مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۵، جلد نهم، شماره ۱ و۲، صفحه ۵۹ تا ٦٧

مقایسه روش‌های درون‌یابی در تخمین و تفسیر داده‌های پیزومتریک در بدنه سد خاکی (مطالعه موردی: سد شاه‌قاسم)

سعید نورائی نژاد[1*]، منصور پرویزی[2]، اردشیر شکرالهی[3]، مریم افروز[4]

دریافت مقاله: ۹٤/۰٦/۱۷ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۱۸

چکیده

نشت از سدها باعث خروج آب و حتی در بعضی مواقع پایداری سد را به خطر می‌اندازد. از مهمترین چالش‌ها در پروژه‌های عمرانی، علاوه بر طراحی و اجرای آنها، کنترل ایمنی و پایداری اجزای مختلف آن در طول دوران ساختمان و بهره‌برداری است. به وسیله میانیابی داده‌های بدست آمده از پیزومترهای سد می‌توان ارتفاع سطح ایستابی آب را در تمامی نقاط سد را بدست آورد. پس از میان‌یابی داده‌های پیزومتری سد شاه‌قاسم و استفاده از فن اعتبارسنجی به وسیله نرم‌افزار surfer 9، روش انحنای کمینه با داشتن (RMSE=5.26) و (MAE=3.67) و بیشترین (R^2=0.77) بهترین روش برای میان‌یابی ارتفاع ارتفاع سطح ایستابی در سد شاه‌قاسم است. روش‌های رگرسیون چندمتغیره و کریجینگ در اولویت بعدی قرار دارند. بررسی نقشه خطوط هم‌تراز حاصل از روش کریجینگ، وجود یک حفره در بالادست سد را محتمل می‌کند. نتایج روش انحنای کمینه تایید کننده، نتایج روش کریجینگ است و وجود یک حفره زیرسطحی را نشان می‌دهد. وجود این حفره پنهان باعث تخلیه آب مخزن سد و به خطر افتادن پایداری سد می‌شود.

کلید واژه‌ها: *سطح ایستابی، میان‌یابی، سد خاکی شاه‌قاسم، پایداری*

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج snoraie@yahoo.com
۲. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج
۳. استاد تمام دانشکده علوم، دانشگاه یاسوج
٤. کارشناس مهندسی شیمی
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی و ارتقای کیفیت زندگی از عوامل موثر در رشد مصارف آب است. ثابت بودن منابع آب قابل تجدید سالیانه و روند افزایش دائمی مصرف آب، موجب کاهش میزان سرانه آب قابل تجدید می‌شود. سدها از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور ذخیره آب و از ابزارهای لازم برای نیل به توسعه پایدار صنعتی، کشاورزی و گردشگری می‌باشد. یکی از راه‌های اتلاف آب، نشت از بدنه و تکیه‌گاه‌های این سازه‌ها می‌باشد (دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا وزارت نیرو، ۱۳۷۹). نشت از بدنه و تکیه‌گاه‌های یک سد خاکی بعنوان یک نیروی محرک پایداری عمل می‌کند و چنانچه کنترل نشود در درازمدت باعث فرار آب و مشکلات متعدد دیگری همچون زیرشوئی درونی یا پایپینگ(piping) می‌شود(ابول‌پور، ۱۳۷۳). توجه به دقت و صحت داده‌های ورودی در تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی از اهمیت خاصی برخوردار است. منابع خطا به طور عمده مربوط به جمع‌آوری، وارد کردن، ثبت، ذخیره‌سازی، فراخوانی، به کارگیری و تحلیل اطلاعات و در نهایت تهیه مدل‌ها می‌باشد. از جمله خطاهایی که بر داده‌های نقطه‌ای اعمال می‌شود، خطای مربوط به نحوه میان‌یابی آنهاست. این نوع خطا مربوط به نامناسب بودن روش انتخابی جهت میان‌یابی است(طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰). پیزومترهای موجود در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد یکی از انواع مختلف ابزار دقیق به کار رفته در سدها هستند، که ارتفاع سطح ایستابی آب در قسمت‌های مختلف سد را نشان می‌دهند. هدف اولیه این تحقیق، ارزیابی دقت روش‌های میان‌یابی در تخمین ارتفاع سطح ایستابی در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد شاه‌قاسم است. با توجه به آنکه با داشتن ارتفاع سطح ایستابی آب می‌توان تشخیص داد که قسمت‌های مختلف سد از اصول فیزیکی پیروی می‌کنند یا نه. باید سطح ایستابی آب در بالادست سد از سطح ایستابی آب در پایین‌دست بیشتر باشد و در غیر این صورت شاید آن قسمت سد دچار مشکل باشد و حتی شاید توان مشکل نشت از سد را به آن قسمت مشکل‌دار ربط داد. نشت از سد شاه‌قاسم نیز بیش از حد مجاز است و میزان هدر رفت آب براساس گزارش کنترل ایمنی و پایداری سد شاه‌قاسم در سال ۱۳۹۰، در تراز ۱۸۷۲، ۸۷ لیتر بر ثانیه و در تراز ۱۸۶۹، ۵۵ لیتر در ثانیه و زیر تراز آبگیر ۱۸۶۷برابر با ۳۰ لیتر در ثانیه و نهایتاً پائین‌تر از رقوم ۱۸۶۲، ۵ لیتر در ثانیه محاسبه گردیده است. با استفاده از منحنی بدست آمده پیش‌بینی فرار آب در ترازهای ۹۳-۱۸۹۲، ۲۴۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. خشک شدن زهکش سد نیز تاییدکننده همین موضوع است. هدف اساسی این تحقیق تعیین محل‌های مشکل‌دار این سد است.

تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در سطح یک منطقه و تبیین چگونگی توزیع فضایی و مکانی متغیر ضروری است. برای برآورد و تخمین متغیر، روش‌های مختلفی وجود دارد. به عنوان نمونه می‌توان روش‌های کلاسیک، همچون تیسن و میانگین حسابی را نام برد. همه این روش‌ها از نظر محاسبات، سریع و آسان می‌باشند، ولی به دلایلی از جمله در نظر نگرفتن موقعیت، آرایش و همبستگی بین مشاهده‌ها، از دقت کافی برخوردار نیستند. البته روش‌های دیگری نیز وجود دارند که به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها اهمیت زیادی دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان تکنیک زمین‌آمار را نام برد. در این شیوه موقعیت فضایی نمونه‌ها همراه با مقدار کمیت موردنظر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و در صورت وجود ساختار فضایی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. البته ممکن است نمونه‌های مجاور با فاصلهٔ معینی در قالب ساختار فضایی به هم وابسته باشند، در این حالت، بدیهی است که میزان تشابه مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیک‌تر احتمالاً بیشتر است زیرا در صورت وجود ساختار فضایی، تغییرهای ایجاد شده در فضای معین، شانس بیشتری را برای تأثیرگذاری بر فضاهای نزدیک به خود در مقایسه با فضاهای دورتر دارند(مهرشاهی و خسروی، ۱۳۸۹).

به فرایند برآورد ارزش‌های کمی، برای نقاط فاقد داده، به کمک نقاط مجاور و معلوم (که به نام پیمونگاه، نمونه و یا مشاهده موسوم‌اند) میان‌یابی گویند. این فرایند به دلیل محدودیت داده‌های نقطه‌ای و ضرورت تدوین نقشه از کل یک پهنه، به منظور تهیه نقشه‌های هم‌ارزش انجام می‌گیرد. بنابراین میان‌یابی به معنای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های پهنه‌ای است(طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰).

میان‌یابی را به چند روش می‌توان انجام داد. در ابتدا می‌توان آنها را به دو گروه همگانی(منطقه‌ای) و محلی طبقه‌بندی نمود. میان‌یابی همگانی تمامی نقاط معلوم را جهت برآورد ارزش نقطه یا نقاط نامعلوم به کار می‌گیرد. در روش محلی جهت برآورد هر نقطه نامعلوم تنها نمونه‌هایی از نقاط معلوم به کار می‌رود. در طبقه‌بندی دیگر، دقت روش، ملاک طبقه‌بندی است. در روش رسا مقادیر برآورد شده به مشاهدات(اندازه‌گیری‌ها) نزدیکتر است در حالی که روش نارسا تقریبی از ارزش‌ها و سطحی را برآورد می‌کند که از پیمونگاه می‌گذرد. سومین ملاک طبقه‌بندی روش‌های میان‌یابی مبتنی بر قطعی یا احتمالی‌بودن تخمین است. در روش قطعی مقادیرتخمینی فاقد خطا ولی در روش احتمالی برآورد حاوی خطا است. معادله کلی میان‌یابی به صورت زیر است تفاوت روش‌های مختلف در میزان پارامتر وزنی است. (۱)

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i . Z(x_i)$$

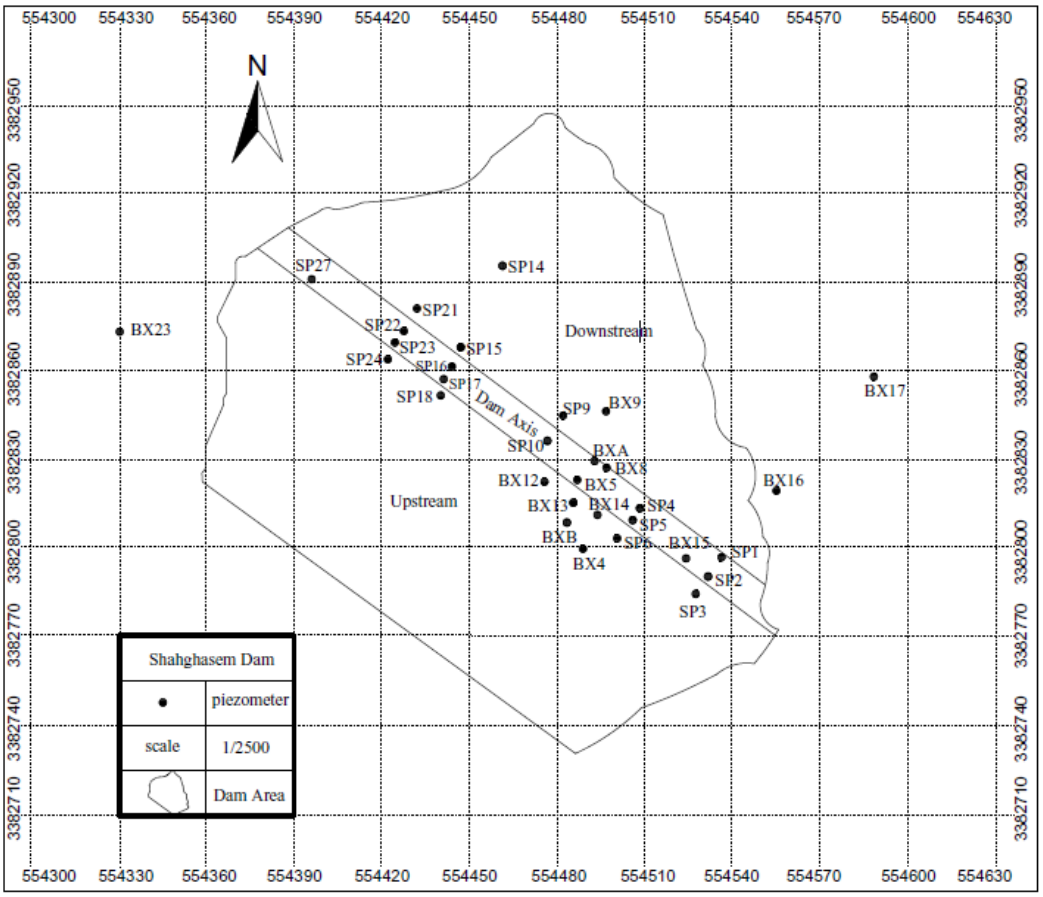
که در آن: $Z(x_i)$: مقدارمتغیرمکانی مشاهده شده در نقطه x_i ، ω_i: وزن آماری که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود(حسنی پاک، ۱۳۷۷).

کارآموز و همکاران (۱۳۸۳) از روش زمین‌آماری کریجینگ برای طراحی یک شبکه بهینه پایش کیفی رودخانه کارون استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ عملکرد مناسبی در زمینه طراحی شبکه پایش کیفی رودخانه‌ها بود. احمدالی و همکاران(۱۳۸۷) روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تخمین شوری و اسیدیته عمقی خاک در اراضی منطقه بوکان ارزیابی کردند و دریافتند که تخمین با روش کریجینگ و کوکریجینگ تفاوت زیادی ندارند. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 1994) روش‌های کریگینگ معمولی، TPSS، نزدیک‌ترین همسایگی، میانگین متحرک و عکس فاصله را برای برآورد شوری خاک در استان خوزستان را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. در تحقیق فوق، انحراف حاصل از روش‌ها زیاد، و ناشی از بزرگی نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه بود و در نهایت روش TPSS با توان۲ و روش کریکینگ معمولی بهترین روش‌ها تشخیص داده‌شد. (Zhang et al., 1997) زمین آمار را به عنوان یک ابزار مفید در حل مسائل مربوط به علوم خاک معرفی کردند. (Laslett et al., 1997) به بررسی و ارزیابی چند روش میان‌یابی برای برآورد pH خاک سطحی پرداختند. نتایج حاکی از دقت بیشتر روش میانگین متحرک وزنی نسبت به روش‌های دیگر در برآورد اسیدیته خاک بیشتری است. (Alsaaran, 2000) روش کریجینگ را بهترین روش برای میان‌یابی شوری آب زیرزمینی منطقه تبارک در مرکز عربستان صعودی بیان کرد. (Theodossiou and Latinopoulos., 2006) روش کریجینگ را برای میان‌یابی سطح آب‌زیرزمینی در حوضه آنته‌مونتاس در شمال یونان انتخاب کردند. (Moukana and Koike, 2008) برای تخمین درجه کاهش تراز آب زیرزمینی دشت کوماموتو در شمال غرب ژاپن، از مدل زمین‌آمار پراش‌نگار و کریجینگ معمولی به همراه تجزیه و تحلیل عکس‌های ماهواره‌ای استفاده نمودند. (Mair and Fares, 2011) از روش‌های چند جمله‌ای تیسن، معکوس وزنی فاصله(IDW)، رگرسیون خطی کریجینگ معمولی برای برآورد بارش فصل مرطوب و خشک در یک منطقه کوهستانی در ایسلند استفاده کردند. (Ha et al., 2011) میزان تبخیر و تعرق در یک منطقه تگزاس از روش‌های معکوس وزنی فاصله(IDW) و کریجینگ معمولی استفاده کردند و بیان کردند که روش معکوس وزنی فاصله دقت نسبت به روش کریجینگ معمولی دارد. (Kazemi Poshtmasari et al 2012) برای

تخمین توزیع EC و PH در زمین‌های کشاورزی استان گلستان از روش کریجینگ با مدل‌های مختلف، معکوس وزنی فاصله(IDW) و توابع شعاعی استفاده کردند. روش کریجینگ با مدل کروی بهترین روش برای تخمین PH و روش کریجینگ با مدل نمایی بالاترین دقت برای تخمین EC خاک در این منطقه را دارند.

۲. مواد و روش‌ها

سد خاکی شاه‌قاسم در اواسط دهه هفتاد شمسی در استان کهگیلویه و بویراحمد برروی چشمه‌های شاه‌قاسم در حدود ۱۵ کیلومتری جنوب شهر یاسوج با هسته رسی به ارتفاع ٤٧/٢ متر از پی، عمق پی ۲۰ متر، طول تاج ۲۲۰ متر، عرض تاج ۸ متر و ارتفاع تاج ۱۸۹٦ متر از سطح دریا به بهره‌برداری رسید. ۳۲ پیزومتر که قابلیت اندازه‌گیری فشار پیزومتریک را دارند، در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد مورد نظر موجود است. اطلاعات مورد نیاز شامل تراز سطح آب و مختصات پیزومترها از آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد و گزارش کنترل ایمنی و پایداری سد شاه‌قاسم در سال ۱۳۹۰ تهیه شد. شکل۱ موقعیت سد و پیزومترهای موجود در بدنه و تکیه‌گاه‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت سد شاه‌قاسم و پیزومترهای موجود در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد

برای میان‌یابی ارتفاع سطح ایستابی آب در این تحقیق از نرم‌افزار surfer 9 استفاده گردید. روش‌های موجود در این نرم‌افزار عبارتند از: روش تواندهی عکس فاصله، روش کریجینگ (Kriging)، روش انحنای کمینه، اصلاح شده شپارد، همسایگی طبیعی، روش رگرسیون چندجمله‌ای، روش مثلث‌بندی با میان‌یابی خطی، روش داده متریک، روش

توابع پایه شعاعی، روش چندجمله‌ای مکانی، روش نزدیک‌ترین همسایه، میانگین متحرک. بعضی از روش‌های موجود در نرم‌افزار به دلایل مختلف از جمله عدم میان‌یابی در نقاط مرزها کنار گذاشته شده‌اند. این روش‌ها عبارتند از روش داده متریک، روش چندجمله‌ای مکانی، روش همسایگی طبیعی و روش مثلث‌بندی با میان‌یابی خطی.

در روش توان‌دهی عکس فاصله با استفاده از وزن داده‌ها عمل میان‌یابی انجام می‌شود که تاثیر نسبی یک نقطه با دور شدن از شبکه کاهش می‌یابد. روش کریجینگ، روش پیش‌گزیده نرم‌افزار و یک روش عمومی و مفید برای اغلب کارها است. روش انحنای کمینه استفاده گسترده‌ای در علوم زمین‌شناسی دارد. میان‌یابی در این روش بسیار شبیه یک صفحه نازک کشسان است. روش اصلاح شده شپارد بر اساس روش کمترین مربعات و حل معادلات محلی استوار است و بسیار شبیه روش توان‌دهی عکس فاصله می‌باشد، با این تفاوت که معادلات حل‌شده به صورت محلی است. روش نزدیکترین همسایه زمانی موثر است که سطح قبلا تراز شده باشد و هدف تولید فایل شبکه باشد. روش رگرسیون چندجمله‌ای، روشی مناسب درباره نقشه‌های بزرگ مقیاس است. روش توابع پایه شعاعی، ترکیبی از روش‌های مختلف که نزدیک‌ترین شکل به زمین را تهیه می‌کند(Golden software).

روش‌های مختلف میان‌یابی بر اساس روش ارزیابی متقابل(Cross-Validation)، بررسی می‌شوند. در این روش، یک نقطه به صورت موقت حذف می‌گردد و با اعمال میان‌یابی مورد نظر، برای آن نقطه مقداری برآورد می‌شود، سپس مقدار حذف شده به جای خود برگردانده می‌شود و این برآورد برای بقیهٔ نقاط به صورت جداگانه صورت می‌گیرد، در پایان، یک جدول با دو ستون به دست می‌آید که نشان‌دهندهٔ مقادیر واقعی و برآورد شده است. با داشتن این دو مقدار می‌توان دقت (MBE) و انحراف (MAE) مدل را برآورد کرد. هر چه دو مقدار یاد شده به صفر نزدیکتر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود. از جمله روش‌های دیگر برای ارزیابی کارآیی شیوه‌های میان‌یابی می‌توان روش ریشهٔ دوم مربع خطا (RMSE) انحراف استاندارد عمومی (RMSS) و ضریب همبستگی بین مقادیر محاسبه‌شده و مشاهده‌ای (R^2) را نام برد. هر چه مقدار RMSE و RMSS کمتر و میزان (R^2) بیشتر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود.

(۲)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]}{n}$$

(۳)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\left\langle Z^*(x_i) - Z(x_i)\right\rangle\right|}{n}$$

(٤)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]^2}{n}}$$

(۵)

$$RMSS = \frac{RMSE}{\overline{Z}(x)}$$

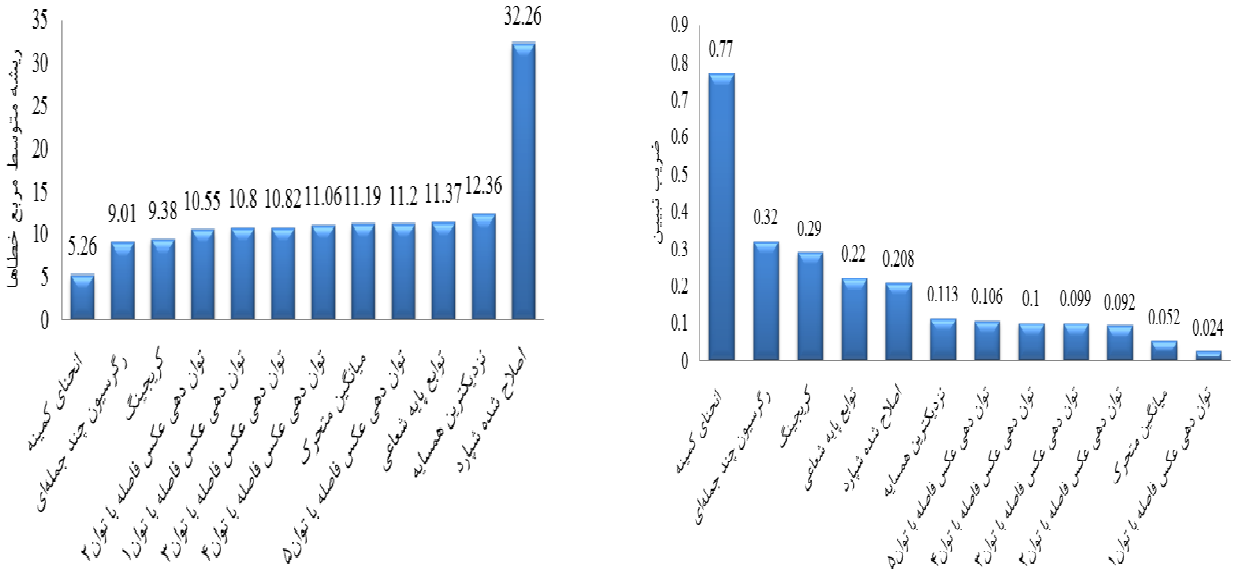
که در آنها: n تعداد نقاط مشاهده‌ای، $Z^*(x_i)$ مقدار برآوردی برای نقطه‌ی iام، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌ای برای نقطه‌ی iام، $\overline{Z}(x)$ میانگین مقادیر برآوردی

۳. نتایج و بحث:

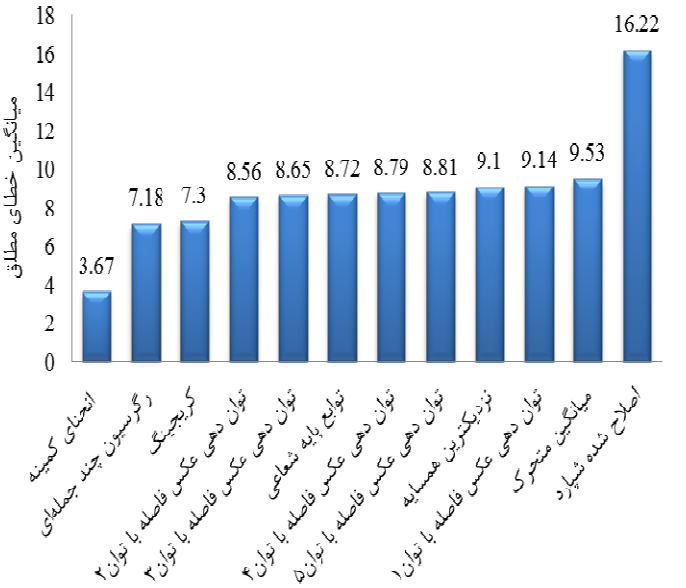
شکل۲، مقادیر R^2 و ریشه متوسط مربع خطاها و شکل۳، میانگین خطای مطلق روش‌های مورد ارزیابی را نشان می‌دهند.

طبق این شکل۲ روش انحنای کمینه بیشترین R^2 را ارائه می‌نماید و روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای، کریجینگ، توابع پایه شعاعی در اولویت بعدی قرار دارند. روش توان‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و روش میانگین متحرک توصیه نمی‌شوند. شکل۲ و۳ نشان می‌دهند که روش انحنای کمینه دارای کمترین RMSE و MAE برای میان‌یابی ارتفاع سطح ایستابی آب در سد شاه‌قاسم می‌باشد(RMSE=5.26

و MAE=3.67). روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای، کریجینگ در اولویت‌های بعدی قرار دارند. با توجه به نتایج بالا، روش انحنای کمینه به عنوان بهترین روش برای میان‌یابی ارتفاع سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد شاه‌قاسم انتخاب گردید. روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای، کریجینگ در اولویت‌های بعدی قرار دارند. روش اصلاح‌شده شپارد دارای بیشترین مقادیر RMSE و MAE است پس استفاده از نتایج روش مذکور اصلا در این تحقیق توصیه نمی‌شود.

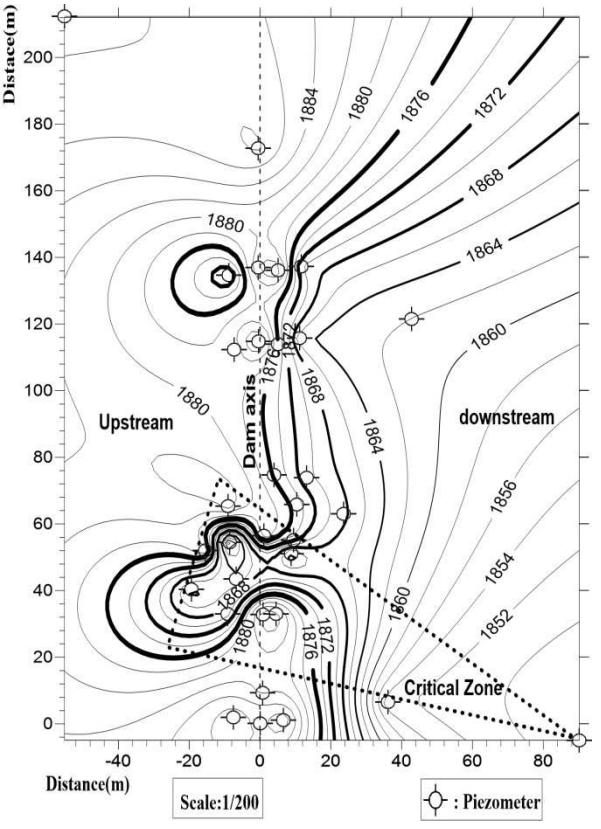


شکل۲. مقادیر محاسبه‌شده ضریب تبیین و ریشه متوسط مربع خطاها برای سد



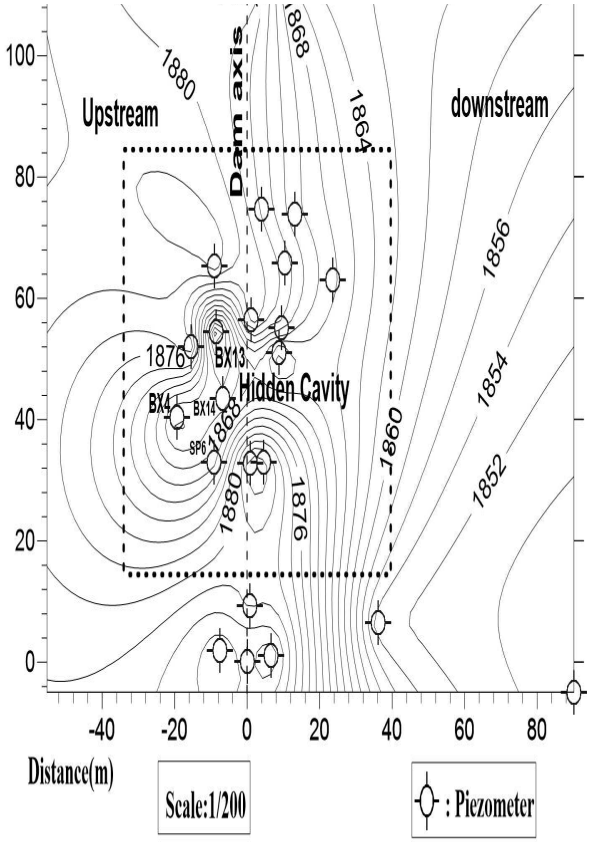
شکل۳. مقادیر محاسبه‌شده میانگین خطای مطلق برای سد

با مشاهده نقشه‌های دو بعدی خطوط هم‌تراز روش‌های منتخب، مشخص گردید که قسمتی از سد عملکرد نامناسبی دارد و این قسمت با مثلث در شکل٤ که نقشه خطوط هم‌تراز حاصل از روش کریجینگ است، مشخص گردیده است. با توجه به این شکل، در این قسمت که در بالادست سد قرار دارد و شامل پیزومترهای BX13، BX14، BX4، SP6 است، تراز ارتفاعی از ١٨٧٦ متری با خط ضخیم شروع شده و پس از آن همزمان با کاهش تراز خطوط نازکتر می‌شوند تا به تراز ١٨٦٤ متری می‌رسد. شکل ظاهری نمایانگر یک حفره زیرسطحی در این قسمت سد می‌باشد که در شکل٥ نشان داده شده است. حفره احتمالی می‌تواند باعث انتقال آب به پایین‌دست و خالی شدن مخزن سد مورد نظر باشد و شاید بتوان خشک شدن بخش زیادی از مخزن سد در گذشته را ناشی از وجود این حفره بیان کرد.

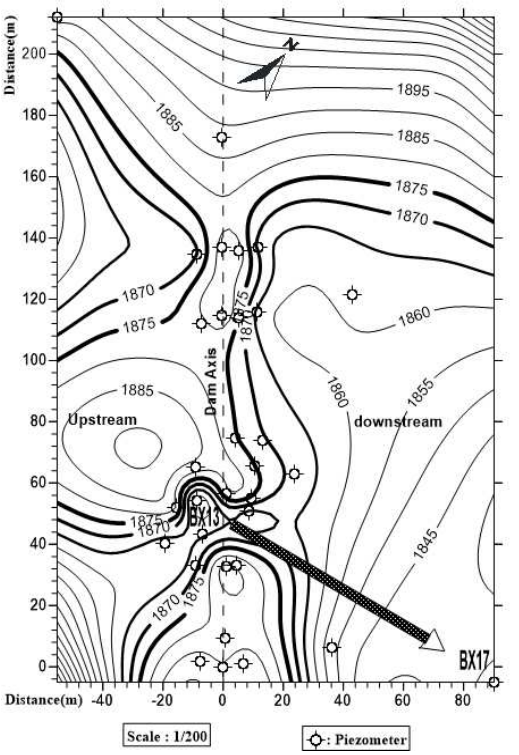


شکل٤. نقشه خطوط هم‌تراز بدست آمده از روش کریجینگ

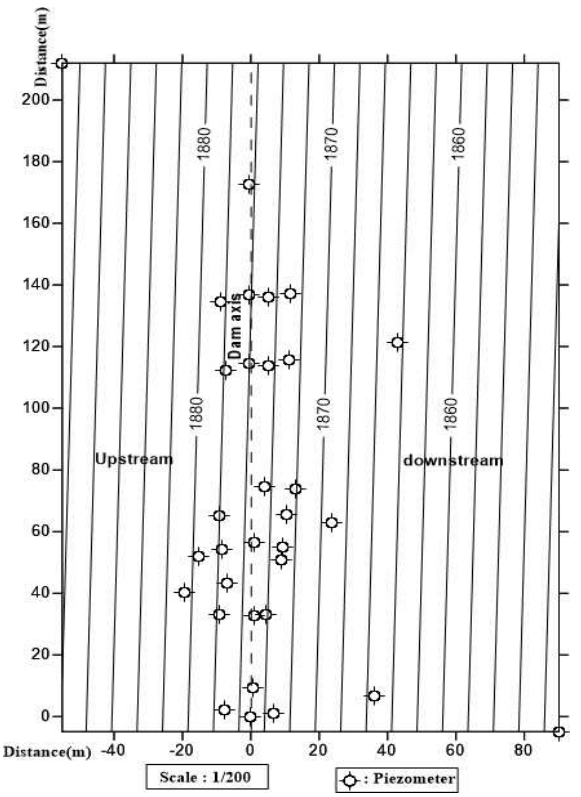
شکل٦ نقشه خطوط هم‌تراز حاصل از روش انحنای کمینه است. این شکل تایید کننده نتایج بدست آمده از روش کریجینگ است و وجود حفره احتمالی در زیر پیزومتر BX13 را نشان می‌دهد و بررسی‌های زمین‌شناسی نیز تأیید کننده این موضوع است و سازند ساختگاه در محل ناحیه بحرانی سازند آسماری می‌باشد و شامل آهک‌های بلورین درشت و ریزدانه می‌باشد. همچنین اشکال مختلف انحلال و کارست در آنها قابل مشاهده است که بدون شک در کاهش قابلیت باربری و افزایش آبگذری موثر بوده است بنابراین این حفره باعث انتقال آب از بالادست سد به سمت پیزومتر BX17 در پایین دست سد می‌شود که با فلش در شکل ٦ نشان داده شده است. با توجه شکل ٧ به روش رگرسیون چند جمله‌ای بیشتر برای نقشه‌های بزرگ کاربرد دارد و در این تحقیق چون منطقه مورد مطالعه ابعاد کوچکی دارد الگوی خاصی را نشان نمی‌دهد.



شکل٥. محل حفره احتمالی در نقشه بدست آمده از روش کریجینگ



شکل٦ . نقشه قسمتی از خطوط هم‌تراز بدست‌آمده از روش انحنای کمینه



شکل۷. نقشه خطوط هم‌تراز بدست آمده از روش رگرسیون چند جمله‌ای

٤. نتیجه‌گیری:

۱- پس از بررسی پارامترهای RMSE، MAE و R^2 روش انحنای کمینه به عنوان بهترین روش برای میان‌یابی ارتفاع سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد شاه‌قاسم انتخاب گردید. روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای، کریجینگ در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

۲- روش اصلاح‌شده شپارد به علت بالا بودن میزان انحراف و ریشهٔ دوم مربع خطا نسبت به روش‌های دیگر برای میانیابی در منطقه موردنظر توصیه نمی‌شود.

۳- بررسی روش‌های مناسب برای میان‌یابی، احتمال وجود یک حفره در نزدیکی تاج سد پیش‌بینی می‌شود. محدوده آن از پیزومترهای بالادست نزدیک به تکیه‌گاه سمت راست می‌گذرد.

٤- حفره احتمالی باعث نشت آب سد مورد نظر به بیرون از مخزن سد می‌شود و به مرور زمان امر باعث خالی شدن مخزن سد و در نتیجه کاهش کارایی سد موردنظر می‌شود که همین مشکل در بهره‌برداری سد گزارش شده است.

۵- در صورتی که اقدامات علاج‌بخشی صورت نگیرد حفره مورد نظر سبب بروز پدیده زیرشوئی(شسته‌شدن ذرات ریزدانه از میان ذرات درشت‌دانه) شده و به مرور زمان پایداری سد را به خطر می‌اندازد.

منابع

ابول‌پور، ب. ۱۳۷۳. روش‌های برآورد تراوش، زیر فشار و زیرشوئی در سازه‌های هیدرولیکی با ارائه مدل کامپیوتری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز.

احمدالی، خ.، نیک‌مهر، س.، و لیاقت، ع. ۱۳۸۷. ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تخمین شوری و اسیدیته عمقی خاک (مطالعه موردی: اراضی منطقه بوکان). مجله پژوهش آب ایران. دانشگاه شهرکرد، ۲(۳)، صفحات ٦٤-٥٥.

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا وزارت نیرو، ۱۳۷۹. تئوری، اصول و بررسی وضعیت موجود کاربرد ردیابی در کشور. نشریه ۱۳۰-ن. معاونت نظارت راهبردی دفتر نظام فنی اجرایی..

حسنی پاک، ع.ا. ۱۳۷۷. ژئواستاتیستیک. انتشارات دانشگاه تهران. تهران.

طباطبائی، س.ح.، و غزالی، م. ۱۳۹۰. ارزیابی دقت روش‌های میان‌یابی در تخمین سطح ایستابی آب‌زیرزمینی(مطالعه موردی: آبخوان‌های فارسان جونقان و سفید دشت). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. سال پانزدهم، شماره پنجاه و هفتم، صفحات ۲۲-۱۱.

کارآموز، م.، حافظ، ب. و کراچیان، ر. ۱۳۸۳. طراحی سیستم پایش کیفی رودخانه به روش زمین آماری کریجینگ. اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، تهران.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد، ۱۳۹۰. گزارش کنترل ایمنی و پایداری سد شاه‌قاسم.

مهرشاهی، د.، و خسروی، ی. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های میانیابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایهٔ مدل ارتفاعی رقومی جهت تعیین توزیع مکانی بارش سالانه(مطالعه موردی: استان اصفهان). مدرس علوم انسانی – برنامه‌ریزی و آمایش فضا دوره چهاردهم. شماره ٤، صفحات ۲۳۳-۲٤۹.

Alsaaran, N. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of groundwater salinity in Tebrak area, central Saudi Arabia. J. King Saudi Univ, 12(2), 49-58.

Golden software. Surfer. User manual. www.goldensoftware.com

Ha, W., Gowda, P.H. ., Oommen, T.H., Marek, T.H., Porter, D.O., Howell, H.T., 2011.Spatial Interpolation of Daily Reference Evapotranspiration in the Texas High Plains. World Environmental and Water Resources Congress.

Hosseini, E., Gallichand, J. and Marcotte, D. 1994. Theoretical and experimental performance of spatial Interpolation methods for soil salinity analysis. J. Transactions of the ASAE., 37(6): 1799-1807.

Kazemi Poshtmasari, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, S. and Sadeghi, S., 2012. Comparison of interpolation methods for estimating pH and EC in agricultural fields of Golestan province(north of Iran). Journal of International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 4(4): 157-167.

Laslett G.M., Mcbratney, A.B., Phal, P.I., Hutchinson, M.F., 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil PH. Journal of Soil Sciences, 38: 325-341.

Mair, A. and Fares, A. 2011. Comparison of Rainfall Interpolation Methods in a Mountainous Region of a Tropical Island. Journal of Hydrologic Engineering, 4:371–383.

Moukana, J.A. and K. Koike. 2008. Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images. Journal of Computer and Geosciences, 34: 1527–1540.

Zhang, R., Shouse, P.J., Yates, S.R.,Kravchenko, A., 1997. Application of geostatistics in soil science. Journal of Trends in soil science. 2: 95-104.

Theodossiou, N., Latinopoulos, P., 2006. Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodolog. Journal of Environmental Modelling and Software. 21(7): 991–1000.