کاربرد زمین آمار در تجزیه و تحلیل سطح ایستابی در محدودهٔ سدهای خاکی (مطالعهٔ موردی: سد شاه‌قاسم)

سعید نورائی‌نژاد*؛ دانشگاه یاسوج، دانشکدهٔ مهندسی، گروه مهندسی عمران
محمد صدقی‌اصل؛ دانشگاه یاسوج، دانشکدهٔ کشاورزی
منصور پرویزی؛ دانشگاه یاسوج، دانشکدهٔ مهندسی، گروه مهندسی عمران
اردشیر شکرالهی؛ دانشگاه یاسوج، دانشکدهٔ علوم پایه، گروه شیمی

تاریخ: دریافت ٩٢/٤/٥ **پذیرش** ٩٣/٩/٩

چکیده

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. هدف این تحقیق، تدقیق سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد خاکی شاه‌قاسم واقع در نزدیکی شهر یاسوج با استفاده از داده‌های ثبت‌شده است. درون‌یابی با روش‌های زمین آماری کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و میانگین متحرک وزنی برای مدل‌های کروی، نمایی و گوسی انجام گرفت. برای مقایسهٔ آماری مدل‌ها از شاخص‌های آماری MBE، MAE، RMSE و GSD استفاده شد. نتایج نشان داد که روش کریجینگ ساده با مدل گوسی بهترین روش درون‌یابی سطح ایستابی آب سد خاکی شاه‌قاسم است. روش‌های کریجینگ معمولی با مدل گوسی و کریجینگ معمولی با مدل کروی در اولویت‌های بعدی قرار دارند. روش میانگین متحرک وزنی با توان‌های مختلف دارای خطای بیش‌تری نسبت به‌روش‌های کریجینگ است. با بررسی نقشه‌ها، احتمال وجود یک حفره در این قسمت از سد دور از انتظار نیست. وجود حفره احتمالی سبب می‌شود که به مرور زمان آب مخزن سد تخلیه شده و سرانجام ممکن است باعث بروز پدیده زیرشویی شود که در مجموع برای پایداری سد خطرناک است.

واژه‌های کلیدی : سدخاکی، سطح ایستابی، کریجینگ، میان‌یابی

* **نویسنده مسئول** snoraie@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

مقدمه

سدها از جمله سازه‌هایی هستند که به‌منظور ذخیرهٔ آب و از ابزارهای لازم برای نیل به توسعهٔ پایدار صنعتی، کشاورزی و گردشگری هستند با توجه به این‌که یکی از راه‌های اتلاف آب و به خطر افتادن ایمنی و پایداری سد، نشت از بدنه و تکیه‌گاه‌های این سازه‌ها است، بحث کنترل نشت همواره از دغدغه‌های مهندسان سدساز بوده است. در پروژه‌های ساخت سدهای خاکی نیز به‌دلیل اهمیت سازه، کنترل ایمنی و پایداری آن‌ها ضرورت بیش‌تری می‌یابد. برای دست‌یابی به این مهم، نصب ابزار دقیق و قرائت آن‌ها از روش‌های کاربردی و مرسوم در صنعت سدسازی به‌شمار می‌رود. از مهم‌ترین ابزارهای دقیق پیزومترها هستند.

در بررسی‌های آمار کلاسیک، نمونه‌های به‌دست آمده از جامعه، عمدتاً به‌صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و مقدار اندازه‌گیری شدهٔ کمیت معین در نمونه‌ای خاص، هیچ‌گونه اطلاعاتی دربارهٔ مقدار همان کمیت در نمونهٔ دیگر و به‌فاصلهٔ معلوم نخواهد داشت. در صورتی که در زمین‌آمار می‌توان مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه‌ها و فاصله نمونه‌ها و جهت قرار گرفتن آن‌ها نسبت به‌هم ارتباط برقرار کرد. هم‌چنین در آمار کلاسیک، فرض می‌شود که تغییرپذیری یک متغیر تصادفی است، درصورتی که در زمین‌آمار، بخشی از آن تصادفی و بخش دیگر آن دارای ساختار و تابع فاصله و جهت است. هرمتغیری که در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشد و وابستگی مکانی داشته باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده شده و در بررسی‌های زمین‌آماری می‌توان در مورد آن بحث و بررسی کرد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه قطعی و تصادفی تجزیه کرد، بنا بر این می‌توان نوشت (مهدیان، ۱۳۸۳):

$$Z(x) = m(x) + L(x) \qquad (۱)$$

که در آن $Z(x)$: متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای به مختصات (x)

$m(x)$: مؤلفهٔ قطعی متغیر ناحیه‌ای $L(x)$: مؤلفهٔ تصادفی متغیر ناحیه‌ای

در صورتی‌که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد، تحلیل‌های بسیاری روی آن می‌توان به‌عمل آورد که از جملهٔ آن‌ها می‌توان به برآورد متغیر موردنظر در نقاط فاقد آمار، طراحی نمونه‌برداری و توزیع واریانس خطا اشاره کرد. تخمین زمین‌آماری شامل دو مرحله

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

است: در مرحلهٔ اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که با آنالیز واریوگرام قابل بررسی است. ضمناً توزیع داده‌ها نیز باید به توزیع نرمال نزدیک باشد(مهدیان، ۱۳۸۳).

فرایند میان‌یابی به‌دلیل محدودیت داده‌های نقطه‌ای و ضرورت تدوین نقشه از کل یک پهنه، به‌منظور تهیهٔ نقشه‌های هم‌ارزش انجام می‌گیرد. بنا بر این میان‌یابی به معنای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های پهنه‌ای است (طباطبایی و غزالی، ۱۳۹۰). روش‌های میان‌یابی در دهه ۱۹۶۰ ابداع شدند و کاربرد آن‌ها دراستخراج معادن و سپس در علوم دیگر گسترش یافت. در علوم و مهندسی‌آب نیز کابردهای فراوانی از روش‌های میان‌یابی در برآورد چگونگی توزیع بارندگی و تخمین پارامترهای ژئوهیدرولوژی مانند مقدار رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، اسیدیته و تعیین سطح ایستابی به‌چشم می‌خورد (شمسایی و همکاران، ۱۳۹۰). روش‌های میان‌یابی بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را ارائه اغلب مهندسان و کارشناسان یک روش را به‌طورتصادفی انتخاب کرده و برآورد موردنظر را انجام می‌دهند که دقت تخمین آن جای تأمل دارد (مهدوی و همکاران، ۱۳۸۳). در تعیین ارزش یک نقطه تمامی نقاط مجاور و معلوم به‌طور یک‌سان و هم‌سان مؤثر نیستند. بدین‌دلیل هر یک از نقاط مزبور به‌تناسب تأثیرشان بر ارزش نقطه مجهول، حامل وزنی خواهد بود که روش تعیین وزن موجب تکوین روش‌های مختلفی در میان‌یابی شده است (عساکره، ۱۳۸۷).

میان‌یابی را به چند روش می‌توان انجام داد. در ابتدا می‌توان آن‌ها را به دو گروه همگانی(منطقه‌ای) و محلی طبقه‌بندی کرد. میان‌یابی همگانی تمامی نقاط معلوم را برای برآورد ارزش نقطه یا نقاط نامعلوم به‌کار می‌گیرد. در روش محلی برای برآورد هر نقطهٔ نامعلوم تنها نمونه‌هایی از نقاط معلوم به‌کار می‌رود. در طبقه‌بندی دیگر، دقت روش ملاک طبقه‌بندی است. در روش رسا مقادیر برآورد شده به مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) نزدیک‌تر است در حالی‌که 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 مقادیر تخمینی فاقد خطا ولی در روش احتمالی برآورد حاوی خطا است (طباطبایی و غزالی، ۱۳۹۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

نخستین تجربه‌ها برای به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماری به مفهوم امروزی آن در محاسبات تخمین ذخیره از حدود ۷۰ سال پیش با شناسایی مقدماتی الگوهای توزیع طلا در معادن آفریقای جنوبی شروع شد. ماترون و کریگ[1] پیشگامان تئوری‌های زمین‌آماری بودند. واترمایر در سال ۱۹۱۹ اولین مقاله در این زمینه را منتشر کرد که در آن لزوم به‌کارگیری میانگین وزنی به‌جای میانگین حسابی بیان شده بود (مهدیان، ۱۳۸۳). بن جما و مارینو (۱۹۹٤) نتایج حاصل از تخمین سطح ایستابی به‌روش زمین‌آمار برای بهینه کردن شبکه پایش در کشور مراکش انجام دادند، نتایج حاصل برتری روش‌های زمین‌آماری بر روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک را نشان داد. الساران (۲۰۰۰) روش کریجینگ را بهترین روش برای میان‌یابی شوری آب زیرزمینی منطقهٔ تبارک در مرکز عربستان سعودی بیان کرد. مک‌کنا (۲۰۰۲) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مبتنی بر استخراج واریوگرام برای زیاد کردن دقت در تخمین و شبیه‌سازی داده‌های مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در ایالت کلرادوی آمریکا استفاده کرد. نتایج این آزمایش حاکی از این است که استفاده از روش‌های زمین‌آمار، نه تنها باعث زیاد شدن دقت تخمین داده‌ها، بلکه باعث کم‌تر شدن تعداد نمونه‌برداری می‌شود. تئودوسیو و لاتینوپولوس (۲۰۰٦) روش کریجینگ را برای میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در حوضه آنته مونتاس در شمال یونان انتخاب کردند. موکانا و کویک (۲۰۰۸) برای تخمین درجهٔ کاهش تراز آب زیرزمینی دشت کوماموتو در شمال غرب ژاپن، از مدل ژئواستاتیستیک پراش‌نگار و کریجینگ معمولی به همراه آنالیز عکس‌های ماهواره‌ای استفاده کردند. یانگ و همکاران (۲۰۰۸) برای طراحی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی از روش کریجینگ معمولی استفاده کردند. یوسان و همکاران (۲۰۰۹) برای پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی عمق آب زیرزمینی در کویر مین‌کین در شمال چین از سه روش میان‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله، توابع پایه شعاعی و کریجینگ استفاده کردند. مقایسهٔ مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر میان‌یابی‌شده نشان داد که روش کریجینگ معمولی به‌عنوان روش بهینه برای میان‌یابی عمق آب زیرزمینی است.

حسینی و همکاران (۱۹۹۳) برای برآورد هدایت هیدرولیکی خاک از روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ عمومی، میانگین متحرک وزنی با درجه‌های ۱ تا ٤ و روش مثلثی را به‌کار

1. Watermeyer

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

بردند. در ایران نیز از این روش‌ها در موارد مختلف استفاده شده است. غفوریان و تلوری (۱۳۸۵) برای ترسیم نقشه‌های هم‌باران رگبارها برای تهیه منحنی‌های عمق، سطح و تداوم استان خراسان روش‌های مختلف میان‌یابی را آزمایش کردند. ادب و همکاران (۱۳۸۷) برای تهیهٔ نقشه هم‌بارش سالانه در استان خراسان رضوی به ارزیابی روش‌های میان‌یابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایهٔ نقشه رقومی ارتفاع (DEM) پرداختند. امیدوار و خسروی (۱۳۸۸)، به مقایسهٔ روش کریجینگ با مدل‌های دایره‌ای، نمایی، گوسی، چهار وجهی منتظم و کروی در تعیین مدلی بهینه برای پایش شاخص بارندگی استاندارد در محیط GIS پرداختند.

مواد و روش‌ها

سد خاکی شاه‌قاسم در اواسط دههٔ هفتاد شمسی در استان کهگیلویه و بویراحمد روی چشمه‌های شاه‌قاسم در حدود ۱۵کیلومتری جنوب شهر یاسوج با هستهٔ رسی به‌ارتفاع ٤٧/٢ متر از پی، عمق پی ۲۰ متر، طول تاج۲۲۰ متر، عرض تاج ۸ متر و ارتفاع تاج ۱۸۹٦ متر از سطح دریا به بهره‌برداری رسیده است. اطلاعات موردنیاز شامل تراز سطح آب و مختصات پیزومترها از آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد تهیه شد. شکل۱ جاده دسترسی به سد شاه‌قاسم و شکل۲ موقعیت پیزومترهای موجود در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد را نشان می‌دهد.

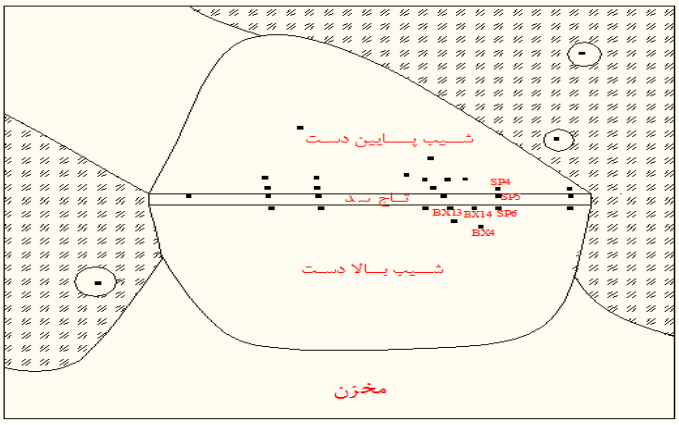
با نظر کمیته تحقیق تصمیم گرفته شد تا در طی ۱۰۵ روز ارتفاع سطح ایستابی در پیزومترهای موجود در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد در طی چند مرحله اندازه‌گیری شد. پیزومترهای استفاده شده در سد شاه‌قاسم ٤٨ عدد پیزومتر لوله شاغولی هستند. این پیزومترها با دوام، دارای نصب بسیار قابل اطمینان و ارزان قیمت هستند، که البته برای آن‌که بتوانند تغییرات در فشار آب منفذی را گزارش کنند نیاز به‌عبور دادن مقدار وسیعی آب دارند. تعدادی از این پیزومترها مسدود شده‌اند. در شکل ۳ تصویر کلی یک پیزومتر نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری سطح ایستابی از دستگاه عمق‌یاب که تصویر آن در شکل٤ آورده شده، استفاده شد. در ابتدا اندازه‌گیری سطح ایستابی به‌صورت هفتگی انجام گرفت و در تیرماه در طی ٤ مرحله سطح ایستابی اندازه‌گیری شد و سپس با نظر کمیته تحقیق برداشت‌ها به‌صورت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]



شکل۱. موقعیت سد شاه‌قاسم نسبت به محور یاسوج-شیراز



شکل۲. آرایش مکانی پیزومترها بر روی سد شاه‌قاسم



شکل۳. تصویر کلی یک پیزومتر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

ماهانه انجام گرفت. اولین اندازه‌گیری در تاریخ ۱۳۹۱/۰٤/۰٤ زمانی که سطح ایستابی آب دریاچه سد ۱۸۹۱/۹۰ متر بود، انجام گرفت. لازم به ذکر است در طی ۱۰۵ روز بارندگی و بارشی انجام نگرفت. جدول۱ زمان برداشت و سطح ایستابی دریاچه سد در زمان اندازه‌گیری نشان می‌دهد



شکل٤. دستگاه سوند برای اندازه‌گیری سطح ایستابی آب پیزومترها

جدول۱. شماره و تاریخ برداشت اندازه‌گیری سطح ایستابی آب پیزومترها

شماره برداشت	تاریخ برداشت	تراز دریاچه(متر)
۱	۱۳۹۱/۰٤/۰٤	۱۸۹۱/۹۰
۲	۱۳۹۱/۰٤/۱۱	۱۸۹۱/۱۰
۳	۱۳۹۱/۰٤/۱۸	۱۸۹۰/۰۸
٤	۱۳۹۱/۰٤/۲۵	۱۸۸۹/۳۹
۵	۱۳۹۱/۰۵/۱۵	۱۸۸۷/۲۷
٦	۱۳۹۱/۰٦/۸	۱۸۸۲/۹۵
۷	۱۳۹۱/۰۷/۱۵	۱۸۸۰/۷

برای تجزیه و تحلیل زمین‌آماری در این تحقیق از نرم‌افزار +GS نسخه ۹ و سه روش میانگین متحرک وزنی،کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، با مدل‌های کروی، نمایی و گوسی استفاده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

شد. با اعمال هر کدام از مدل‌های بالا درون‌یابی برای منطقهٔ موردنظر صورت گرفت. برای انتخاب روش مناسب درون‌یابی از روش اعتبارسنجی مجدد[1] استفاده شده است.

روش‌های درون‌یابی

روش‌های مختلفی برای برآورد متغیرهایی که تغییرات مکانی دارند، وجود دارد. تفاوت عمدهٔ این روش‌ها مربوط به نحوهٔ محاسبهٔ فاکتور وزنی است که به نقاط مشاهده شدهٔ اطراف نقطهٔ مورد تخمین داده می‌شود. در این مقاله دو روش که کاربرد زیادی در بررسی‌های آب و خاک دارند، معرفی شده است (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

۱. روش عکس فاصله

روش میانگین متحرک وزنی[2] (WMA) روشی ساده برای تخمین یا درون‌یابی داده است. در این روش، برای برآورد متغیر در یک نقطه فاقد آمار، به داده‌های معلوم اطراف، وزن‌های مختلفی که متناسب با عکس فاصلهٔ آن‌ها تا محل نقطه مجهول است، داده می‌شود. معادلهٔ (۳) چگونگی برآورد متغیر مجهول را نشان می‌دهد:

$$Z^{*}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{z_i}{d_i^{a}}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^{a}}} \qquad (۳)$$

که در آن Z^{*}: مقدار برآورد شده، Z_i: مقدار متغیر مشاهده شده در اطراف نقطهٔ موردنظر،

d_i: فاصلهٔ بین نقطهٔ مشاهده شده تا نقطهٔ مورد تخمین،

a: عدد صحیحی که معمولاً بین ۱ تا ۵ تغییر می‌کند،

n: تعداد نقاط مشاهده شده

در این روش، به نقاط نزدیک‌تر، وزن بیش‌تری داده می‌شود. در واقع هرچه مقدار a مشاهده شده به نقطهٔ مورد تخمین نزدیک‌تر باشد، نقش بیش‌تری در برآورد ایفا می‌کند.

1. Cross-Validation 2. Weighted Moving Average

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

هم‌چنین توان در دقت برآورد مؤثر است، بدین‌ترتیب که توان‌های بزرگ‌تر وزن بیش‌تری به نقاط نزدیک‌تر اختصاص می‌دهد و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به‌طور یک‌نواخت‌تری بین نقاط مجاور تقسیم می‌کنند.

۲. روش کریجینگ[1]

روش کریگینگ نیز همانند روش میانگین متحرک وزنی، برای برآورد نقطهٔ ناشناخته، به هر یک از نمونه‌های اندازه‌گیری شده وزنی را نسبت می‌دهد. کریجینگ یک تخمین‌گر خطی بدین‌شکل است:

$$Z^* = \sum_{i=1}^{n} \omega_i . Z(x_i) \qquad (٤)$$

که در آن $Z(x_i)$: مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطهٔ x_i،

ω_i: وزن آماری که به نمونهٔ x_i نسبت داده می‌شود و بیان‌گر اهمیت نقطهٔ i ام در برآورد است.

انواع کریجینگ بر اساس ساختار فضایی داده‌ها عبارتند از: الف) روش‌های خطی شامل کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ عام، کریجینگ‌توأم، ب) روش‌های غیرخطی شامل کریجینگ لگاریتمی، کریجینگ انفصالی، کریجینگ شاخص.

کریجینگ معمولی[2]: این روش معمول‌ترین روش کریجینگ است که در نرم‌افزارهای بزرگ هم معمولاً از آن استفاده می‌شود. فرض در این روش این است که میانگین متغیر ناحیه‌ای در فضای تخمین مقداری نامعلوم است (حسنی پاک،۱۳۷۷).

کریجینگ ساده[3]: اگر میانگین کمیت بررسی شده در فضای تخمین معلوم باشد، از این روش استفاده می‌شود. در این روش اختلافات بین مجموع وزن‌های کریجینگ با واحد برابر با وزن متناظر میانگین کمیت در کل محدوده است. این میانگین متکی بر تابع کوواریانس است.

روش صحت‌سنجی

در روش اعتبارسنجی مجدد، در هر مرحله یک نقطهٔ مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از سایر نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌گردد. این کار برای همهٔ نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود،

1. Kriging 2. Ordinary Kriging 3. Simple Kriging

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

به‌گونه‌ای که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت و در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان خطا و انحراف روش استفاده شده را برآورد کرد.

معیارهای گوناگونی برای این کار وجود دارند که می‌توان به میانگین خطای اریب یا انحراف (MBE[1])، میانگین خطای مطلق (MAE[2])، ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا (RMSE[3]) و انحراف استاندارد عمومی (GSD[4]) اشاره کرد. معادلات محاسبه MBE،MAE، RMSE و GSD در زیر نشان داده شده است.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[z^{*}(x_i) - z(x_i)\right]}{n} \quad (۵)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\left[z^{*}(x_i) - z(x_i)\right]\right|}{n} \quad (٦)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[z^{*}(x_i) - z(x_i)\right]^{2}}{n}} \quad (۷)$$

$$GSD = \frac{RMSE}{\overline{Z}(X)} \quad (۸)$$

که در آن‌ها

n: تعداد نقاط مشاهده‌ای، $Z^{*}(x_i)$: مقداربرآوردی برای نقطه‌ی iام

$Z(x_i)$: مقدار مشاهده‌ای برای نقطه ی iام $\overline{Z}(x_i)$: میانگین مقادیر برآوردی.

MBE نشان می‌دهد که اولاً آیا مدل مقدار متغیر موردنظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند؟ و ثانیاً مقدار آن در چه حدی است؟ در شرایطی که MBE برابر صفر شود، نشان‌گر این است که مدل فضای بررسی شده را خوب و بدون هیچ انحرافی برآورد می‌کند. مقدار صفر برای MAE، نشان‌دهندهٔ دقت صد در صد مدل است.

1. Mean Bias Error 2. Mean Absolute Error
3. Root Mean Squared Error 4. General Standard Deviation

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

نتایج

پس از بررسی ورایوگرام در دو جهت شمال- جنوب و شرق- غرب مشاهده شد که دامنهٔ تاثیر در دو جهت موردنظر متفاوت و ناهم‌سان‌گردی از نوع هندسی است. به‌دلیل فاصلهٔ کم پیزومترهای موجود از بلوک‌های ۲×۲ در روش‌ها کریجینگ استفاده شد. پس از بررسی صحت‌سنجی طبق جدول ۲ نتایج بدین‌شرح است:

جدول۲. نتایج محاسبات حاصل از صحت‌سنجی روش‌های مختلف زمین‌آماری

روش	واریوگرام	MBE	MAE	RMSE	GSD
کریجینگ ساده (SK)	گوسی	۰/۳۲۸	۷/٤۸۲	۹/٤۳۵	۰/۰۰۵۰۳
کریجینگ ساده (SK)	کروی	۰/۸۷۷	۷/۹۳۷	۹/٤۸۷	۰/۰۰۵۰۵
کریجینگ ساده (SK)	نمایی	۰/۹۷٤	۸/۰۲۷	۹/٦۹۱	۰/۰۰۵۱٦
کریجینگ معمولی (OK)	گوسی	۰/۱۰۰	۷/۷۰۵	۹/۵۸۹	۰/۰۰۵۱۱
کریجینگ معمولی (OK)	کروی	۰/۸٦۰	۷/۹۱٤	۹/٤۵۷	۰/۰۰۵۰٤
کریجینگ معمولی (OK)	نمایی	۰/۹۱٤	۷/۹۳۷	۹/۵۵۵	۰/۰۰۵۰۹
WMA با توان (۱)	نوع واریوگرام فرقی ندارد	۰/۷۲۷	۹/۰۳۱	۱۰/٦٤٦	۰/۰۰۵٦۷
WMA با توان (۲)	نوع واریوگرام فرقی ندارد	۱/٦۱٤	۸/۵٤٦	۱۰/۵۱٦	۰/۰۰۵٦۰
WMA با توان (۳)	نوع واریوگرام فرقی ندارد	۲/۰۳۰	۸/٦۳۰	۱۰/۷۸۵	۰/۰۰۵۷٤
WMA با توان (٤)	نوع واریوگرام فرقی ندارد	۲/۱۱۳	۸/۷٦۳	۱۱/۰۳۱	۰/۰۰۵۸۷
WMA با توان (۵)	نوع واریوگرام فرقی ندارد	۲/۰۸۹	۸/۷۹۰	۱۱/۱۸۲	۰/۰۰۵۹۵

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده روش کریجینگ ساده با مدل گوسی به‌عنوان بهترین روش برای درون‌یابی سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد خاکی شاه‌قاسم تعیین شد. روش کریجینگ معمولی با مدل گوسی نسبت به‌روش کریجینگ معمولی با مدل کروی، پس از روش کریجینگ ساده با مدل گوسی ارجحیت بیش‌تری برای درون‌یابی سطح ایستابی آب در سد موردنظر را دارد زیرا روش کریجینگ معمولی با مدل گوسی دارای میانگین خطای اریب یا انحراف(MBE) و میانگین خطای مطلق(MAE) کم‌تری نسبت به‌روش کریجینگ معمولی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

با مدل کروی است. البته ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا(RMSE) در روش کریجینگ معمولی با مدل کروی کم‌تر است.

طبق اصول فیزیکی، آب همواره از تراز کل بیش‌تر به‌سمت تراز کل کم‌تر حرکت می‌کند. با توجه به این مطلب مفهوم گرادیان هیدرولیکی یا شیب هیدرولیکی بدین‌صورت مطرح می‌شود:

$$i = \frac{h_2 - h_1}{l} \quad (۹)$$

که در آن

h_1: ارتفاع نظیر فشار بالادست h_2: ارتفاع نظیر فشار پایین‌دست

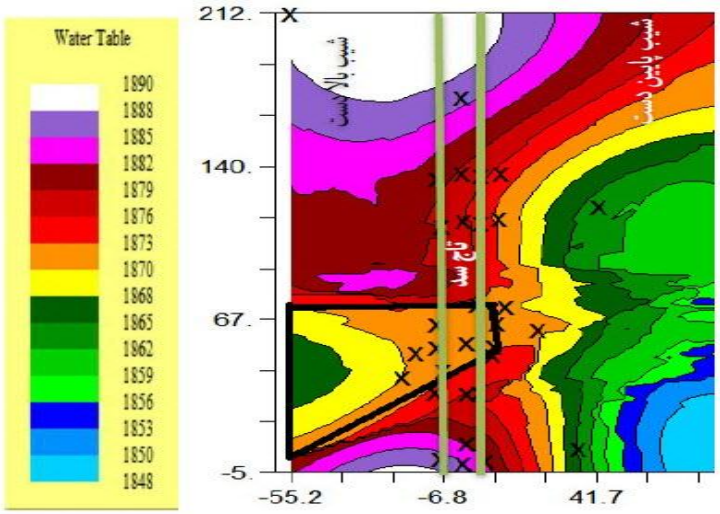
l: فاصله بین نقطه ۱ و ۲ است.

در سد مذکور در قسمت بالادست، سد تراز کل بزرگ‌تر دارد و اگر آبی در پایین‌دست یا در بدنهٔ سد باشد باید تراز کل کم‌تری نسبت به بالادست سد داشته باشد از این رو، سطح ایستابی آب در پیزومترهای بالادست سد از سطح ایستابی آب در پیزومترهای پایین‌دست بزرگ‌تر است. پس از بررسی نقشه‌های حاصل از روش‌های برگزیده نرم‌افزار GS^+، مشاهده شد که قسمتی از سد، از اصول مزبور پیروی نمی‌کند. در این قسمت از سد سطح ایستابی آب در پیزومترهای پایین‌دست از سطح ایستابی آب در پیزومترهای بالادست بیش‌تر است، پس طبق گرادیان هیدرولیکی آب باید از پایین دست به‌سمت بالادست سد حرکت کند. این قسمت در شکل ۵ با یک ذوزنقه با اضلاع سیاه‌رنگ نشان داده شده است.

از آن‌جا که ترازهای پیزومتریک به‌وسیلهٔ نگارندگان برداشت شد در هنگام اندازه‌گیری سطح ایستابی آب پیزومترها با دستگاه سوند این موضوع مشاهده شد. هنگام برداشت، بعضی از پیزومترهای بالادست رفتار جالبی از خود نشان می‌دادند. با وجود این‌که این پیزومترها در نزدیکی سطح ایستابی آب دریاچه سد قرار دارند، ولی سطح ایستابی آب در آن‌ها به‌طور میانگین ۳۲ متر پایین‌تر از سطح ایستابی آب دریاچه است. در شکل ٦ محل یکی از این پیزومترها (پیزومتر Bx4) و در جدول ۳ زیرسطح ایستابی آب در پیزومترها نسبت به دریا مشخص شده است. سطح ایستابی آب دریاچه سد ۱۸۸۹/۳۹ متر است. به‌طور مثال پیزومترهای SP4 و SP5 و SP6 تقریباً در یک راستا قرار دارند که در نقشهٔ شکل ۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

مشخص شده‌اند، اما سطح ایستابی پیزومتر بالادست از پیزومتر تاج و پیزومتر پایین دست کم‌تر است. شکل۷ زیر بیان‌گر این رفتار است.



شکل۵. نقشهٔ دو بعدی هم‌تراز پیزومتریک در بدنه سد

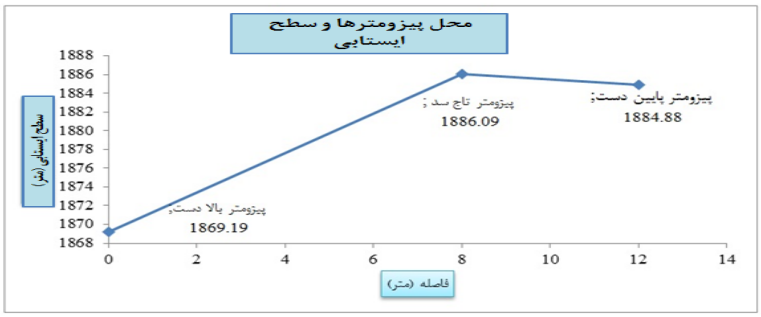
جدول۳. سطح ایستابی آب در پیزومترها نسبت به دریا

نام پیزومتر	رقوم سطح پیزومتر (متر)	سطح ایستابی آب نسبت به دریا (متر)
Sp6	۱۸۹۶/۲٤	۱۸٦۹/۱۹
Bx4	۱۸۹۳/٦۹	۱۸٦۳/۰۲
Bx14	۱۸۹٦/۳۰	۱۸٦٤/۲۰
Bx13	۱۸۹۳/۲۹	۱۸۵۵/۹۲



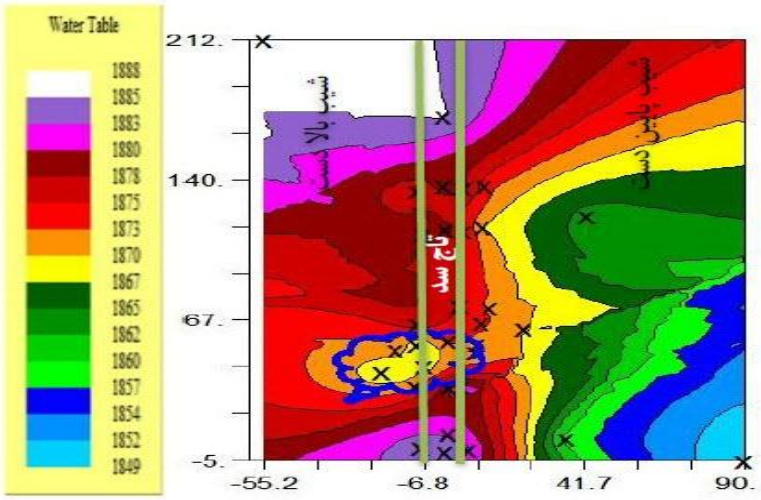
شکل٦. فاصله پیزومتر Bx4 از سطح آب دریاچه سد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]



شکل۷. رفتار نامتعارف مشاهده‌های پیزومتریک در بخشی از سد

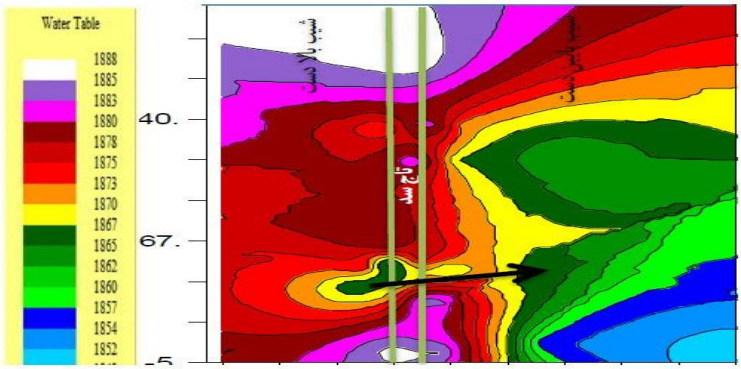
پس از بررسی نقشه‌های روش کریجینگ ساده با مدل گوسی و کریجینگ معمولی با مدل گوسی و مدل کروی احتمال وجود یک حفره در سد موردنظر در محدوده‌ای که در شکل ۸ (حاصل از روش کریجینگ معمولی با مدل کروی) با ابر آبی‌رنگ مشخص شده است، قابل پیش‌بینی است.



شکل۸. محل حفره احتمالی در قسمت بالادست نزدیک تکیه‌گاه سمت راست سد

برداشت ما از این نتایج این است که نشت غیرمجاز سد شاه قاسم که حتی در بعضی از سال‌ها باعث خشک شدن سد موردنظر شده است از این قسمت از سد عبور می‌کند. یعنی با توجه به شکل ۹ این حفره باعث انتقال آب از بالادست به پایین‌دست سد موردنظر می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]



شکل۹. مسیر احتمالی نشت از بدنه سد که در نزدیکی تکیه‌گاه سمت راست سد است

نتیجه‌گیری

پس از بررسی پارامترهایMBE، MAE، RMSE و GSD روش کریجینگ ساده با مدل گوسی به‌عنوان بهترین روش برای درون‌یابی سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد خاکی شاه‌قاسم انتخاب شد. روش کریجینگ معمولی با مدل‌های گوسی و کروی در اولویت بعدی قرار دارند. روش میانگین متحرک وزنی با توان‌های ۱ الی ۵ اصلاً برای درون‌یابی سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد موردنظر توصیه نمی‌شود زیرا مقادیر MBE، MAE، RMSE و GSD در این روش نسبت به مقادیر متناظر در روش‌های کریجینگ ساده و معمولی با مدل‌های گوسی و کروی و نمایی خیلی بزرگ‌تر هستند. پس از بررسی نقشه‌های به‌دست آمده از روش‌های منتخب، مشخص شد که قسمتی از شیب بالادست سد دارای سطح ایستابی آب پایین‌تری نسبت به تاج و شیب پایین‌دست سد است. داده‌های سطح ایستابی آب برداشت‌شده از پیزومترهای ناحیه شامل SP6، BX4، BX14 و BX13 تصدیق‌کنندهٔ این موضوع است. بنا بر این با بررسی بیش‌تر نقشه‌ها، احتمال وجود یک حفره در این قسمت از سد دور از انتظار نیست. وجود حفره احتمالی باعث انتقال آب در طی مسیر احتمالی که در شکل ۸ مشخص شده است، از بالادست به پایین‌دست سد می‌شود و به مرور زمان آب مخزن سد تخلیه می‌شود و کارایی سد کم می‌شود. خاطر نشان می‌شود که کاهش آب مخزن سد در سال‌های گذشته تأییدکنندهٔ این امر است. وجود حفرهٔ احتمالی سبب بروز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

پدیدهٔ زیرشویی یا شسته شدن ذرات ریزدانه از میان ذرات درشت‌دانه می‌شود و با گذشت زمان این پدیده پایداری سد را به خطر می‌اندازد.

به‌نظر می‌رسد بهترین روش برای تعیین الگوی نشت و مشخص‌کردن حفره احتمالی روش ردیابی مواد رنگی است که پیشنهاد می‌شود از این آزمایش استفاده شود.

منابع

۱. مهدیان م.ح.، *کاربرد زمین آمار در زهکشی*، سومین کارگاه فنی زهکشی (۱۳۸۳).

۲. س.ح، غزالی م، *ارزیابی دقت روش‌های میان‌یابی در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های فارسان جونقان و سفید دشت*، علوم آب و خاک(مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال پانزدهم، شماره۵۷ (۱۳۹۰)۱۱-۲۲.

۳. شمسایی ا.، ثقفیان ب.، دهقانی و.، *ارزیابی روش های زمین‌آمار در برآورد توزیع مکانی بارندگی توفان‌های بزرگ حوضه آبریز سد دز*، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد (۱۳۸٦).

۴. مهدوی م.، حسینی چگینی ا.، مهدیان م.، رحیمی بندرآبادی س.، *مقایسه روش‌های زمین آمار در برآورد توزیع مکانی بارش سالانه در مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرقی ایران*، مجله منابع طبیعی ایران، شماره۵۷، (۱۳۸۳)۱-۱۷.

۵. عساکره.ح.، *کاربرد روش کریجینگ در میان‌یابی بارش (مطالعه موردی: میان‌یابی بارش ۷٦/۱۲/۲٦ در ایران زمین*، مجلهٔ جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۱۲، (۱۳۸۷)۲۵-٤۲.

۶. غفوریان ر.، تلوری ع.، *تعیین روابط عمق، مساحت و تداوم بارش در استان خراسان*، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان(۱۳۸۵).

۷. ادب ح.، فلاح قالهری غ.، میرزابیاتی ر.، *ارزیابی روش‌های میان‌یابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایه DEM در تهیهٔ نقشهٔ هم‌بارش سالانه در استان خراسان رضوی*، همایش ژئوماتیک تهران (۱۳۸۷).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

۸. امیدوار ک.، خسروی ی.، *ارزیابی روش کریجینگ در تعیین مدلی بهینه جهت پایش شاخص بارندگی استاندارد در محیط GIS (مطالعه موردی: استان یزد*، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راه‌کارهای مدیریت آن، اصفهان (۱۳۸۸).

۹. حسنی پاک ع.ا.، *ژئواستاتیستیک*، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۷).

10. Alsaaran N., "Optimal interpolation and isarithmic mapping of groundwater salinity in Tebrak area, central Saudi Arabia", King Saudi Univ, J. 12 (2) (2000) 49-58.

11. Ben-Jemaa F., Marino M.A., Loaiciga H.A., "Multivariate geostatistical design of ground-water monitoring networks", J. Water Res. Pl, 120 (4) (1994) 505-522.

12. Hosseini E., Gallichand J., Caron J., "Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in South West Iran", Transactions of the ASAE, 36(6) (1993) 1687-1693.

13. McKenna S.A., "Simulating geological uncertainty with imprecise data for groundwater flow and advective transport modeling", Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines Golden, Colorado, U.S.A. (2002) 1-15.

14. Moukana J.A., Koike K., "Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images", Comp. and Geosci, J., 34(2008) 1527-1540.

15. Theodossiou N., Latinopoulos P., "Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodology", Environ Model and Software, J., 21(7) (2006) 991-1000.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]

16. Yang F.G., Cao S.Y., Liu X.N., Yang K.J., "Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging", J. Hydrodynamics., 20 (3) (2008) 339-346.

17. YueSun A., Shaozhong Kang A., Li, F., Zhang L., "Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China", Environ Model and Software, J., 24 (2009) 1163-1170.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.6.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3175]