نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۵ شماره ۴/۲ صفحه‌های ۵۳ تا ۶۶ / سال ۱۳۹۴

بهینه‌سازی تعداد پیزومترها در پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی با روش‌های PCA و زمین‌آماری

نوید هوشنگی[۱]، علی‌اصغر آل‌شیخ[۲]، عطاالله ندیری[۳*]

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۲۱

۱-دانشجوی دکتری گروه مهندسی GIS، دانشکده ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
۲-استاد گروه مهندسی GIS، دانشکده ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
۳-استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nadiri.ata@gmail.com

چکیده

بهینه‌سازی تعداد چاه‌ها در تخمین سطح آب‌های زیرزمینی به لحاظ کاهش هزینه نگه‌داری و صرفه‌جویی در هزینه برداشتِ اطلاعات، گامی مهم هست. هدف اصلی این تحقیق، تعیین تعداد بهینه چاه‌های پیزومتری جهت تخمین سطح آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت تبریز بود که در سه مرحله اصلی انجام گرفت. ابتدا با اخذ مشاهدات ۷۵ چاه مربوط به سفره آزاد دشت تبریز و ارزیابی عملکرد پنج روش مختلف درون‌یابی، نتیجه حاصل از روش کریجینگ عمومی با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۱۲متر به‌عنوان مناسب‌ترین سطح برازش داده، انتخاب شد. در مرحله دوم با دو روشِ خطای اعتبارسنجی متقابل نقاط و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعدادی از نقاط از چرخه تشکیل سطح، خارج و در نهایت با توجه به RMSE سطوح ایجادشده، عملکرد دو روش با هم مقایسه گردید. بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان داد که برای تخمین سطح آب زیرزمینی در آبخوان آزاد دشت تبریز از روش PCA، و با فرض این‌که خطای حد آستانه از مقدار ۱۱ درصد بیشتر نگردد، ۳۰ چاه حذف می‌شود و RMSE سطح حاصل ۱۴٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که استفاده از خطای اعتبارسنجی متقابل در شرایط مساوی سبب افزایش RMSE سطح ایجادشده به‌میزان ۱۶/۵٪ شد. لذا تغییرات RMSE سطح حاصل از PCA در قیاس با روش خطای نقطه‌ای کمتر بوده و از اعتبار بیشتری برخوردار هست. بنابراین با حذف ۳۰ چاهِ پیزومتر، می‌توان با افزایش دقت اندازه‌گیری سطح آب در بقیه چاه‌های پیزومتری باقیمانده و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، پیزومترها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، درون‌یابی، دشت تبریز

Archive of SID
www.SID.ir

Optimization of Piezometers Number for Groundwater Level Prediction Using PCA and Geostatistical Methods

N Hooshangi[1], AA Alesheikh[2] , AA Nadiri[3*]

Received: 16 March 2014 Accepted: 11 May 2015
[1-] Ph.D. Student, Dept. of Geodesy & Geomatics Eng., KN Toosi Univ. Iran
[2-] Prof., Dept. of Geodesy & Geomatics Eng., KN Toosi Univ. Iran
[3-] Assist. Prof., Dept. of Earth Sciences, University of Tabriz. Iran
[*] Corresponding Author Email : nadiri.ata@gmail.com

Abstract

Network Optimization of existing Piezometers number for estimating groundwater levels, since it reduces maintenance cost and saves the charge of data acquisition, is an important step. The main goal of this research is to optimize the number of piezometers to estimate groundwater levels in the unconfined aquifer of Tabriz plain. That was accomplished at three main stages. At the beginning, ground water levels in 75 piezometers of the unconfined aquifer of Tabriz plain were obtained and the performances of five different interpolation methods were evaluated. At this stage, results of the Universal Kriging method with Root Mean Square Error (RMSE) of 1.12 m was selected as an appropriate surface. At the second stage, two methods; including Cross-Validation Error and Principal Component Analysis (PCA) were applied to remove some points. Finally, with respect to RMSE of the created surfaces, the two applied methods were compared. The results showed that by assuming reasonable error threshold (11%) in PCA method, 30 points were removed and the RMSE of the estimated surface increased by14 percent. In the cross validation method by removing 30 other points, the RMSE of the created surface increased by 16.5 percent. Therefore, RMSE changes using PCA compared to cross-validation error method were less, and therefore PCA result was more valid. The results indicated that, by eliminating 30 piezometers from the groundwater level monitoring network of the unconfined aquifer of Tabriz plain, the suitable accuracy for groundwater level estimating could be achieved by increasing the accuracy of water level measurement in the rest of the piezometers that would cause the saving of time and cost.

Keywords: Groundwater, Interpolation, Piezometers, Principal Component Analysis, Tabriz aquifer

Archive of SID

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین نیازهای خانگی، صنعتی و کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (تقی زاده مهرجردی و همکاران ۱۳۸۷، قدم پور و شقاقیان ۱۳۹۰). هدف از طراحی شبکه چاه‌های پیزومتری، پایش کیفیت و سطح آب زیرزمینی جهت مدیریتِ بهره‌برداری از آبخوان هست که در پیش‌بینی نشست زمین نیز مؤثر است (نوری قیداری ۱۳۹۲). مدیریت صحیح هر سیستم آبی، نیازمند شبکه سنجشی است که قادر به جمع‌آوری متغیرهای چرخه هیدرولوژیکی باشد (آلفونسو و همکاران ۲۰۱۰). ارزیابی این شبکه و تعیین ایستگاه‌های پایش اصلی و فرعی در آن، گامی مهم در بهبود کارایی و به هنگام‌سازی شبکه پایش هست (نوری و همکاران ۱۳۸۶). مکان و تعداد ایستگاه‌های پایش نقش اساسی در تخمین سطح آب‌های زیرزمینی و نمایش کیفیت آن دارد (سیواپراگاسم و همکاران ۲۰۱۰). عوامل زمانی و مکانی دیگری مانند خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان، میزان

www.SID.ir

بارش، وضعیت توپوگرافی، موقعیت مکانی عوامل تغذیه و تخلیه در تغییرات سطح آب زیرزمینی مؤثرند که موجب پیچیده و غیرخطی شدن سیستم آب‌های زیرزمینی می‌شوند (لشکری‌پور و همکاران ۱۳۸۵، قدم پور و شقاقیان ۱۳۹۰). لذا پیش‌بینی دقیق سطح آب‌های زیرزمینی نیازمند افزایش تعداد چاه‌های پیزومتری است. تعیین نقاط مهم در اندازه‌گیری به لحاظ کاهش تعداد، صرفه‌جویی در هزینه، زمان و افزایش دقت نمونه‌برداری بسیار مهم است (نوری‌قیداری ۱۳۹۲). در این صورت پیش‌بینی دقیق سطح آب‌های زیرزمینی زمانی که تعداد، تواتر اندازه‌گیری و بحث صرفه اقتصادی مدنظر قرار بگیرد دشوارتر می‌شود (کارآموز و همکاران ۲۰۰۵). از طرفی، سطح آب‌های زیرزمینی دشت تبریز از جمله عوامل تأثیرگذار در مسیریابی خط متروی شهر تبریز و نحوه عملیات اجرایی این پروژه هست. بعد از مسیریابی خطوط مترو و اتمام عملیات این پروژه و با توجه به هزینه نگه‌داری، نیازی به حفظ همه این چاه‌ها نخواهد بود. در راستای مسیریابی دیگر خطوط مترو نیاز به انتخاب برخی از این چاه‌ها به‌عنوان مؤثرترین چاه‌ها است، تا با بهینه کردن تعداد چاه‌ها و هزینه، شبکه موجود برای آینده نیز قابل‌استفاده شود.

از جمله روش‌های پایش سطح آب زیرزمینی می‌توان به روش‌های شبیه‌سازی، تحلیل واریانس، روش احتمالاتی، روش‌های پیشرفته زمین‌آماری[1]، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک اشاره کرد (نوری قیداری ۱۳۹۲). همواره انتخاب شبکه مناسب با این دید که تمام تغییرات را یافته و داده‌های اضافی حذف شوند انجام می‌گیرد. بدین منظور در برخی از پژوهش‌ها جهت محاسبه داده‌های اضافی از راهکارهایی مانند روش کریجینگ در محیط چند متغیره کاهشی استفاده کرده‌اند (بیوریدج و همکاران ۲۰۱۲). روش‌های زمین‌آماری دیگری با ترکیب کریجینگ و تحلیل سلسله مراتبی[2] (AHP) جهت طراحی سیستم پایش کیفی برای رودخانه کارون و دز نیز استفاده شده است (کارآموز و همکاران ۲۰۰۵). برای رود کارون شبکه پایش با کمینه کردن تعداد نمونه‌برداری‌ها و تواتر برداشت داده‌ها و بهره‌گیری از نظریه آنتروپی نیز به‌صورت آنلاین ایجاد گردیده است (کارآموز و همکاران ۲۰۰۹). بهینه‌سازی شبکه پایش کیفیت آبی با الگوریتم ژنتیک نیز به‌وفور انجام شده است (کید ول و خو ۲۰۰۵، پارک و همکاران ۲۰۰۶). کریمی گوغری و خلیفه (۱۳۹۲) با استفاده از نظریه آنتروپی و در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپی نظیر آنتروپی مرزی، آنتروپی مشترک، شاخص اطلاعات ارسال‌شده، شاخص اطلاعات دریافت شده و شاخص انتقال اطلاعات بین ایستگاه به ارزیابی کارایی شبکه‌های آب‌سنجی پرداخته و به این نتیجه رسید که تئوری آنتروپی قابلیت قابل قبولی جهت کمی کردن ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های آب‌سنجی دارد. زهو و همکاران (۲۰۱۳) روش جدیدی بر مبنای تصویر کردن منطقه در رژیم آب‌های زیرزمینی متفاوت پیشنهاد داد و بیان کرد که توجه به بهینه‌سازی، یکی از مهم‌ترین عوامل در انتخاب روش بهینه‌سازی هست. ستینکایا و هارمان سیو اقلو (۲۰۱۴) رویکرد نقطه مبنا[3] (RPA) را به‌منظور کاهش تعداد چاه‌های آب و ارزیابی عملکرد شبکه در کشور ترکیه پیشنهاد کرد که با توجه به اهداف چندگانه موجود در طراحی شبکه به رتبه‌بندی ایستگاه‌ها پرداخت. یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی[4] (PCA) هست. PCA یکی از تکنیک‌های کاهش داده بوده و بر اساس شناسایی مؤلفه‌های توصیف‌کننده واریانس سامانه بوده و در تعیین چاه‌های مؤثر در دشت قیدار استفاده شده است (نوری قیداری ۱۳۹۲). در رودخانه کارون نیز با استفاده از روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل فاکتورهای اصلی[5] (FA)، ارزیابی ایستگاه‌های کنترل پارامترهای کیفی آب رودخانه صورت گرفته است (نوری و همکاران ۱۳۸۶). قهرمان و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از زمین‌آمار به ارزیابی شبکه پایش آب‌های زیرزمینی در مشهد پرداخت که با وجود خطای بالا در برآورد پارامترهای کیفی، پیشنهاد طراحی یک شبکه مؤثرتر که توزیع مکانی و

[1] Geostatistics
[2] Analytic Hierarchy Process
[3] Reference Point Approach
[4] Principal Component Analysis
[5] Factor Analysis

Archive of SID

www.SID.ir

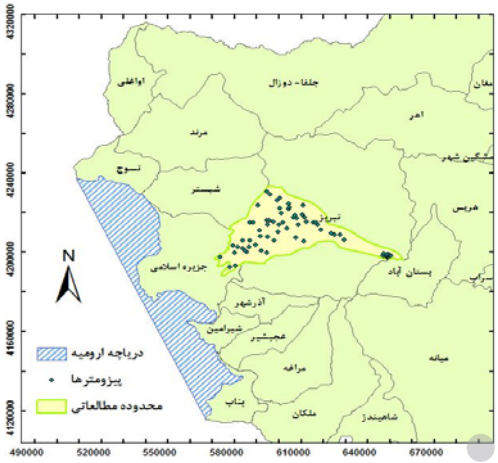
زمانی مناسب‌تری داشته باشد، ارائه داد. یاکیرویچ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نظریه اطلاعات به پیشنهاد روشی برای افزایش نظارت بر شبکه‌های زیرزمینی[6] (SMN) پرداخت و بهینه‌سازی مدل طراحی‌شده را مهم‌ترین عامل در حداکثر سازی اخذ اطلاعات و کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی جریان زیرسطحی دانست.

در این تحقیق هدف اصلی، بهینه‌سازی تعداد چاه‌های پیزومتریِ آبخوان آزاد دشت تبریز، جهت پیش‌بینیِ سطح آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مسیر خطوط متروی شهر تبریز هست. بدین منظور روشی ساده بر اساس میزان خطای ایجادشده در اعتبارسنجی متقابل پیشنهاد می‌شود، که بعد از برازش سطح بهینه بر آب‌های زیرزمینی اجرا می‌گردد. در ادامه نیز روش دیگری با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی اجرا و عملکرد این دو روش با مقایسه خطای سطوح ایجادشده از حذف نقاط، بررسی می‌شود تا ضمن ارزیابی قابلیت‌های این دو روش، شبکه بهینه برای این دشت معرفی گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

دشت تبریز حدود ۵۳۷۸ کیلومترمربع وسعت دارد و بعد از دشت‌های میانه و جلفا بزرگ‌ترین دشت موجود در استان آذربایجان شرقی هست. این دشت از شمال به دامنه‌های جنوبی کوه‌های میشو، از شرق به محدوده شهر تبریز، از جنوب به دامنه‌های شمالی سهند، از غرب به اراضی شوره‌زار و دریاچه ارومیه محدود می‌شود. آب موردنیاز اراضی کشاورزی دشت تبریز علاوه بر منابع آب‌های سطحی همانند آجی‌چای، کومرچای و سنیخ‌چای از منابع آب‌های زیرزمینی هم تأمین می‌گردد (رزاق منش و همکاران ۱۳۸۵). دشت تبریز را می‌توان یک آبخوان دو لایه در نظر گرفت که از آبخوان آزاد و تحت‌فشار تشکیل شده است. بیش‌ترین ضخامت سفره آزاد در دشت تبریز ۱۰۰ متر است که این ضخامت به‌طرف کوه و نیز به‌طرف مرکز دشت کاهش‌یافته و تا ۵۰ متر می‌رسد. آبخوان‌های تشکیل شده در تراس‌های رودخانه آجی چای چندلایه‌ای بوده و از نوع آزاد و تحت‌فشار می‌باشند. با آن‌که تراس‌های رودخانه آجی‌چای آبخوان‌های چندلایه‌ای را تشکیل می‌دهند، ولی جدایی اصلی آبخوان آزاد از تحت‌فشار در عمق ۵۰ تا ۶۰ متری از سطح زمین صورت می‌گیرد (ندیری ۱۳۸۳). در این بررسی از اطلاعات ۷۵ چاه پیزومتری موجود (شکل۱) در سفره آزاد دشت تبریز در سال ۱۳۸۷ استفاده شده است (چاه‌های منتخب بیشتر در مسیر متروی تبریز قرار دارند).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

مراحل اجرایی

در راستای بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب‌زیرزمینی دشت تبریز، ابتدا سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های درون‌یابی برای سال به‌دست آمد و خطای هر نقطه محاسبه شد. سپس با استفاده از روش خطای نقطه‌ای حاصل از اعتبارسنجی متقابل، چاه با کمترین خطا حذف گردید. تعداد چاه‌های حذف‌شده با توجه به‌میزان تغییرات RMSE[7] سطح مشخص شد. در ادامه چاه‌های مهم با استفاده از روش PCA و محاسبه نمودار خطای حاصل از ضریب تغییرات[8] (CV) تعیین‌شده و خروجی این دو روش با هم مقایسه و سطح با تعداد نقاط بهینه به‌دست آمد. در ادامه هر کدام از این مراحل شرح داده می‌شود.

[6] Subsurface Monitoring Network

[7] Root Mean Square Error
[8] Coefficient of Variation

Archive of SID

www.SID.ir

ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین سطح آب‌های زیرزمینی

با توجه به نقطه‌ای بودن برداشت اطلاعات در مطالعات جغرافیایی می‌توان به کمک درون‌یابی، داده‌ها را به سطح تعمیم داد (فرجی سبک‌بار و عزیزی ۱۳۸۵). هدف از درون‌یابی تخمین مقادیر نامعلوم با استفاده از مقادیر معلوم هست (قهرودی تالی و بابایی فینی ۱۳۸۹). درون-یابی در سه مرحله اصلی انجام می‌گیرد. ابتدا جست‌وجو و آماده‌سازی داده‌ها که شامل یافتن خطا با تحلیل‌های ساده آماری، تحلیل روند[9] داده‌های موجود و بررسی نحوه توزیع داده‌ها هست (صلاح ۲۰۰۹). سپس پیاده-سازی مدل‌های قطعی و یا زمین‌آماری موجود جهت ایجاد سطح و در نهایت آنالیز سطوح و تفسیر نتایج. روش‌های درون‌یابیِ متنوعی در برآورد سطح آب‌های زیرزمینی و میزان آلودگی آن‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. بررسی منابع نشان می‌دهد که روش‌های بهینه به‌دست‌آمده متفاوت بوده و با تغییر مکان تغییر کرده‌اند. ازاین‌رو روش منتخب در یک منطقه را نمی‌توان به سایر مناطق تعمیم داد (تقی‌زاده مهرجردی و همکاران ۱۳۸۷). از جمله روش‌های پرکاربرد روش‌های وزن‌دهی معکوس[10] (IDW)، تابع پایه شعاعی[11] (RBF)، کریجینگ ساده[12] (SK)، کریجینگ عادی[13] (OK) و کریجینگ عمومی[14] (UK) می‌باشند (تقی‌زاده مهرجردی و همکاران ۱۳۸۷، سکوتی اسکویی و همکاران ۱۳۹۰، سلطانی و همکاران ۱۳۸۹، صلاح ۲۰۰۹، سان و همکاران ۲۰۰۹).

جهت مقایسه روش‌های درون‌یابی می‌توان از اعتبارسنجی و اعتبارسنجی متقابل استفاده کرد. اساس این روش‌ها این است که تعدادی از نقاط از فرآیند درون‌یابی (به‌صورت تصادفی یا انتخابی) حذف و درون‌یابی با بقیه نقاط انجام می‌گیرد و در نهایت مقادیر محاسبه‌شده و پیش‌بینی‌شده با هم مقایسه می‌شوند. درصورتی‌که نقاط به‌صورت دسته‌ای حذف شوند روش مقایسه را اعتبارسنجی[15] و اگر نقاط یک‌به‌یک حذف شوند اعتبارسنجی متقابل[16] گویند. زمانی که تعداد نقاط کم باشد از اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. از جمله فرمول‌های رایج در اعتبارسنجی متقابل، ریشه خطای میانگین مربعات (RMSE) هست که توسط رابطه ۱ بیان می‌شود (گوندوغدو و گونی ۲۰۰۷، سان و همکاران ۲۰۰۹، کارتولوس و فیلیپو ۲۰۱۲، ندیری و همکاران ۲۰۱۳b، ۲۰۱۳c). در رابطه ۱، $Z(x_i)$ مقدار مشاهداتی و $\hat{Z}(x_i)$ مقدار برآورد شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum\left(Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\right)^2} \qquad [1]$$

روش پیشنهادی خطای اعتبارسنجی نقاط

در استفاده از روش‌های کلاسیک (مانند وزن‌دهی معکوس فاصله) و زمین‌آمار (کریجینگ) برای درون‌یابی پدیده‌های مختلف، پارامترهای متفاوتی مانند تراکم نقاط، مقیاس، دقت مورد نیاز و همگنی منطقه مؤثر هست. در مناطق همگن برداشت نقاط با تراکم اندک انجام می‌گیرد، زیرا مقدار پارامتر مورد نظر تغییرات مکانی کمی داشته و می‌توان از مقدار پارامتر همسایه‌ها در فاصله دورتر نیز استفاده کرد. لذا خطای به‌دست‌آمده برای هر نقطه می‌تواند نشانه‌ای از برداشت صحیح نقاط با تعداد و تراکم مناسب باشد. در درون‌یابی عوارض سطحی، شخص اپراتور، نوع منطقه، خطوط شکستگی[17]، تپه‌ها و غیره را مشاهده می‌کند و می‌تواند تراکم نقاط برداشت‌شده را به‌منظور افزایش دقت تغییر دهد. اما در برداشت اکثر پدیده‌های زیرسطحی مانند آب‌های زیرزمینی و آلودگی خاک این امکان وجود ندارد. اما همچنان خطای به‌دست‌آمده برای هر نقطه می‌تواند بیانگر برداشت صحیح نقاط با تعداد و تراکم مناسب باشد. یعنی بعد از برداشت اطلاعات چاه‌های پیزومتری و تشکیل سطح مربوطه، درصورتی‌که خطای نقطه‌ای به‌دست‌آمده هنگام اعتبارسنجی متقابل برای نقطه‌ای کمینه باشد یعنی تغییرات سطح آب اندک بوده و مقدار این نقطه

[9] Trend
[10] Inverse distance weighting
[11] Radial Basis Function
[12] Simple Kriging
[13] Ordinary Kriging
[14] Universal Kriging
[15] Validation
[16] Cross Validation
[17] Break Line

Archive of SID

www.SID.ir

توسط همسایه‌های مجاور قابل تخمین است. اساس روش پیشنهادی این تحقیق، استفاده از خطای نقاط در اعتبارسنجی متقابل و کمینه بودن مقدار خطای روش‌های درون‌یابی هست. اگر بعد از حذف یک داده، نقشه‌ای با خطای بیشتر تولید شود، موقعیت نقطه در شبکه مهم بوده است.

مراحل کاری در روشِ حذفی نقاط با اعتبارسنجی متقابل بدین طریق است که در مرحله اول بهترین روش درون‌یابی برای سطح مشخص می‌شود و نقطه‌ای که کمترین خطا را در حین اعتبارسنجی متقابل و تشکیل سطح داشته انتخاب و از مجموعه داده‌ها کنار گذاشته می‌شود. در مرحله دوم سطح با $n-1$ نقطه تشکیل‌شده و RMSE سطح دوم با RMSE سطح مرحله اول مقایسه می‌شود. درصورتی‌که درصد تغییر RMSE سطوح در مرحله اول و دوم از مقدار معقول (مثلاً افزایش ۱۱٪ خطای سطح) کمتر باشد مجدداً نقطه دیگری که کمترین خطا را در اعتبارسنجی نقاط هنگام تشکیل سطح دوم داشته باشد از مجموعه‌ی داده‌ها کنار گذاشته می‌شود و سطح با $n-2$ نقطه تشکیل و مراحل قیدشده تا زمانی که درصد تغییر از مقدار مدنظر کمتر باشد ادامه می‌یابد. مقدار قابل‌قبول برای خطای سطح در پدیده‌های مختلف، متفاوت هست و می‌تواند بر اساس دقت سطح اولیهِ ایجادشده و اعمال نظرات کارشناسی انتخاب گردد. لازم به ذکر است که در هر مرحله صرفاً یک نقطه حذف می‌شود، زیرا مقدار خطا در اعتبارسنجی متقابل با فرض حضور دیگر نقاط است.

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی جزء آمار چند متغیره بوده و روشی ساده و غیر پارامتری جهت استخراج اطلاعات مربوطه از میان حجم عظیمی از داده هست (همت پور و هاشمی ۱۳۹۰). در روش PCA تعداد کمتری از عوامل به نام مؤلفه‌های اصلی از میان عوامل اولیه گزینش می‌شوند (شیخ‌الاسلامی و همکاران ۱۳۹۱). اولین مؤلفه اصلی دارای بیش‌ترین اهمیت بوده و عامل اصلی تغییرات داده را توصیف می‌کند (ندیری و همکاران ۲۰۱۳a). PCA عموماً برای کاهش ابعاد داده و آشکارسازی الگوهای ساده‌تر در درون مجموعه‌ای از متغیرها مورداستفاده قرار می‌گیرد (قورجی رودکی و همکاران ۱۳۹۲).

در تحلیل مؤلفه‌های اصلی چاهی که داده‌های آن دارای هم‌بستگی معنی‌داری با مؤلفه‌های اصلی باشد، به‌عنوان چاه مؤثر و مهم قلمداد می‌شود. اجرای این روش در ۶ مرحله انجام می‌گیرد (نوری و همکاران۱۳۸۶، نوری قیداری ۱۳۹۲):

۱. انتخاب همسایگی مناسب برای هر چاه: تعداد چاه‌هایی که وارد مراحلِ PCA هر چاه می‌شود، به سری اطلاعات اندازه‌گیری شده از آن چاه وابسته است. در این تحقیق از داده‌های ۱۲ ماهِ چاه‌های پیزومتری دشت تبریز استفاده شدند، لذا ۱۲ همسایه‌ی مجاور هر چاه به‌عنوان ورودی در PCA انتخاب شدند.

۲. اعمال تجزیه به مؤلفه‌های اصلی: خروجی این مرحله، رابطه‌ی بین هر چاه و مؤلفه‌های اصلی هست. هر چه مقدار رابطه بین چاه و مؤلفه‌های اصلی (سهم متغیرها در مؤلفه‌ها) بالاتر باشد، همبستگی بین چاه و مؤلفه‌ی اصلی و در نتیجه اهمیت چاه بیشتر است.

۳. تعیین اهمیت چاه‌های موجود: در این مرحله با توجه به ماتریس $n\times n$ بدست آمده برای مؤلفه‌ها، چاه‌های بااهمیت مشخص می‌گردد. در هر ماتریس، چاهی که همبستگی بالایی (بیش از ۰/۹۰) با مؤلفه‌های اصلی داشته باشد به‌عنوان چاه مؤثر شناخته می‌شود (نوری قیداری ۱۳۹۲).

۴. در این مرحله نتایج مرحله قبل جمع‌بندی می‌شوند و اهمیت نسبی هر چاه با استفاده از فراوانی مؤثر هر چاه به‌دست می‌آید. جهت محاسبه اهمیت نسبی و فراوانی مؤثر هر چاه از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

Archive of SID

www.SID.ir

$$\text{اهمیت نسبی هر چاه} = \frac{\text{مجموع دفعاتی که هر چاه در محاسبات چاه‌های دیگر به عنوان موثر شناخته شده}}{\text{مجموع دفعاتی که هر چاه در همسایگی چاه‌های دیگر ظاهر شده}} \qquad [۲]$$

۵. بعد از محاسبه اهمیت نسبی هر چاه باید میزان تغییرات سطح آب به‌ازای حذف هر چاه محاسبه شود. حذف چاه‌ها کم‌اهمیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که متوسط ضریب تغییرات سطح آبخوان زیاد نباشد. برای این منظور باید به‌ترتیب چاه‌هایی که دارای اهمیت نسبی کمتر از ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و غیره هستند، حذف شوند و خطای ایجادشده در سطح به‌دست آید (نوری قیداری ۱۳۹۲). در این روش حد آستانه برای تعداد نقاط کنترل‌شده بر اساس میزان تغییر ضریب تغییرات و نظرات کارشناسی هست. برای محاسبه خطا با استفاده از رابطه ۳ ضریب تغییرات برای هر ماه محاسبه و میانگین آن‌ها با رابطه ۴ به‌دست می‌آید و در نهایت خطای ایجادشده در تخمین سطح از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (نوری قیداری ۱۳۹۲).

$$CV_i = \frac{\sigma}{\mu} \qquad i = 1, 2, ..., 12 \qquad [۳]$$

$$CV_m = \frac{\sum CV_i}{12} \qquad i = 1, 2, ..., 12 \qquad [۴]$$

$$Error = \frac{CV_m - CV_{mt}}{CV_{mt}} \times 100 \qquad [۵]$$

در رابطه‌های فوق σ انحراف معیار، μ میانگین، CV ضریب تغییرات، CV_{mt} متوسط ضریب تغییرات کلی چاه‌های پیزومتری موجود، CV_m متوسط ضریب تغییرات به‌ازای حذف چاه‌ها با توجه به اهمیت نسبی محاسبه‌شده هست. در این تحقیق برای پیاده‌سازی این روش از نرم‌افزارهای آماری SPSS و XLSTAT و نرم‌افزار مهندسی MATLAB استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به این‌که هر ساله در برخی از چاه‌های پیزومتری به علل متفاوت مانند پر شدن چاه‌ها، امکان اندازه‌گیری وجود ندارد، ابتدا باید پیزومترهایی که در فرآیند سالانه یا ماهانه مرتباً اندازه‌گیری شده‌اند شناسایی و خطاهای آن‌ها برطرف شوند. داده‌های اشتباه نتایج به‌دست‌آمده را دور از واقعیت کرده و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (نوری قیداری ۱۳۸۹). لذا، ابتدا جهت کنترل خطای داده‌های چاه‌های پیزومتری، از سیر نزولی یا صعودی بودن اعداد در طول ماه‌های متفاوت استفاده گردید. سیر افزایشی یا کاهشیِ مقدار آب‌های زیرزمینی، بیشتر ناشی از عواملی چون نزولات بارشی و برداشت برای مصارف خانگی و کشاورزی هست، لذا تغییرات ماهیانه دارای روند مشخصی بوده و میزان تغییرات آن در یک گستره محدود هست. بررسی روند کلی آب زیرزمینی آبخوان نشان می‌دهد که مقدار ارتفاع آب زیرزمینی در ماه‌های مهر تا اردیبهشت افزایشی و از اردیبهشت تا شهریور کاهشی هست، ازاین‌رو ابتدا داده‌ها با توجه به اختلاف بین هر دو ماه متوالی و روند کلی سطح آب چاه خطایابی شدند. در نقاطی که به‌عنوان خطا شناخته شدند، میانگین همان نقطه در دو ماه متوالی مدنظر قرار گرفت. خلاصه آماری داده‌های تصحیح‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

بعد از کنترل خطای داده‌های چاه‌های پیزومتری، آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد. با توجه به این‌که داده‌ها نرمال نبودند، در روش‌های کریجینگ تبدیل‌های لوگ[18] و باکس-کاکس[19] بر روی داده‌ها اعمال شد تا پیش‌فرض روش‌های کریجینگ که نرمال بودن داده‌هاست، برقرار شود (صلاح ۲۰۰۹)، در این تحقیق برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. با توجه به این‌که یک روش درون‌یابی بهینه برای پدیده‌های هیدرولوژیکی موجود نیست (سان و همکاران ۲۰۰۹)، روش‌های IDW، RBF و Kriging بر روی مقدار متوسط سطح آب‌های زیرزمینی اعمال شد. نتایج بهینه حاصل در جدول ۲ ارائه شده است. ستون سوم، چهارم و پنجم جدول ۲ مربوط به پارامترهای بهینه‌شده در هر روش درون‌یابی هست.

[18] Log
[19] Box-Cox

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- خلاصه آماری داده‌های رقوم سطح آب زیرزمینی استفاده‌شده در دوازده ماه سال ۱۳۸۷ (برحسب متر)

آمار	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مقدار کمینه	۱۲۷۰/۴	۱۲۷۱/۶	۱۲۷۳/۲	۱۲۷۴/۲	۱۲۷۴/۷	۱۲۷۴/۸	۱۲۷۴/۳	۱۲۷۴/۰	۱۲۷۱/۱	۱۲۶۸/۸	۱۲۶۸/۸	۱۲۶۸/۵
مقدار بیشینه	۱۹۴۰/۵	۱۹۴۰/۴	۱۹۴۰/۳	۱۹۴۰/۱	۱۹۴۰/۰	۱۹۴۰/۱	۱۹۴۰/۷	۱۹۴۱/۸	۱۹۴۲/۰	۱۹۴۱/۱	۱۹۴۰/۹	۱۹۴۰/۶
میانه	۱۳۲۶/۸	۱۳۲۶/۹	۱۳۲۷/۲	۱۳۲۷/۳	۱۳۲۷/۵	۱۳۲۷/۶	۱۳۲۷/۲	۱۳۲۷/۷	۱۳۲۷/۵	۱۳۲۷/۳	۱۳۲۷/۳	۱۳۲۶/۹
متوسط	۱۴۲۰/۳	۱۴۲۰/۵	۱۴۲۰/۶	۱۴۲۰/۷	۱۴۲۰/۷	۱۴۲۰/۹	۱۴۲۱/۶	۱۴۲۱/۴	۱۴۲۰/۹	۱۴۲۰/۵	۱۴۲۰/۲	۱۴۲۰/۱
انحراف معیار	۲۰۶/۹۱	۲۰۶/۹۳	۲۰۶/۹۲	۲۰۶/۸۶	۲۰۶/۸۶	۲۰۶/۷۶	۲۰۶/۷۸	۲۰۶/۸۱	۲۰۶/۹۳	۲۰۶/۹	۲۰۶/۹	۲۰۶/۹۳

در استفاده از هر روش درون‌یابی تلاش شد ابتدا حالت بهینه برای هر روش محاسبه و سپس با روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار بگیرد. در نهایت روش کریجینگ عمومی با RMSE برابر با ۱/۱۷متر به‌عنوان بهترین روشِ تخمین سطح تعیین شد. بدترین جواب مربوط به حالت اسپیلاین‌های صفحات نازک در روش تابع پایه شعاعی بود که در آن مقدار خطا بیش از دو برابر خطای کریجینگ عمومی محاسبه شد. روش اسپیلاین چندگانه نیز با ۶/۵ درصد اختلاف نسبت به کریجینگ عمومی دومین روش بهینه بود. نتایج حاصل همانند پژوهش‌های پیشین، تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۱۳۸۷)، سلطانی و همکاران (۱۳۸۹)، سان و همکاران (۲۰۰۹) نشان از قابلیت روش‌های کریجینگ در تخمین سطح آب‌های زیرزمینی هست. در ادامه، میزان خطای نقطه‌ای حاصل از اعتبارسنجی متقابل در روش کریجینگ عمومی محاسبه گردید. جهت تعیین این خطا خود نقطه کنار گذاشته‌شده و با استفاده از همسایگی‌های آن مقداری برای نقطه حذف‌شده برآورد شد. اختلاف بین مقدار مشاهده‌شده و مقدار برآورد شده میزان خطای آن نقطه را نشان می‌داد.

بعدازاین مرحله نقطه‌ای که کمترین خطا را در حین اعتبارسنجی متقابل داشته حذف شد. نقطه‌ی ۳ با خطای ۰/۰۰۵ اولین نقطه حذفی بود. بعد از حذف این نقطه سطح مجدداً بازسازی شد و مقدار RMSE سطح ایجادشده محاسبه گردید، که بعد از حذف نقطه۳، برابر با ۱/۱۷۱متر گردید. با لحاظ این‌که خطای ایجادشده در نقطه حذف‌شده ملاک دیگری بود RMSE دوم برای نقاط حذف‌شده نیز محاسبه شد. ترتیب حذف شدن و میزان تغییر RMSE سطح در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود به‌تدریج، با حذف نقاط بیشتر، مقدار RMSE سطح حاصل و RMSE نقاط حذف‌شده افزایش می‌یابد. درصورتی‌که ۳۰ نقطه از مجموعه داده‌ها کنار گذاشته شود مقدار RMSE سطح ۱۶/۵٪ افزایش می‌یابد.

در ادامه میزان تغییر RMSE سطح با حذف چاه‌ها به‌روش PCA محاسبه گردید. مرحله اول انتخاب همسایگی بود. تعداد چاه‌هایی که برای همسایگی هر چاه انتخاب و وارد فرآیند PCA خواهند شد وابسته به سری اطلاعات اندازه‌گیری شده هست، زیرا تحلیل PCA بر روی یک ماتریس $n \times p$ اعمال می‌شود و در این ماتریس ستون‌ها (p) بیانگر چاه‌ها و سطرها (n) بیانگر مشاهدات در سال‌ها یا ماه‌های متفاوت هست (در این ماتریس $p \le n$ هست).

جهت اجرای PCA با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزارMATLAB، ابتدا ۷۵ ماتریس ۱۲×۱۲ بر اساس همسایگی اقلیدسی برای هر نقطه شکل گرفت. سپس آنالیز PCA بر روی تک‌تک ماتریس‌ها اعمال شد و سهم متغیرها در مؤلفه‌ها محاسبه گردید، نمونه‌ای از خروجی آن در جدول ۴ ارائه شده است. تعداد مؤلفه‌های اصلی در PCA برابر با تعداد چاه‌های استفاده‌شده در همسایگی هست. مؤلفه‌ی اول PCA بیش‌ترین واریانس را دارد و به‌ترتیب واریانس در مؤلفه‌های بعدی کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه سهم متغیرها در مؤلفه‌های اصلی در سه مؤلفه اول خود را نمایان می‌سازد (ندیری و همکاران ۲۰۱۳a) ازاین‌رو سه ستون اول می‌توانند ملاک اصلی تعیین چاه‌های مؤثر در شبکه باشند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- نتایج حاصل از اعمال روش‌های مختلف درون‌یابی.

روش درون‌یابی	نوع توابع	تبدیل/ ضریب کرنل	تعداد همسایه	نوع بخش	خطا (متر)
وزن‌دهی معکوس فاصله	توان = ۳/۰۳۸	-	۵	۴ بخشی	۱/۵۸۸
	اسپیلاین کاملاً منظم	۰/۰۳۳	۸	۴-۴۵°	۱/۵۹۳
	اسپیلاین تنشی	۰/۰۰۵	۵	۴-۴۵°	۱/۴۵۸
تابع پایه شعاعی	چندگانه	۶/۷	۱۲	۴-۴۵°	۱/۲۴۶
	چندگانه‌ی معکوس	۷۲/۴۹۵	۵	۱	۱/۸۱۳
	اسپیلاین صفحه نازک	۲×۱۰^۸۱۵	۴	۴ بخشی	۲/۴۲۳
	کریجینگ ساده	لوگ	۷	۴ بخشی	۱/۳۴۸
کریجینگ	کریجینگ عادی	لوگ	۵	۴ بخشی	۱/۳۱۹
	کریجینگ عمومی	باکس-کاکس	۸	۴-۴۵°	***۱/۱۷***

جدول ۳- مقدار تغییرات RMSE بر اساس تعداد نقاط حذف‌شده.

تعداد چاه حذف‌شده	خطای تشکیل سطح (m)	خطای سطح در اعتبارسنجی	چاه کم تأثیر	تعداد چاه حذف‌شده	خطای سطح (m)	خطای سطح در اعتبارسنجی	چاه کم تأثیر
۱	۱/۱۷۰	۰/۰۴۵	۳	**۱۶**	۱/۲۷۱	۰/۱۰۸	۲۵
۲	۱/۱۷۱	۰/۰۵۰	۲	**۱۷**	۱/۲۷۴	۰/۱۰۸	۴۴
۳	۱/۱۷۵	۰/۰۴۳	۵۳	**۱۸**	۱/۲۷۴	۰/۱۰۹	۱۷
۴	۱/۱۷۷	۰/۰۴۲	۶۳	**۱۹**	۱/۲۷۶	۰/۱۱	۱۱
۵	۱/۱۷۸	۰/۰۴۷	۴۷	**۲۰**	۱/۲۷۹	۰/۱۰۲	۴۹
۶	۱/۱۸	۰/۰۵۱	۱۲	**۲۱**	۱/۲۸۳	۰/۱۵۵	۱۰
۷	۱/۲۱۷	۰/۱۰۱	۶۶	**۲۲**	۱/۲۸۸	۰/۱۷۵	۵۱
۸	۱/۲۲۷	۰/۱۳۳	۵۰	**۲۳**	۱/۲۸۹	۰/۱۵۶	۴۳
۹	۱/۲۳۲	۰/۱۳۹	۳۸	**۲۴**	۱/۲۹۱	۰/۱۹۵	۳۷
۱۰	۱/۲۱۶	۰/۰۶۳	۶۲	**۲۵**	۱/۲۹۸	۰/۱۷۵	۳۵
۱۱	۱/۲۱۹	۰/۰۶۶	۵۶	**۲۶**	۱/۳۰۰	۰/۱۸۵	۵۷
۱۲	۱/۲۳۰	۰/۱۰۵	۲۶	**۲۷**	۱/۳۰۳	۰/۱۸۲	۳۳
۱۳	۱/۲۶۷	۰/۱۰۲	۶۱	**۲۸**	۱/۳۱۲	۰/۲۰۲	۲۳
۱۴	۱/۲۶۵	۰/۱۰۵	۴۵	**۲۹**	۱/۳۱۶	۰/۲۰۵	۲۴
۱۵	۱/۲۶۸	۰/۱۰۷	۶۵	**۳۰**	۱/۳۶۲	۰/۲۳۵	۳۲

خروجی مرحله‌ی قبل ۷۵ ماتریس مانند جدول ۴ خواهد بود. حال باید اهمیت نسبی هر یک از چاه‌ها مشخص شود. برای محاسبه این کمیت، ابتدا تعداد دفعاتی که هر چاهی ضریب همبستگی بالای ۰/۹ با مؤلفه‌های PCA داشته باشد (نوری قیداری ۱۳۹۲) شمارش و بر تعداد دفعاتی که هر چاه در همسایگی چاه‌های دیگر شمارش‌شده تقسیم می‌شود (رابطه ۲). عدد حاصل بین صفر تا یک است و اهمیت نسبی چاه‌های پیزومتری را نشان می‌دهد. جدول ۵ اهمیت نسبی هر چاه را نشان می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴- ماتریس سهم متغیرها در مؤلفه‌های اصلی برای چاه شماره یک.

مؤلفه‌ها/ چاه‌های مؤثر	۱	۲	۳	۴	۵
۲	۰/۷۷	۰/۵۶	-۰/۱۶	-۰/۱۱	-۰/۱۲
۵	۰/۳۸	۰/۱۳	۰/۸۱	۰/۴۰	۰/۰۹
۴	۰/۸۴	-۰/۰۷	۰/۳۴	-۰/۳۲	-۰/۲۰
۱۵	۰/۹۴	۰/۲۰	-۰/۱۰	-۰/۱۵	۰/۰۰
۲۰	۰/۸۳	-۰/۰۸	-۰/۳۸	۰/۲۹	-۰/۰۱
۱۸	۰/۸۸	۰/۲۷	-۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۳۲
۱۲	۰/۸۲	-۰/۴۶	۰/۰۹	-۰/۲۲	۰/۱۹

جدول ۵- اهمیت نسبی محاسبه‌شده برای هر نقطه بر اساس دفعات تکرار و دفعات مؤثر بودن هر چاه در PCA.

شماره چاه	تعداد تکرار	دفعات تأثیر	اهمیت نسبی	شماره چاه	تعداد تکرار	دفعات تأثیر	اهمیت نسبی	شماره چاه	تعداد تکرار	دفعات تأثیر	اهمیت نسبی
۱	۳	۰	۰	**۲۶**	۱۴	۱	۰/۰۷	**۵۱**	۱۸	۰	۰
۲	۴	۰	۰	**۲۷**	۱۳	۰	۰	**۵۲**	۱۷	۲	۰/۱۲
۳	۸	۱	۰/۱۳	**۲۸**	۱۷	۱۳	۰/۷۶	**۵۳**	۱۶	۳	۰/۱۹
۴	۴	۰	۰	**۲۹**	۶	۳	۰/۵۰	**۵۴**	۱۵	۲	۰/۱۳
۵	۶	۳	۰/۵۰	**۳۰**	۱۲	۰	۰	**۵۵**	۱۱	۴	۰/۳۶
۶	۸	۵	۰/۶۳	**۳۱**	۳	۳	۰	**۵۶**	۱۲	۰	۰
۷	۸	۵	۰/۶۳	**۳۲**	۸	۴	۰/۵۰	**۵۷**	۱۸	۱۲	۰/۶۷
۸	۸	۵	۰/۶۳	**۳۳**	۱۲	۳	۰/۲۵	**۵۸**	۱۹	۹	۰/۴۷
۹	۹	۲	۰/۲۲	**۳۴**	۱۳	۵	۰/۳۸	**۵۹**	۱۷	۱۲	۰/۷۱
۱۰	۸	۱	۰/۱۳	**۳۵**	۱۴	۸	۰/۵۷	**۶۰**	۱۶	۱۴	۰/۸۸
۱۱	۸	۸	۱	**۳۶**	۶	۵	۰/۸۳	**۶۱**	۱۲	۹	۰/۷۵
۱۲	۸	۸	۱	**۳۷**	۱۱	۵	۰/۴۵	**۶۲**	۱۲	۲	۰/۱۷
۱۳	۹	۰	۱	**۳۸**	۱۱	۲	۰/۱۸	**۶۳**	۱۶	۲	۰/۱۳
۱۴	۴	۲	۰/۵۰	**۳۹**	۸	۵	۰/۶۳	**۶۴**	۱۷	۳	۰/۱۸
۱۵	۱۳	۱۲	۰/۹۲	**۴۰**	۹	۲	۰/۲۲	**۶۵**	۱۴	۱۲	۰/۸۶
۱۶	۱۷	۷	۰/۴۱	**۴۱**	۱۳	۰	۰	**۶۶**	۱۳	۱۲	۰/۹۲
۱۷	۸	۳	۰/۳۸	**۴۲**	۱۰	۱	۰/۱۰	**۶۷**	۱۶	۱۶	۱
۱۸	۱۷	۱۳	۰/۷۶	**۴۳**	۱۵	۱۲	۰/۸۰	**۶۸**	۱۴	۱۴	۱
۱۹	۱۷	۱۴	۰/۸۲	**۴۴**	۱۳	۳	۰/۲۳	**۶۹**	۷	۱	۰/۱۴
۲۰	۱۴	۱	۰/۰۷	**۴۵**	۱۳	۸	۰/۶۲	**۷۰**	۶	۳	۰/۵۰
۲۱	۱۵	۱۳	۰/۸۷	**۴۶**	۴	۲	۰/۵۰	**۷۱**	۱۱	۸	۰/۷۳
۲۲	۱۱	۵	۰/۴۵	**۴۷**	۷	۲	۰/۲۹	**۷۲**	۷	۷	۱
۲۳	۱۳	۰	۰	**۴۸**	۸	۶	۰/۷۵	**۷۳**	۹	۷	۰/۷۸
۲۴	۱۴	۸	۰/۵۷	**۴۹**	۱۳	۱۱	۰/۸۵	**۷۴**	۴	۲	۰/۵۰
۲۵	۶	۱	۰/۱۷	**۵۰**	۱۱	۱	۰/۰۹	**۷۵**	۴	۲	۰/۵۰

Archive of SID

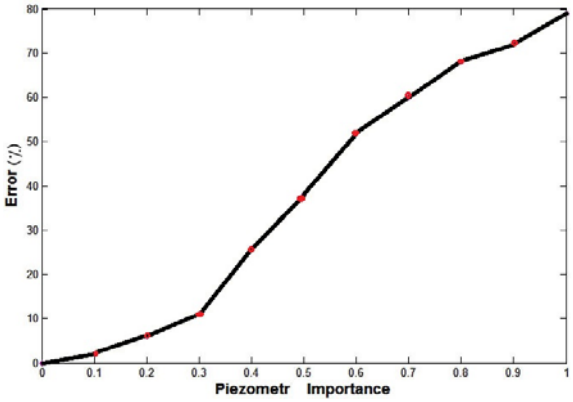
www.SID.ir

جهت محاسبه میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی، به‌ترتیب چاه‌هایی که دارای اهمیت نسبی کمتر از ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و غیره بودند حذف شدند. نمودار خطای حاصل در سطح ایجادشده به‌ازای حذف نقاط با رابطه ۵ در شکل۲ ارائه شده است. حذف چاه‌های کم‌اهمیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که متوسط ضریب تغییرات سطح آبخوان زیاد نباشد. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است به‌ازای حذف چاه‌هایی که دارای اهمیت نسبی کمتر از ۰/۳ هستند متوسط ضریب تغییرات ۱۱ درصد تغییر می‌کند. در تحقیقی مشابه که توسط نوری قیداری (۱۳۹۱) انجام پذیرفت چاه‌هایی که اهمیت نسبی کمتر از ۰/۵ داشتند حذف شدند و میزان ضریب تغییرات ۱۳ درصد تغییر کرد.

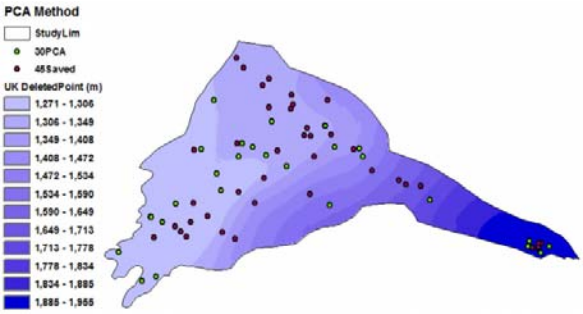
بعد از حذف ۳۰ چاه از مجموعه چاه‌های پیزومتری دشت تبریز، سطح آب‌های زیرزمینی پهنه-بندی گردید. در روش PCA مقدار RMSE سطح نهایی به‌دست‌آمده بعد از حذف چاه با اهمیت نسبی ۰/۳ برابر با ۱/۳۴۳ مترشد که در آن دقت سطح ٪۱۴ کاهش یافت.

مقدار RMSE به‌دست‌آمده به‌روش خطای اعتبارسنجی برابر با ۱/۶۲۳متر بوده که نشان از افزایش ٪۱۶/۵ خطای سطح هست. از ۳۰ چاه حذف‌شده، ۱۸ چاه در هر دو روش به‌صورت مشترک حذف گردیدند. تغییرات RMSE سطح حاصل از PCA در قیاس با روش خطای نقطه‌ای اندک هست و از اعتبار بیشتری برخوردار است. مقایسه‌ی سه‌بعدی سطوح ایجادشده نیز حاکی از اندک بودن اختلاف سطوح به‌وجود آمده دارد. چاه‌های پیزومتری حذف‌شده در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شوند.

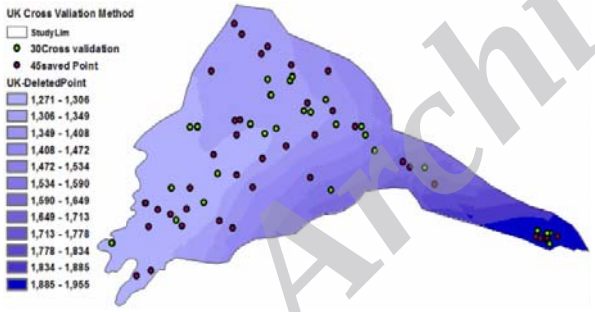
از جمله مزیت‌های اصلی استفاده از خطای نقطه-ای حاصل از اعتبارسنجی با لحاظ اختلاف ناچیز جواب آن با روش PCA، سادگی اجرای آن هست. از طرفی در بهینه‌سازی شبکه چاه‌های پیزومتری در PCA الزاماً از سری اطلاعات ۱۲ماه یا چندین سال استفاده می‌شود درحالی‌که روش خطای نقطه‌ای در شرایطی که سری زمانی از داده‌ها وجود نداشته باشد قابل‌استفاده بوده و سریع‌تر به نتیجه می‌رسد.



شکل ۲-نمودار خطای ایجاد شده در برآورد سطح آب‌های زیرزمینی با حذف چاه‌های پیزومتری براساس اهمیت نسبی.



شکل ۳- چاه‌های حذف شده و باقیمانده در روش PCA.



شکل ۴- چاه‌های حذف شده و باقیمانده درروش خطای نقطه‌ای اعتبارسنجی متقابل.

نتیجه‌گیری کلی

پرهزینه و زمان‌بر بودن حفر و نگه‌داری چاه‌های پیزومتری جهت تخمین سطح آب‌های زیرزمینی، ضرورت بهینه کردن تعداد چاه‌های پایش سطح آب زیرزمینی را می‌رساند. در این تحقیق جهت بهینه‌سازی

Archive of SID

www.SID.ir

تعداد چاه‌های پیزومتری آبخوانِ آزاد دشت تبریز، بعد از اخذ اطلاعات ۷۵ چاه پیزومتری روش‌های رایج درون-یابی جهت پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی اعمال شدند، روش کریجینگ عمومی با RMSE برابر ۱/۱۷متر سطح بهینه را تخمین زد. در ادامه ۳۰ چاه پیزومتری کم‌اهمیت با روش‌های خطای نقطه‌ای حاصل از اعتبارسنجی متقابل و روش PCA حذف گردید. RMSE سطح نهایی برای روش PCA، ٪۱۴ و برای خطای اعتبارسنجی متقابل ۱۶/۵ درصد تغییر کرد. تغییرات RMSE سطح حاصل از PCA در قیاس با روش خطای نقطه‌ای اندک بوده و از اعتبار بیشتری برخوردار هست؛ لذا در این بررسی ملاک نتیجه‌گیری قرار گرفت. نتایج حاصل از روش خطای اعتبارسنجی نیز نشان داد که اگر تعدادی از داده‌ها مفقود باشد و یا امکان دسترسی فراهم نباشد می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات سطح به‌کاربرده شود. تعداد چاه‌های حذف‌شده می‌تواند تابع عواملی چون وسعت منطقه، تراکم نقاط و نحوه شکل‌گیری شبکه پایش اولیه باشد (بیوریدج و همکاران ۲۰۱۲). نتایج حاصل بیانگر این است که با حذف ۳۰ نقطه از شبکه پایش سطح آب زیرزمینی دشت تبریز مقدار خطای حاصله قابل‌پذیرش بوده و می‌توان با افزایش دقت اندازه‌گیری سطح آب در بقیه چاه‌های پیزومتری و صرفه‌جویی در زمان و هزینه به همان دقت سطح اولیه رسید.

منابع مورد استفاده

تقی زاده مهرجردی را، زارعیان جهرمی م، محمودی ش، حیدری ا و سرمدیان ف، ۱۳۸۷. بررسی روشهای درون یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی های کیفی آب های زیرزمینی دشت رفسنجان. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جلد ۲، شماره ۵، صفحه‌های: ۶۳ تا ۷۰.

رزاق منش م، سالمی ت و سراج م، ۱۳۸۵. بررسی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت تبریز. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۲-۱۴ شهریورماه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

سکوتی اسکویی ر، جباری ع، کلاه چی ع و بروشکه ا، ۱۳۹۰. کاربرد زمین‌آمار برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت ارومیه. همایش ملی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کشاورزی و محیط‌زیست، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه.

سلطانی م ج، شادفر ص و بکتاش پ، ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در انتخاب مکان‌های مستعد اجرای عملیات پخش سیلاب با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS). همایش سیستم‌های اطلاعات مکانی. ۸ آذرماه، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.

شیخ‌الاسلامی ع، باقری خ و محمودآبادی ع، ۱۳۹۱. کاهش متغیرهای ورودی در فرآیند مدل‌سازی تصادفات آزادراه‌ها با استفاده از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی. مهندسی حمل‌ونقل، جلد ۳، شماره ۴، صفحه‌های ۳۲۵ تا ۳۳۸.

فرجی سبک‌بار ح و عزیزی ق، ۱۳۸۵. ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد. پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۸، صفحه‌های ۱ تا ۱۵.

قدم پور ز و شقاقیان م، ۱۳۹۰. مقایسه مدل‌های کلاسیک سری زمانی و هوش مصنوعی در تعیین سطح تراز آب زیرزمینی. صفحه‌های ۸-۱. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۶ و۷ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه سمنان، سمنان.

قهرمان ب، حسینی س م و عسگری ح، ۱۳۸۲. کاربرد زمین‌آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی. نشریه امیرکبیر (مهندسی عمران)، جلد ۱۴، شماره ۵۵، صفحه‌های ۹۷۱ تا ۹۸۱.

قهرودی تالی م و بابایی فینی ا، ۱۳۸۹. درآمدی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (رشته جغرافیا). انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران.

کریمی گوغری ش و خلیفه س، ۱۳۹۲. ارزیابی کارایی شبکه‌های آب‌سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (مطالعه موردی: حوزه بختگان- مهارلو)، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۲، شماره ۳، صفحه‌های ۳۴ تا ۶۶.

Archive of SID

www.SID.ir

قورجی رودکی م، کریم پور م ح و ابراهیمی نصر آبادی خ، ۱۳۹۲. کاربرد آنالیز مؤلفه‌های اصلی در جهت شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی و نواحی دگرسان در ناحیه هلاک آباد، سبزوار. بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۲۰، شماره ۱، صفحه‌های ۵۳ تا ۶۶.

لشکری پور غ، رستمی بارانی ح و ترشیزی ح، ۱۳۸۵. افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت کاشمر. صفحه-های ۲۴۲۸ تا ۲۴۳۸. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. ۱۳ شهریورماه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

نوری را، کراچیان ر، خدادادی دربان ا و شکیبایی نیا ا، ۱۳۸۶. ارزیابی اهمیت ایستگاه‌های پایش کیفی رودخانه‌ها با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی و آنالیز فاکتور (مطالعه موردی: رودخانه کارون). آب و فاضلاب، جلد ۱۸، شماره ۶۳، صفحه‌های ۶۰ تا ۶۹.

نوری قیداری م ح، ۱۳۸۹. شناسایی داده‌های پرت در آنالیز منطقه‌ای سیلاب به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۱۴-۱۶ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

نوری قیداری م ح، ۱۳۹۲. تعیین چاه‌های مؤثر در تعیین تراز سطح آب زیرزمینی با آنالیز مؤلفه‌های اصلی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌وخاک، جلد ۱۷، شماره۶۴، صفحه‌های ۱۴۹ تا ۱۵۸.

همت پور س و هاشمی ح، ۱۳۹۰. استفاده از تکنیک‌های کاهشی بعد تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل جداکننده‌های پارامتری شده (RDA) در رتبه‌بندی نشانگرهای لرزه‌ای. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۷، شماره ۴، صفحه‌های ۲۱۷ تا ۲۲۷.

ندیری ع. ۱۳۸۳. ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی در محدودهٔ متروی شهر تبریز با استفاده از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی. رساله کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

Alfonso L, Lobbrecht A and Price R, 2010. Optimization of water level monitoring network in polder systems using information theory. Water Resources Research 46 (12): 1-13.

Beveridge D, St-Hilaire A, Ouarda TB, Khalil B, Conly FM, Wassenaar LIand Ritson-Bennett E, 2012. A geostatistical approach to optimize water quality monitoring networks in large lakes: Application to Lake Winnipeg. Journal of Great Lakes Research 38: 174-182.

Cetinkaya CP and Harmancioglu NB, 2014. Reduction of streamflow monitoring networks by a reference point approach. Journal of Hydrology 512: 263-173.

Gundogdu KS and Guney I, 2007. Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. Journal of Earth System Science 116: 49-55.

Karamouz M, Hafez B and Kerachian R, 2005. Water Quality Monitoring Network for River Systems: Application of Ordinary Kriging. Pp. 1-12. Proceeding of Impacts of Global Climate Change, 15-19 May, Alaska, United States.

Karamouz M, Khajehzadeh Nokhandan A, Kerachian R and Maksimovic C, 2009. Design of online river water quality monitoring systems using the entropy theory: a case study. Environmental Monitoring and Assessment 155: 63-81.

Keedwell E and Khu ST, 2005 .A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. Engineering Applications of Artificial Intelligence 18: 461-472.

Kurtulus B and Flipo N, 2012. Hydraulic head interpolation using Anfis—Model selection and sensitivity analysis. Computers & Geosciences 38: 43-51.

Nadiri AA, Asghari Mogadam A, Tsai F and Fijani E, 2013a. Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. Journal of Earth System Science 4: 1091-1105.

Nadiri AA, Chitsazan N, Tsai F and Moghaddam A, 2013b. Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation.Journal of Hydrologic Engineering 19(3), 520-532

Nadiri AA, Fijani E and Asghari Moghaddam A, Tsai F, 2013c. Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. Journal of Hydroinformatics 15(4): 14-74.

Park S-Y, Choi JH, Wang S and Park SS, 2006. Design of a water quality monitoring network in a large river system using the genetic algorithm. Ecological Modelling 199: 289-297.

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

Sivapragasam C, Arun V and Giridhar D, 2010. A simple approach for improving spatial interpolation of rainfall using ANN. Meteorology and Atmospheric Physics 109: 1-7.

Archive of SID

www.SID.ir

Sun Y, Kang S, Li F and Zhang L, 2009. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. Environmental Modelling & Software 24:1163-1170.

Yakirevich A, Pachepsky YA, Gish TJ, Guber AK, Kuznetsov MY, Cady RE, Nicholson TJ, 2013. Augmentation of groundwater monitoring networks using information theory and ensemble modeling with pedotransfer functions. Journal of Hydrology 501: 13-24.

Zhou Y, Dong D, Liu J and Li W, 2013. Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. Geoscience Frontiers 4:127-138.

Archive of SID

www.SID.ir