل ۵.ب ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ی آماری از داده‌های چاه‌های پیزومتری در ماه فروردین سال ۱۳۹۴

آمار	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مقدار کمینه	۱۲۶۹/۲	۱۲۷۰/۳	۱۲۷۲/۰	۱۲۷۳/۱	۱۲۷۳/۵	۱۲۷۳/۶	۱۲۷۳/۰	۱۲۷۲/۷	۱۲۶۹/۸	۱۲۶۷/۶	۱۲۶۷/۶	۱۲۶۷/۳
مقدار بیشینه	۱۹۳۹/۱	۱۹۳۹/۱	۱۹۳۹/۳	۱۹۳۸/۸	۱۹۳۸/۷	۱۹۳۸/۲	۱۹۳۹/۵	۱۹۴۰/۵	۱۹۴۰/۶	۱۹۳۹/۷	۱۹۳۹/۶	۱۹۳۹/۵
میانه	۱۳۲۵/۷	۱۳۲۵/۷	۱۳۲۶/۱	۱۳۲۶/۳	۱۳۲۶/۳	۱۳۲۶/۴	۱۳۲۶/۱	۱۳۲۶/۳	۱۳۲۶/۴	۱۳۲۶/۲	۱۳۲۶/۱	۱۳۲۵/۷
متوسط	۱۴۱۹/۱	۱۴۱۹/۲	۱۴۱۹/۴	۱۴۱۹/۷	۱۴۱۹/۳	۱۴۱۹/۸	۱۴۲۰/۴	۱۴۲۰/۱	۱۴۱۹/۶	۱۴۱۹/۷	۱۴۱۹/۴	۱۴۱۹/۰
انحراف معیار	۲۰۱/۶۲	۲۰۱/۷۳	۲۰۱/۶۲	۲۰۱/۷۶	۲۰۱/۷۶	۲۰۱/۶۶	۲۰۱/۵۴	۲۰۱/۷۲	۲۰۱/۹۱	۲۰۱/۸۷	۲۰۱/۷۶	۲۰۱/۷۴



شکل ۴- مراحل اجرای روش کریجینگ (Esri, 2019)

بعد از تحلیل اکتشافی داده‌ها، برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و تلفیق آن با روش کریجینگ از روند ارائه‌شده در بخش "مرحله دوم: الگوریتم مورچگان و تلفیق آن با روش کریجینگ" استفاده شد. در این مرحله برای هر سری از داده‌ها روش پیشنهادی در نرم‌افزار Matlab اجرا شد. با افزایش تعداد نقاط حذف‌شده، مقدار RMSE سطح حاصل افزایش می‌یابد. تعداد قابل‌حذف چاه‌ها در هر سال برای حالتی اجرا شد که n نقطه از مجموعه‌ی داده‌ها کنار گذاشته شود و مقدار RMSE سطح تنها ۵٪ بدتر شود. تعداد قابل‌حذف چاه‌ها در هر ماه از سال همانند جدول ۲ می‌باشد. جدول ۲ چاه‌های شاخص و چاه‌های قابل‌حذف برای اردیبهشت ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد.

جدول ۲- چاه‌هایی که در اردیبهشت ۱۳۹۴ به عنوان چاه‌های شاخص و قابل‌حذف می‌باشند

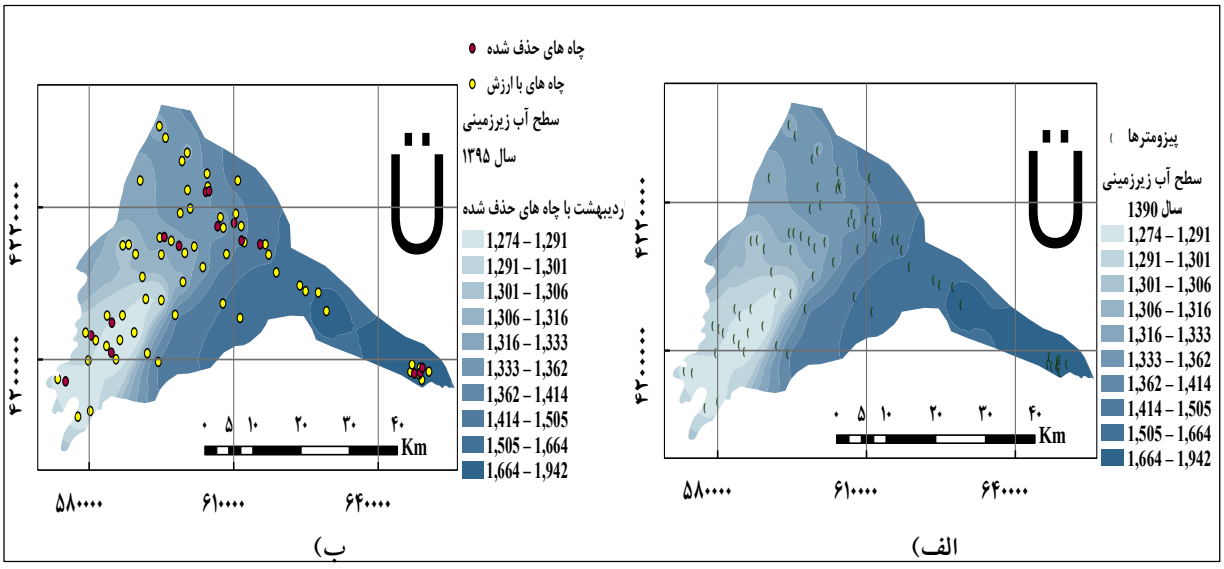
شماره چاه	ارزش	شماره چاه	ارزش	شماره چاه	ارزش	شماره چاه	ارزش	شماره چاه	ارزش	شماره چاه	ارزش
۱	۱	۱۴	۱	۲۷	۰	۴۰	۰	۵۳	۱	۶۶	۱
۲	۱	۱۵	۰	۲۸	۱	۴۱	۱	۵۴	۱	۶۷	۱
۳	۱	۱۶	۱	۲۹	۱	۴۲	۱	۵۵	۱	۶۸	۰
۴	۱	۱۷	۱	۳۰	۰	۴۳	۱	۵۶	۱	۶۹	۱
۵	۰	۱۸	۱	۳۱	۰	۴۴	۰	۵۷	۱	۷۰	۱
۶	۱	۱۹	۱	۳۲	۱	۴۵	۱	۵۸	۱	۷۱	۱
۷	۱	۲۰	۱	۳۳	۱	۴۶	۰	۵۹	۱	۷۲	۱
۸	۱	۲۱	۱	۳۴	۱	۴۷	۱	۶۰	۱	۷۳	۱
۹	۱	۲۲	۱	۳۵	۰	۴۸	۱	۶۱	۱	۷۴	۱
۱۰	۱	۲۳	۱	۳۶	۱	۴۹	۰	۶۲	۰	۷۵	۱
۱۱	۰	۲۴	۱	۳۷	۰	۵۰	۱	۶۳	۱		
۱۲	۱	۲۵	۱	۳۸	۰	۵۱	۱	۶۴	۱		
۱۳	۱	۲۶	۰	۳۹	۱	۵۲	۱	۶۵	۱		

در جدول ۲ چاه‌هایی که با عدد ۱ نمایش داده شده‌اند بدین معنی است که در محاسبات مربوط به روش پیشنهادی به عنوان چاه‌هایی بوده‌اند که حذف آن‌ها موجب تغییر بالا در مقدار RMSE می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که ۱۶ چاه‌پیزومتری در محاسبات مربوط به شبکه پایش دشت تبریز در اردیبهشت سال ۱۳۹۴ قابل‌حذف می‌باشد به‌گونه‌ای که تغییرات RMSE بیش از ۵ درصد نباشد.حال باید اهمیت نسبی هر یک از چاه‌ها مشخص شود. برای محاسبه‌ی این کمیت ابتدا تعداد دفعاتی که هر چاه در طول ۳ سال (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶) به عنوان چاه شاخص انتخاب شده شمارش و بر تعداد دفعاتی که چاه در طول دوره‌ی محاسباتی برداشت‌شده تقسیم می‌شود. اهمیت نسبی حاصل از روش پیشنهادی برای چاه‌های پیزومتری در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳ در ستون "تعداد حضور" عدد درج‌شده نشان‌دهنده‌ی تعداد دفعاتی است که چاه مورد نظر به عنوان چاه شاخص در ۳۶ ماه محاسباتی شده است. به عبارت بهتر چاه اول که در ۳۶ ماه بررسی شده، در ۲۰ ماه به عنوان چاه شاخص تعیین شده است. فقط دو تا از چاه‌ها در طول ۳۶ ماه به عنوان چاه با ارزش شناخته نشده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تعداد پیزومترهایی که در طول محاسبات یک ماه می‌تواند از محاسبات حذف شود، به‌گونه‌ای که میزان تغییرات RMSE کمتر از ۵ درصد باشد بین ۱۲ تا ۲۳ چاه است. تعداد چاه‌های قابل‌حذف برای مهر سال ۱۳۹۴، ۱۲ چاه و برای مرداد سال ۱۳۹۵، ۲۳ چاه می‌باشد. متوسط تعداد چاه‌های قابل‌حذف ۱۸ چاه می‌باشد. در این تحقیق تنها چاه‌های مشاهداتی ۱۵ و ۴۰ هستند که در هیچ کدام از محاسبات مربوط به سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ به عنوان چاه شاخص تعیین نشدند. این دو چاه را می‌توان از شبکه مشاهده‌ای حذف کرد؛ زیرا که مشارکت این چاه‌ها در برآورد توزیع سطح آب زیرزمینی در آبخوان تبریز معنی‌دار نیست. از بین ۷۵ چاه پیزومتری موجود ۱۵ چاه دارای ارزش نسبی کمتر از ۱۱ درصد هستند. به عبارت بهتر در محاسبات مربوط به ۳۶ ماه در طول سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶، ۱۵ عدد از چاه‌ها در محاسبات کمتر از ۴ ماه، اطلاعات مکانی به تخمین سطح آب زیرزمینی اضافه کرده‌اند. به‌این‌ترتیب با حذف این ۱۵ چاه پیزومتری هم از نظر هزینه و هم از نظر زمان مورد نیاز برای هر اندازه‌گیری سطح آب زیرزمین، صرفه‌جویی خواهد شد. بدون اینکه نقصان معنی‌داری در اطلاعات حاصل شود.

جدول ۳- ارزش نسبی محاسبه شده برای چاه‌های پیزومتری

شماره چاه	تعداد حضور	مقدار ارزش	شماره چاه	نسبت نهایی	مقدار ارزش	شماره چاه	نسبت نهایی	مقدار ارزش	شماره چاه	نسبت نهایی	مقدار ارزش
۱	۲۰	۰/۵۶	۲۰	۲۰	۰/۵۶	۳۹	۲۰	۰/۵۶	۵۸	۲	۰/۱۴
۲	۱۸	۰/۵۰	۲۱	۲۹	۰/۸۱	۴۰	۰	۰/۰۰	۵۹	۶	۰/۱۷
۳	۱۳	۰/۳۶	۲۲	۱۲	۰/۳۳	۴۱	۲۱	۰/۵۸	۶۰	۲۸	۰/۷۸
۴	۱۵	۰/۴۲	۲۳	۲۲	۰/۶۱	۴۲	۴	۰/۳۳	۶۱	۸	۰/۲۲
۵	۳۱	۰/۸۶	۲۴	۱۸	۰/۵۰	۴۳	۳۱	۰/۸۳	۶۲	۲۹	۰/۸۱
۶	۳	۰/۰۸	۲۵	۲۰	۰/۵۶	۴۴	۲۲	۰/۶۱	۶۳	۲۸	۰/۷۸
۷	۲۲	۰/۶۱	۲۶	۱	۰/۰۳	۴۵	۱۸	۰/۵۰	۶۴	۲۳	۰/۶۴
۸	۸	۰/۲۲	۲۷	۳	۰/۰۸	۴۶	۳	۰/۰۸	۶۵	۱۸	۰/۵۰
۹	۱۲	۰/۳۳	۲۸	۱۵	۰/۴۲	۴۷	۸	۰/۲۲	۶۶	۱۸	۰/۵۰
۱۰	۲۹	۰/۸۱	۲۹	۱۷	۰/۴۷	۴۸	۲۸	۰/۷۸	۶۷	۳۱	۰/۸۶
۱۱	۳	۰/۰۸	۳۰	۳۱	۰/۸۶	۴۹	۴	۰/۱۱	۶۸	۲	۰/۴۲
۱۲	۱۷	۰/۴۷	۳۱	۲	۰/۰۶	۵۰	۵	۰/۱۴	۶۹	۸	۰/۲۲
۱۳	۳۱	۰/۸۶	۳۲	۳۱	۰/۸۶	۵۱	۱۸	۰/۵۰	۷۰	۲۰	۰/۵۶
۱۴	۳۰	۰/۸۳	۳۳	۵	۰/۱۴	۵۲	۲۰	۰/۵۶	۷۱	۳	۰/۰۸
۱۵	۰	۰/۰۰	۳۴	۲۲	۰/۶۱	۵۳	۱۷	۰/۴۷	۷۲	۸	۰/۲۲
۱۶	۱۷	۰/۴۷	۳۵	۲	۰/۴۲	۵۴	۱۴	۰/۳۹	۷۳	۱۵	۰/۴۲
۱۷	۲۹	۰/۸۱	۳۶	۱۱	۰/۳۱	۵۵	۳	۰/۰۸	۷۴	۳۳	۰/۹۲
۱۸	۱۲	۰/۳۳	۳۷	۱۲	۰/۳۳	۵۶	۱۷	۰/۴۷	۷۵	۸	۰/۲۲
۱۹	۲۸	۰/۷۸	۳۸	۲۹	۰/۸۱	۵۷	۲۲	۰/۶۱			



شکل ۵- سطح آب زیرزمینی دشت تبریز ایجاد شده برای اردیبهشت سال ۱۳۹۴، الف) با ۷۵ چاه، ب) با ۶۰ چاه

آنالیز بصری و مقایسه بین دو سطح ایجاد شده نیز نشان می‌دهد که با حذف ۱۵ چاه پیزومتر تغییر چندانی در سطح ایجاد شده مشاهده نمی‌شود و در کل دو سطح ایجاد شده با لحاظ تغییرات اندک ایجاد شده همچنان شبیه هستند. بررسی بصری چاه‌های حذف نشان می‌دهد که بیشتر چاه‌های حذف شده در نواحی مرکزی قرار دارند و در ادامه با فرض حذف ۱۵ چاه نمونه‌برداری شده با استفاده از درون‌یابی کریجینگ ساده برای ماه‌های مختلف سطوح پیوسته تشکیل و آنالیز بصری صورت گرفت.

نمونه‌ای از سطح ایجادشده با استفاده از درون‌یابی کریجینگ قبل و بعد از حذف ۱۵ چاه پیزومتری در شکل ۵ نمایش داده شده است.

چاه‌هایی که در محدوده (باندری) منطقه وجود دارند به عنوان چاه‌های با ارزش شناخته شده‌اند.

نتیجه‌گیری

برای تعمیم نتایج اندازه‌گیری از چاه‌های موجود به سایر نقاط فاقد آمار بایستی شبکه‌ی چاه‌ها از تراکم مناسبی برخوردار باشد. پرهزینه و زمان‌بر بودن حفر و نگه‌داری چاه‌های پیزومتری جهت تخمین سطح آب‌های زیرزمینی ضرورت بهینه کردن شبکه‌ی پایش سطح آب زیرزمینی را می‌رساند. در این تحقیق بعد از اخذ اطلاعات ۷۵ چاه پیزومتری دشت تبریز، مدل پیشنهادی با تلفیق الگوریتم مورچگان و کریجینگ در طول ۳ سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ اجرا و چاه‌های شاخص در منطقه شناسایی شدند.

بعد از اعمال روش ترکیبی با فرض این که در نهایت تغییرات RMSE سطح ایجاد شده از ۵ درصد بیشتر نگردد، در هر ماه تعدادی از چاه‌ها حذف شد. تعداد چاه‌های حذف شده برای هر ماه بین ۱۲ تا ۲۳ چاه بود. متوسط تعداد چاه‌های قابل‌حذف ۱۸ چاه می‌باشد. نتایج نشان داد فقط دو چاه از ۷۵ چاه موجود در هیچ کدام از محاسبات ۳۶ ماه مورد بررسی به عنوان چاه با ارزش شناخته نشده‌اند و بقیه چاه‌ها حداقل یک‌بار به عنوان چاه با ارزش در محاسبات حضور داشته‌اند. در نهایت با محاسبه اهمیت نسبی هر چاه و نظرات کارشناسی از بین ۷۵ چاه پیزومتری موجود ۱۵ چاه دارای ارزش نسبی کمتر از ۱۱ قابل‌حذف بودند. آنالیز بصری نیز بر روی سطوح پیوسته‌ی ایجاد شده از درون‌یابی کریجینگ ساده قبل و بعد از حذف ۱۵ چاه پیزومتری نیز نشان‌دهنده تفاوت اندک ایجاد شده بود.

نتایج محاسباتی نشان می‌دهد شبکه‌ی فعلی چاه‌ها توزیع مکانی چندان مناسبی ندارد، به نحوی است که در محاسبات ۳۶ ماه با حذف حداقل ۱۲ چاه کاهش بسیار ناچیز در خطای RMSE ایجاد خواهد شد. از طرفی مشخص شد که علیرغم قابل‌حذف بودن تعدادی از چاه‌های پیزومتری در شبکه پایش دشت تبریز، حذف کامل چاه‌ها از شبکه پایش کار صحیحی نیست؛ چرا که چاه‌ها در ماه‌های مختلف ممکن است عملکرد متفاوتی از خود نشان دهند. روش پیشنهادی می‌تواند اطلاعات مکانی و زمانی در شرایطی که سری از داده‌ها برای ماه‌های مختلف وجود داشته باشد قابل‌استفاده باشد و همه‌ی اطلاعات چاه‌ها را مد نظر قرار دهد. از طرفی استفاده از این نوع الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مسائل مربوط به طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش مفید بوده و به‌راحتی و بدون هیچ مشکلی قادر به حل مدل می‌باشد. از مزایای این روش در حل شبکه‌های پایش آب زیرزمینی می‌توان به تعیین گستره‌ای از جواب‌های مناسب در حل مدل اشاره کرد. از آنجا که الگوریتم جامعه مورچه‌ها در حل مدل دارای جواب‌های متنوعی است به‌راحتی می‌توان با در نظر گرفتن محدودیت‌های نظیر بودجه، شرایط فیزیکی و غیره امکان یا عدم امکان حذف ایستگاه پایش در برخی نقاط را مشخص کرد.

استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، مقایسه روند پیشنهادی با سایر روش‌های آماری و زمین آماری، استفاده از روش‌های نوین درون‌یابی مانند فازی عصبی در محاسبه مقدار RMSE به جای روش کریجینگ می‌تواند در تحقیقات آینده مد نظر قرار گیرد.

منابع

-**افشار، ا.، مکنون، ر.، افشار، ع.، (۱۳۸۵)**، "مکانیابی بهینه ایستگاههای پایش در شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها"، دو ماهنامه علمی- پژوهشی آب و فاضلاب، ۱۷(۳)، ص ۲-۱۱.

-**اکبرزاده، م.، قهر مان، ب.، (۱۳۹۲)**، "استفاده همزمان از آنتروپی و کریجینگ فضایی- زمانی برای تعیین شبکه بهینه

پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشـــت مشـــهد"، آب و خاک، ۲۷(۳)، ص ۶۱۳-۶۲۹.

-**اکبرزاده، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، (۱۳۹۵)**، "بهینه سازی شبکه پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی شهر مشهد با استفاده از مدل سازی فضایی-زمانی"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲(۱)، ص ۱۳۳-۱۴۴.

-**نوری، ر.ا.، کراچیان، ر.، خدادادی دربان، ا.، شکیبایی‌نیا، ا.، (۱۳۸۶)**، "ارزیابی اهمیت ایســتگاههای پایش کیفی رودخانه ها با اســتفاده از آنالیز مولفه های اصـــلی و آنالیز فاکتور، مطالعه موردی: رودخانه کارون"، آب و فاضلاب، ۱۸(۳)، ص ۶۰-۶۹.

-**دهقانی، ر.، نورعلیئی، ع.، (۱۳۹۵)**، "مقایسه روش های زمین آمار و شـــبکه عصـــبی مصـــنوعی در تخمین ســـطح آب زیرزمینی(مطالعه موردی: دشت نورآباد، استان لرستان)"، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸(۱)، ص ۳۳-۴۴.

-**گنجی خرم دل، ن.، کیخایی، ف.، مرد یان، م.، (۱۳۹۴)**، "طراحی و توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از زمین آمار و روش های آماری در دشت اراک"، مجله ژئوفیزیک ایران، ۹(۳)، ص ۱۷-۲۹.

-**منا، ج.، اکبر، ع.ع.، غلامرضـــا، ا.ف.، مهری، ش.ه.، (۱۳۸۵)**، "ارزیابی ســـیســـتم پایش کیفی آب رودخانه کارون با روش بهینه ســـازی MCDM با رویکرد تاثیر منابع آلاینده نقطه ای و غیر نقطه"، کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران. ۲.

-**میرزائی ندوشـــن، ف.، بزرگ حداد، ا.، خیاط خلقی، م.، (۲۰۱۹)**، "گزارش فنی: بهینه سازی و توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشـــت اشـــتهارد" مهندســـی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۱)، ص ۲۷۳-۲۸۲.

- **ندیری، ع. (۱۳۸۳)**، "ارز یابی ســـطح آب های زیرزمینی در محدوده متروی شهر تبریز با استفاده از مدل شبکه های عصبی مصنوعی"، کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

-**نظری، ر.، وند، ر.ا.آ.، تقی، م.، (۱۳۹۰)**، "طراحی شبکه پایش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی مطالعه موردی: دشـــت ابرکوه. ســـی امین گردهمایی علوم زمین"، ســـازمان زمین شـــناســـی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۰.

-**هوشـــنگی، ن.، شـــیخ، ع.ا.آ.، ندیری، ع.ا.، (۱۳۹۴)**، "بهینه سازی تعداد چاه های پیزومتری با مقایسه ی روش زمین آماری و آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت پیش بینی سطح آبهای زیرزمینی"، نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۲/۴)، ص ۵۳-۶۶.

-**Chandan, K.S., Yashwant, B.K., (2017),** "Optimization of groundwater level monitoring network using GIS-based geostatistical method and multi-parameter analysis: A case study in Wainganga Sub-basin, India." Chinese Geographical Science, 27(2), pp 201-215.

-David, M.H., (1965), "On the spacing of raingages", IASH Publ. 67 Symp. Design of hydrol. Networks, pp 72-79.

-Destandau, F., Zaiter, Y., (2020), "Spatio-Temporal Design for a Water Quality Monitoring Network Maximizing the Economic Value of Information to optimize the detection of accidental pollution." Water Resources and Economics, pp 100156.

-Duan, K., Li, K., Liang, S., Li, Y., Su, Y., Wang, X., (2019), "Optimizing a coastal monitoring network using a water-quality response grid (WRG)-based sampling design for improved reliability and efficiency." Marine Pollution Bulletin, 145, pp 480-489.

-Esri. (2019). "Understanding interpolation analysis." from http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z0000006w000000.

-Farlin, J., Gallé, T., Pittois ,D., Bayerle, M., Schaul, T., (2019), "Groundwater quality monitoring network design and optimisation based on measured contaminant concentration and taking solute transit time into account." Journal of Hydrology, 573, pp 516-523.

-Gong, G., Mattevada, S ,.O'Bryant, S.E., (2014), "Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas." Environmental Research, 130(0), pp 59-69.

-Li, J., Zhang, H., Luo, Y., Deng, X., Grieneisen, M.L., Yang, F ,.Di, B., Zhan, Y., (2019), "Stepwise genetic algorithm for adaptive management: Application to air quality monitoring network optimization." Atmospheric Environment, 215, pp 116894.

-N. Hooshangi, A. A. Alesheikh, (2015), "Evaluation of ANN, ANFIS and fuzzy systems in estimation of solar radiation in Iran." Journal of Geomatics Science and Technology, 4(3), pp 187-200.

-Salah, H., (2009), "Geostatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS." GIS Ostrava, 25, pp 1-10.

-Sheikhy Narany, T., Ramli, M.F., Fakharian, K., Aris, A.Z., Sulaiman, W.N.A., (2015), "Multi-Objective Based Approach for Groundwater Quality Monitoring Network Optimization." Water Resources Management, 29(14), pp 5141-5156.

Determination of valuable piezometric wells in groundwater level prediction by considering spatiotemporal information

Navid Hooshangi

Department of Surveying Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, Postal code

Abstract

The precision of groundwater level estimation is a function of the density, location and accuracy of the wells. As the number of piezometric wells increase, the precision of surface estimation is improved, but digging and maintaining piezometric wells is always costly and time consuming. The main objective of this research is to minimize the number of piezometric wells and to identify valuable wells for precise prediction of groundwater level. The main innovation of this research is the inclusion of spatial and temporal information in optimizing the number of wells. This research was conducted in three main phases: 1) Obtaining information of 75 piezometric wells of Tabriz plain and exploratory spatial data analysis (ESDA), 2) Implementation of the ant colony optimization algorithm in combination with the simple kriging method and the identification of wells in each year, 3) Calculation of the final value of wells based on number of times each well was present in the calculations for 2014-2017. The results show that of the 75 wells per month, an average of 18 wells adds limited information to the calculations. Of these 75 wells, only two wells in none of the 36-month calculations were considered as valuable wells, and 15 wells have a relative value less than 11 percent. Therefore, the number of piezometric wells can be reduced 20% (15 wells), without a sensible data loss in the estimation of groundwater levels in the area. The results show that using temporal information of wells and proposed method, valuable wells can be identified and, by saving time and cost, to some extent reached the precision of the initial level.

Keywords: Groundwater Monitoring Network, Ants colony Algorithm, Kriging, Spatiotemporal Information, Tabriz Plain.