

## اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان

نسرین یوسفی<sup>۱</sup>، مهدی کرد<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد رشته هیدروژئولوژی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استادیار، گروه علوم زمین، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

\* نویسنده مسئول: m.kord@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

### چکیده

در دهه‌های اخیر بهینه‌سازی پیژومترها و کاهش هزینه داده‌برداری بسیار رایج شده و با اقبال جوامع علمی مواجه شده است. دشت دهگلان یکی از دشت‌های بزرگ استان کردستان است که به دلیل تعداد بسیار زیاد چاه‌های مجاز و غیرمجاز به صورت قابل توجهی مورد بهره‌برداری قرار گرفته و این امر باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در این دشت شده است. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت دهگلان با استفاده از روش کریجینگ و اعتبارسنجی آن است. بر همین اساس از اطلاعات پیژومترهای فعال این دشت در دوره‌های تنش آبی مختلف یعنی داده‌های مربوط به ماه‌های سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ استفاده شده است. برای هر ماه، ابتدا بهترین واریوگرام از بین مدل‌های موجود در Arc GIS بر اساس کمترین اثر قطعه‌ای، بیشترین شعاع تأثیر و کمترین سقف، انتخاب و بر آن برازش داده شد. پس از محاسبه خطای تخمین، پیژومتری که در حین اعتبارسنجی متقابل، کمترین خطا را داشت، حذف گردید. مجدداً با تکرار این عملیات تا رسیدن به خطای تخمین کمتر از ۱۱ درصد اولین درون‌یابی، شبکه بهینه تعیین شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که در زمان‌های مختلف، پیژومترهای قابل حذف از ماهی به ماه دیگر متفاوت‌اند و در بازه زمانی بلند مدت نمی‌توان از داده‌برداری هیچ یک از پیژومترها صرف نظر کرد. اگرچه حذف پیژومترها در اولین دوره تنش آبی مشکل خاصی را به وجود نیاورده است اما در تنش آبی بعدی که کاهش سطح آب زیرزمینی در طول زمان سبب خشک شدن برخی از پیژومترها و خارج شدن آن‌ها از شبکه داده‌برداری شده است، مشکل ساز شده و اعتبار و پایایی نتایج بهینه‌سازی را رد می‌کند. در بهینه‌سازی شبکه پایش باید بسیار محتاط بود و استفاده از داده‌های فصلی به جای داده‌های ماهانه، می‌تواند مقادیر خطا را خفیف جلوه داده و همراه کننده باشند. واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، دشت دهگلان، شبکه پایش، کریجینگ.

### مقدمه

موضوع از حساسیت بیشتری برخوردار است. در ایران نیز افزایش جمعیت و برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها در سراسر کشور شده است. علاوه بر آن به دلیل شرایط اقلیمی و کشاورزی غیر اصولی محصولات با نیاز آبی بالا که برای دستیابی کشاورزان به سود بیشتر صورت می‌گیرد، باعث وارد شدن صدمات جبران‌ناپذیری به منابع آبی هر منطقه شده است، که این امر نیازمند مدیریت

اهمیت این موضوع که آب‌های زیرزمینی نقش مهمی در توسعه و مدیریت منابع آبی یک منطقه ایفا می‌کنند بر کسی پوشیده نیست (ناصر و هونما، ۲۰۱۴). پایش آب‌های زیرزمینی به عنوان یک منبع استراتژیک آب، پایه‌ای لازم برای مدیریت و مطالعات بعدی آن فراهم می‌کند. در کشورهای در حال توسعه مخصوصاً آن‌هایی که در نواحی خشک و نیمه خشک قرار گرفته‌اند این

است. به عنوان مثال می‌توان به بهینه کردن تعداد چاه‌های پیژومتری آبخوان دشت تبریز با استفاده از روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و زمین‌آماري برای تخمین سطح آب‌های زیرزمینی اشاره کرد (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی دیگر از سه شیوه‌ی کاهش، افزایش و تغییر مکان چاه‌ها اقدام به بهینه‌سازی شبکه چاه‌های موجود آبخوان دشت تبریز شده است (فروغی و رضایی، ۱۳۹۱). آن‌ها عنوان کردند که افزایش تعداد چاه‌ها تأثیری چندانی در بهبود معیارهای آماری ایجاد نکرده، تغییر محل چاه‌ها باعث کاهش دقت شده، ولی کاهش تعداد چاه‌های شبکه توانسته با تخمین قابل قبولی سطح آب را در منطقه فاقد آمار، پیش‌بینی کند. یوسفی و کرد (۱۳۹۸) در یک پژوهش به بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی دشت دهگلان پرداختند. به این منظور از داده‌های ۴۱ حلقه چاه پیژومتری مربوط به شهریورماه ۱۳۹۵ و از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده کردند. نتایج حاصل از این بررسی آن‌ها نشان داد که با پذیرفتن حدود ۱۱ درصد خطا، کریجینگ عملکرد بهتری داشته است. از دیگر کارهای انجام شده، استفاده از روش‌های زمین‌آماري در بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اردستان در استان اصفهان (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۳) است.

تقریباً تمامی این پژوهش‌ها حاکی از موفقیت روش‌های به کار رفته در بهینه‌سازی شبکه پایش است. اما سؤال این است که تا چه حد این‌گونه بهینه‌سازی‌ها قابل اعتماد هستند و به عبارت دیگر تا چه زمانی جواب آن‌ها دارای تاریخ مصرف است؟ آیا پس از گذشت سال‌ها، بازهم شبکه پایش بهینه، همان است که اکنون تعیین شده؟ در پروتکل‌های انواع مدل‌سازی یکی از بخش‌های مهم، بازبینی بعدی مدل است که معمولاً نادیده گرفته می‌شود. بعد از اعتبارسنجی مدل، در بازه‌های زمانی مشخص، اقدام به بازبینی مدل شده تا صحت کارایی آن تأکید شود. از این‌رو، این پژوهش با هدف تعیین یک شبکه پایش بهینه با استفاده از داده‌های بلندمدت بار هیدرولیک دشت دهگلان انجام شده است به

صحیح و برنامه‌ریزی بهینه منابع آب می‌باشد (بذر/فشان و همکاران، ۱۳۹۵). مدیریت، مخصوصاً در کارهای مهندسی بر اساس داده انجام می‌شود. داده‌ها پس از پردازش به اطلاعات تبدیل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچه داده‌ها از دقت و صحت بیشتری برخوردار باشند به تبع ارزشمند، کاربردی و قابل اعتمادترند. در نمونه‌برداری علاوه بر دقت و صحت، حجم نمونه و تعداد نمونه نیز از اهمیت اساسی برخوردار است به طوری که این نمونه‌ها باید بتوانند نماینده خوبی از محیط واقعی باشند. با پیشرفت تکنولوژی و بهبود تکنیک‌های داده‌برداری و تولید داده، تعداد و حجم لازم در هر نمونه‌برداری کاهش یافته است.

کنترل آب زیرزمینی معمولاً از طریق شبکه پایش و برای بررسی کمی، کیفی و یا هر دو انجام می‌شود. بار هیدرولیک یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که مورد پایش قرار می‌گیرد. این پارامتر علاوه بر کمیت آب زیرزمینی، در بررسی‌های کیفی آبخوان مخصوصاً در بررسی انتقال آلودگی نقش اصلی را دارد. از این رو از روش‌های متنوعی در بهینه‌سازی شبکه پایش آن استفاده شده است. در نگاه کلی این روش‌ها یا بر اساس نظر کارشناسی یعنی بر اساس کمیت و کیفیت اطلاعات آب زیرزمینی است و یا مبتنی بر روش‌های آماری احتمالاتی، تحلیل واریانس و شبیه‌سازی است که از روش‌هایی مانند زمین‌آمار، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کنند (نوری قیداری، ۱۳۹۱). از جمله کارهایی متنوعی که در زمینه بهینه سازی شبکه پایش انجام شده است می‌توان به استفاده از روش RPA (ستینکایا و هارمانجیوگلو، ۲۰۱۴)، به کارگیری روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (نوری قیداری، ۱۳۹۱)، استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک (عدالت و رخشنده‌رو، ۲۰۱۳)، استفاده از الگوریتم اجزای جمعی (گنجی خرم‌دل و همکاران، ۱۳۹۴)، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و دیگر الگوریتم‌های هوشمند (جعفرزاده و خاشعی سیوکی، ۱۳۹۶) و دیگر روش‌ها اشاره کرد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های آماری و زمین‌آماري برای بهینه‌سازی شبکه‌های پایش با اقبال جوامع علمی مواجه شده

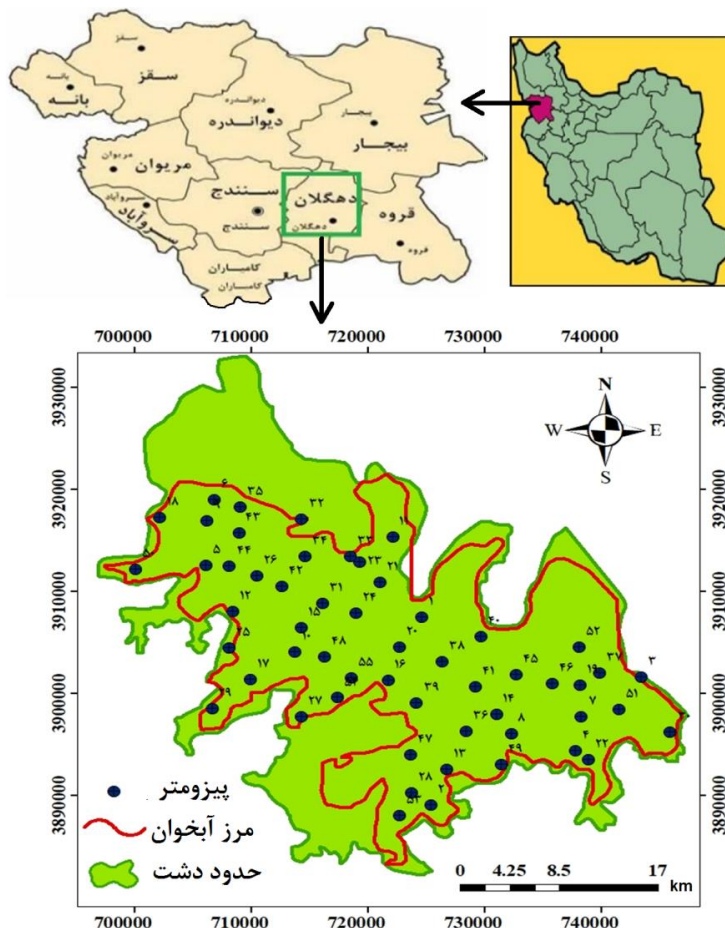
این دشت شده‌اند (رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵). حوضه دهگلان بین طول‌های ۶۹۹۸۰۰ و ۷۵۲۴۰۰ متر شرقی و عرض‌های ۳۸۹۵۴۰۰ تا ۳۹۱۹۴۰۰ متر شمالی از زون ۳۸ شمالی، گسترده شده است. نوع آبخوان دشت دهگلان از نوع آزاد بوده و بیشترین بار هیدرولیک در قسمت غرب و جنوب غربی آبخوان قرار دارد. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از سمت غرب و جنوب غربی به سمت شرق و شمال شرقی است که با جهت حرکت آب‌های سطحی هم‌خوانی دارد. وسعت این دشت در حدود ۷۸۰ کیلومتر مربع بوده و در بین دشتهای استان، بیشترین افت را داشته است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و موقعیت چاه‌های پیژومتری محدوده مورد مطالعه که مورد پایش دوره‌ای قرار می‌گیرند نشان داده شده است.

طوری که در بلندمدت و در مواجهه آبخوان با دوره‌های تنش آبی، شبکه طراحی شده کارایی خود را از دست ندهد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دشت دهگلان یکی از بزرگ‌ترین دشتهای استان کردستان است که مابین سنندج و قروه واقع شده است. دارای خاکی حاصلخیز بوده و اکثر محصولات در این دشت به‌صورت آبی کشت می‌شوند. متوسط بارندگی این دشت حدود ۳۵۰ میلی‌متر در سال و از نظر آب و هوا جزء مناطق نیمه‌خشک و سرد استان به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر تعداد بسیار زیادی چاه مجاز و غیرمجاز در این دشت حفر گردیده و به‌صورت قابل توجهی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند که باعث افت سطح آب زیرزمینی در



شکل (۱): موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه و چاه‌های پیژومتری

## کریجینگ

شبکه بهینه پایش در مواجهه با دوره‌های تنش آبی معتبر خواهد ماند یا خیر، در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بلندمدت، دوره‌های تنش آبی آبخوان دشت دهگلان بررسی و اقدام به بهینه‌سازی تعداد پیژومترها در این دوره‌های تنش آبی، شد. منطق این کار بر این اصل استوار است که یک شبکه بهینه پایش می‌بایست در طول تغییر ماه‌ها، فصول و سال‌ها همواره بهینه باقی مانده و شبکه را با نقص داده مواجه نسازد.

شکل ۲ هیدروگراف تراز آب زیرزمینی را در دوره‌ی ۳۱ ساله (سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۷) نشان می‌دهد. ماکزیمم تراز سطح آب زیرزمینی در خرداد ماه ۱۳۷۳، ۱۸۴۴/۶۱ متر و مینیمم تراز سطح آب زیرزمینی در مهر ماه سال ۱۳۹۴ به میزان ۱۸۰۵/۱۴ متر بوده است. در هیدروگراف نشان داده شده می‌توان مشاهده کرد که در دوره ۳۱ ساله ۳۵/۳۳ متر افت حاصل شده است. یعنی به‌طور متوسط سالانه ۱/۱۳ متر سطح آب کاهش یافته است. همچنین می‌توان گفت تقریباً در ۱۰ سال اول (سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۷) آبخوان تا حدودی متعادل بوده و میزان افت سطح ایستابی خیلی کمتر بوده است به صورتی که طی آن سال‌ها تنها ۰/۸۴ متر افت در آبخوان رخ داده است. طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۶ میزان افت افزایش یافته و به ۱۲/۰۸ متر رسیده است. با گذشت زمان به دلیل افزایش میزان برداشت، افت تراز آبخوان نسبت به سال‌های قبل خیلی افزایش یافته است. به‌طوری‌که در سال‌های اخیر (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷) افت تراز آب زیرزمینی به ۲۱/۲۵ متر رسیده است. بر این اساس تا سال ۷۸ سطح ایستابی آبخوان کاهش چشم‌گیری نداشته و پس از آن سه دوره تنش آبی اصلی به وضوح قابل تشخیص است. از این‌رو از داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ به عنوان نماینده هر دوره تنش آبی استفاده شده است.

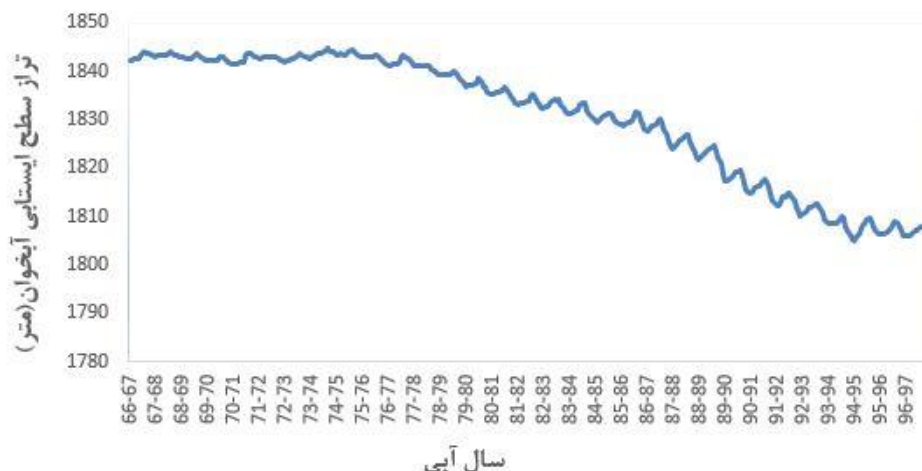
روش‌های زمین‌آماري با استفاده از خصوصیات آماری و مکانی داده‌ها، ارتباط بین آن‌ها را تعیین کرده و از آن در تعیین مقادیر مجهول استفاده می‌کنند. این تکنیک‌ها که به روش‌های درون یابی معروف هستند، داده‌های نقطه‌ای را به داده‌های پهنه‌ای تبدیل می‌کنند. احتمال تشابه داده‌هایی که از نظر مکانی به هم نزدیک‌ترند بیشتر است. به دورترین فاصله‌ای که یک نمونه با نمونه‌های مجاور ارتباط فضایی دارد شعاع تأثیر گفته می‌شود. فراتر از این فاصله، نمونه‌ها به‌صورت مستقل عمل کرده و تخمین‌گرهای زمین‌آماري کارایی ندارند (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵؛ حسنی پاک، ۱۳۹۴). کریجینگ یکی از روش‌های پیشرفته درون‌یابی زمین‌آماري است که از میانگین وزنی داده‌های معلوم برای محاسبه مقادیر مجهول استفاده می‌کند. وزن هر نمونه بر اساس واریانس مربوط به فاصله و یا به عبارت دیگر، واریوگرام تعیین می‌شود. بر این اساس نقاط نزدیک‌تر تأثیر بیشتری در تخمین مقدار مجهول خواهند داشت. فرمول کریجینگ در رابطه ۱ آورده شده است.

$$Z_V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{Vi} \quad (1)$$

در این رابطه  $Z_V^*$ ،  $Z_{Vi}$  و  $\lambda_i$  به ترتیب بیانگر مقدار تخمینی، مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه  $Vi$  و وزن کمیت وابسته به نمونه نام می‌باشند (حسنی پاک، ۱۳۹۴).

## روش تحقیق

در ایران علاوه بر تغییرات فصلی، به علت دوره‌های خشک‌سالی و اضافه برداشت آب زیرزمینی، تنش‌های آبی زیادی به آبخوان‌ها اعمال شده است. این تنش‌ها می‌توانند بهینه‌سازی شبکه پایش را تحت تأثیر قرار دهند. به همین دلیل برای بررسی اینکه تعیین



شکل (۲): هیدروگراف تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت دهگلان

ماه سال ۱۳۹۵ به صورت جداگانه انجام شده است. در نهایت ماتریسی از پیژومترهای قابل حذف و نیز پیژومترهای لازم برای پایش تشکیل شده است. انتخاب پیژومترهایی که در تمام ماه‌ها حذف شده باشند مشخص کننده آن دسته از پیژومترهایی خواهد بود که می‌توان از داده‌برداری از آن‌ها صرف نظر کرد و به این ترتیب شبکه بهینه داده‌برداری تعیین می‌گردد.

به منظور ارزیابی و مقایسه روش‌های درون‌یابی از اعتبارسنجی متقابل<sup>۵۷</sup> استفاده شده است. در این روش، مقدار اندازه‌گیری شده بار هیدرولیک در هر پیژومتر با مقدار تخمین زده شده آن به وسیله درون‌یابی مقایسه می‌شود. برای این مقایسه، مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE^{58}$ ) بر اساس رابطه ۲ به کار رفته است. هرچه مقادیر تخمین زده شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر باشند، این مقدار به صفر نزدیک‌تر خواهد بود.

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

در این رابطه  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده‌ای و  $\hat{Z}(x_i)$  مقدار برآورد شده است (رجائی و همکاران، ۲۰۱۶).

### نتایج و بحث

برای استفاده از روش‌های زمین‌آماري، لازم است تا داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند. بنابراین لازم است که در مرحله‌ی

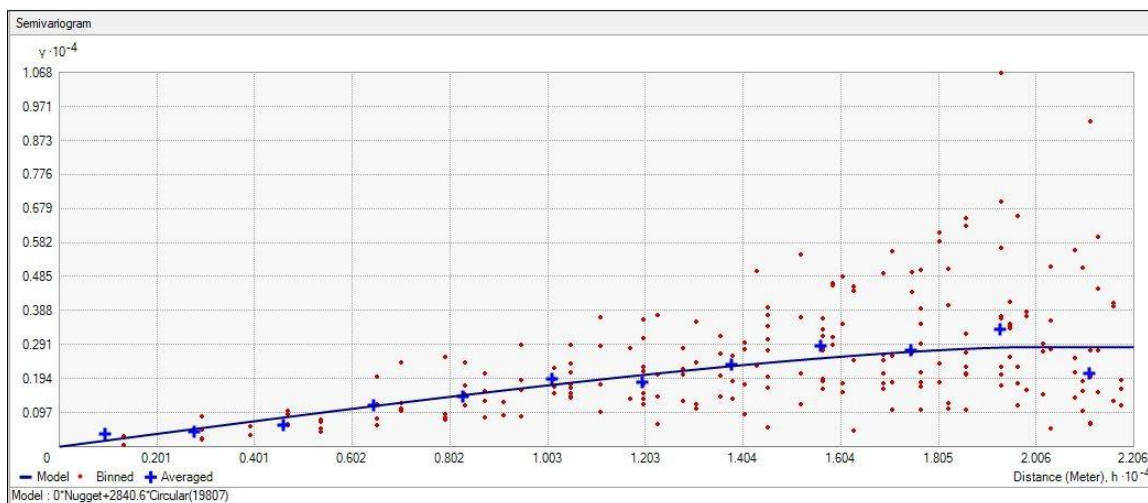
نحوه بهینه‌سازی شبکه پایش به این صورت است که در مرحله آماده‌سازی داده‌ها، چاه‌های خشک و مسدود شده که فاقد اطلاعات هستند حذف می‌شوند. در ابتدا داده‌ها به صورت ماهیانه مرتب شده و برای هر ماه درون‌یابی با استفاده از روش کریجینگ ساده که یکی از دقیق‌ترین روش‌ها در تخمین سطح آب‌های زیرزمینی است، انجام می‌شود (سون و همکاران، ۲۰۰۹). سپس با استفاده از آزمون اعتبارسنجی متقابل خطای  $RMSE$  هر نقطه محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه خطای تخمین، پیژومترها به ترتیب از کمترین خطا به بزرگ‌ترین خطا مرتب شده و سپس پیژومتری که در حین اعتبارسنجی متقابل، کمترین خطا را داشته است، حذف شده و درون‌یابی با پیژومترهای باقی مانده انجام می‌شود. مجدداً در مرحله بعد پیژومتری که دارای کمترین خطاست، از دور محاسبات خارج شده و این عملیات تا زمانی که مقدار خطای تخمین کمتر از ۱۱ درصد خطای اولین درون‌یابی که با تمام پیژومترها صورت گرفته است، باشد ادامه می‌یابد (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۴). باید توجه داشت که هر بار پیژومترها از کمترین خطا به بزرگ‌ترین خطا مرتب شده و پیژومتری که در حین اعتبارسنجی متقابل کمترین خطا را داشته است، در اولویت حذف قرار می‌گیرد. در این مطالعه مراحل ذکر شده برای دوازده ماه سال ۱۳۸۵، دوازده ماه سال ۱۳۹۰ و دوازده

<sup>58</sup> - Root Mean Square Error

<sup>57</sup> - Cross Validation

انتخاب و بر آن برازش داده شده است. شکل ۳ برای نمونه واریوگرام مربوط به فروردین ۱۳۸۵ را نشان می‌دهد. در شکل مذکور محور افقی فاصله و محور قائم نشان دهنده مقدار نیم تغییرنا است. ملاک موفقیت‌آمیز بودن درون‌یابی مقادیر خطای RMSE در نظر گرفته شد که نشان می‌دهد مقادیر محاسباتی تا چه حدی به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌اند. در جدول ۱ مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا برای ماه‌های مختلف سال ۱۳۸۵ گزارش شده است.

آماده‌سازی داده‌ها برای روش‌های زمین‌آماري، در صورت نداشتن توزیع نرمال با استفاده از تبدیل‌های مختلف آن‌ها را به نرمال نزدیک کرد. برای درون‌یابی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. پس از بررسی داده‌ها مشخص شد که آن‌ها حدوداً نرمال بوده و نیازی به استفاده از هیچ تبدیلی برای نرمال کردن داده‌ها نیست. در کریجینگ ابتدا لازم است تا واریوگرام تنظیم شود. از این‌رو برای هر ماه، ابتدا واریوگرام تجربی محاسبه شده و سپس بهترین مدل از بین مدل‌های موجود در Arc GIS بر اساس کمترین اثر قطعه‌ای، بیشترین شعاع تأثیر و کمترین سقف،



شکل (۳). واریوگرام برازش داده شده در روش کریجینگ ساده

جدول (۱): مقدار تغییرات RMSE بر اساس تعداد چاه حذف شده برای دوازده ماه سال ۱۳۸۵

| تعداد چاه | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر   | مرداد | شهریور | مهر   | آبان  | آذر   | دی    | بهمن  | اسفند |
|-----------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ۰         | ۲۸/۹۴   | ۲۱/۳۱    | ۲۱/۳۳ | ۱۹/۹۸ | ۲۰/۶۵ | ۲۱/۰۸  | ۲۰/۱۷ | ۲۱/۷۹ | ۲۱/۲۸ | ۲۲/۲۲ | ۲۰/۰۴ | ۱۹/۶۶ |
| ۱         | ۲۹/۳۲   | ۲۱/۹۷    | ۲۱/۹۱ | ۲۰/۲۹ | ۲۱/۴۶ | ۲۱/۴۸  | ۲۰/۵۴ | ۲۲/۱۴ | ۲۲/۱۴ | ۲۱/۸۴ | ۲۰/۵۹ | ۲۰/۲۱ |
| ۲         | ۲۹/۷۲   | ۲۲/۱۶    | ۲۲/۰۹ | ۲۰/۴۶ | ۲۱/۹۶ | ۲۱/۶۱  | ۲۰/۷۷ | ۲۲/۴۵ | ۲۲/۵۲ | ۲۳/۷۷ | ۲۰/۶۶ | ۲۰/۴۲ |
| ۳         | ۳۰/۰۹   | ۲۲/۷۴    | ۲۲/۷۳ | ۲۱/۱۴ | ۲۲/۱۵ | ۲۱/۳۶  | ۲۱/۳۲ | ۲۲/۶۴ | ۲۲/۴۹ | ۲۳/۴۸ | ۲۰/۹۷ | ۲۰/۷۹ |
| ۴         | ۳۰/۸۲   | ۲۳/۲۵    | ۲۳/۱۵ | ۲۱/۴۶ | ۲۳/۱۱ | ۲۲/۰۵  | ۲۰/۶۸ | ۲۲/۵۵ | ۲۳/۳۶ | ۲۴/۰۵ | ۲۱/۷۸ | ۲۰/۹۸ |
| ۵         | ۳۰/۷۱   | ۲۳/۵۵    | ۲۳/۷۸ | ۲۱/۸۹ |       | ۲۲/۳۸  | ۲۱/۳۹ | ۲۲/۸۸ | ۲۴/۱۶ | ۲۴/۹۸ | ۲۱/۶۵ | ۲۱/۲۸ |
| ۶         | ۳۳/۸۰   | ۲۳/۹۳    |       | ۲۳/۵۵ |       | ۲۲/۵۴  | ۲۱/۸۵ | ۲۳/۸۶ |       |       | ۲۳/۱۶ | ۲۱/۵۵ |
| ۷         |         |          |       |       |       | ۲۲/۸۴  | ۲۱/۷۷ | ۲۴/۲۶ |       |       | ۲۳/۱۱ | ۲۱/۶۹ |
| ۸         |         |          |       |       |       | ۲۳     | ۲۲/۰۶ |       |       |       |       | ۲۲/۰۹ |
| ۹         |         |          |       |       |       | ۲۴/۸۲  | ۲۳/۱۶ |       |       |       |       |       |



برای فروردین ماه سال ۱۳۸۵، در اولین درون‌یابی تمامی ۵۵ پیزومتر مورد استفاده قرار گرفت و روش کریجینگ ساده با مدل دایره‌ای نسبت به سایر مدل‌های دیگر از خطای کمتری برخوردار بود. سپس بر اساس نتایج حاصل از آزمون اعتبارسنجی متقابل، پیزومترها برای اولویت حذف از کمترین خطا به بزرگ‌ترین خطا رتبه‌بندی شدند. به این صورت پیزومتری که کمترین خطا را داشته است حذف و درون‌یابی با پیزومترهای باقی‌مانده انجام شده است. پس از حذف یک پیزومتر، درصد خطا ۱/۳۱ درصد افزایش یافته است. مراحل حذف پیزومترها تا جایی ادامه یافته

که میزان خطای تخمین، نسبت به سطح اولیه، کمتر از ۱۱ درصد باشد. با این توصیف ۶ پیزومتر، برای فروردین ماه قابل حذف بوده‌اند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ برای ماه‌های اردیبهشت تا شهریور به ترتیب ۶، ۵، ۴، ۹، ۷، ۵، ۵ و ۷ پیزومتر قابل حذف بوده‌اند.

در جداول ۲ و ۳ نیز نتایج حاصل از درون‌یابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ ساده برای سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ آورده شده است.

جدول (۲): مقدار تغییرات RMSE بر اساس تعداد چاه حذف شده برای دوازده ماه سال ۱۳۹۰

| تعداد چاه | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر   | مرداد | شهریور | مهر   | آبان  | آذر   | دی    | بهمن  | اسفند |
|-----------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| .         | ۲۲/۲۴   | ۲۰/۰۵    | ۲۱/۹۳ | ۲۲/۲۱ | ۲۱/۸۶ | ۲۱/۹۸  | ۲۲/۹۵ | ۲۲/۷۶ | ۲۳/۱۸ | ۲۳/۴۹ | ۲۳/۹۳ | ۲۳/۸۳ |
| ۱         | ۲۲/۴۸   | ۲۰/۱۹    | ۲۲/۶۰ | ۲۲/۵۵ | ۲۲/۱۲ | ۲۲/۴۲  | ۲۳/۰۶ | ۲۳/۴۸ | ۲۳/۵۵ | ۲۳/۸۵ | ۲۴/۶۰ | ۲۴/۲۵ |
| ۲         | ۲۳/۰۴   | ۲۰/۳۸    | ۲۲/۵۴ | ۲۲/۹۵ | ۲۲/۴۱ | ۲۲/۸۴  | ۲۳/۳۵ | ۲۲/۹۹ | ۲۳/۹۶ | ۲۳/۹۴ | ۲۴/۹۱ | ۲۴/۷۸ |
| ۳         | ۲۳/۵۲   | ۲۱/۳۶    | ۲۳/۲۳ | ۲۳/۰۳ | ۲۲/۳۹ | ۲۲/۴۶  | ۲۳/۴۱ | ۲۳/۵۵ | ۲۴/۲۹ | ۲۴/۶۹ | ۲۵/۰۸ | ۲۴/۸۶ |
| ۴         | ۲۳/۶۳   | ۲۱/۳۳    | ۲۳/۵۶ | ۲۳/۵۴ | ۲۲/۱۴ | ۲۲/۷۸  | ۲۴/۱۶ | ۲۳/۳۰ | ۲۴/۴۶ | ۲۴/۸۹ | ۲۵/۶۶ | ۲۴/۸۱ |
| ۵         | ۲۴/۱۲   | ۲۱/۸۴    | ۲۴/۰۳ | ۲۴/۲۶ | ۲۲/۶۴ | ۲۲/۸۸  | ۲۳/۴۱ | ۲۳/۱۵ | ۲۵/۴۲ | ۲۵/۱۵ | ۲۵/۸۴ | ۲۵    |
| ۶         | ۲۴/۱۵   | ۲۲/۶۰    | ۲۵/۴۶ | ۲۴/۳۱ | ۲۲/۵۴ | ۲۳/۱۰  | ۲۳/۴۸ | ۲۳/۹۰ | ۲۴/۸۴ | ۲۴/۸۸ | ۲۶/۱۶ | ۲۵/۴۶ |
| ۷         | ۲۵/۰۷   |          |       | ۲۵/۰۸ | ۲۲/۹۰ | ۲۳/۵۶  | ۲۴/۰۱ | ۲۴/۳۸ | ۲۵/۱۷ | ۲۵/۸۹ | ۲۶/۱۹ | ۲۶/۲۱ |
| ۸         |         |          |       |       | ۲۳/۳۹ | ۲۳/۸۷  | ۲۴/۴۴ | ۲۴/۶۹ | ۲۵/۱۶ | ۲۵/۵۲ | ۲۶/۵۴ | ۲۶/۱۷ |
| ۹         |         |          |       |       | ۲۴/۰۳ | ۲۴/۵۷  | ۲۴/۸۶ | ۲۵/۴۶ | ۲۵/۶۳ | ۲۶/۳۰ | ۲۶/۹۱ | ۲۶/۵۵ |
| ۱۰        |         |          |       |       | ۲۴/۱۰ |        | ۲۵/۰۱ |       | ۲۵/۶۰ |       |       |       |
| ۱۱        |         |          |       |       | ۲۵/۴۸ |        | ۲۵/۳۱ |       | ۲۶/۴۴ |       |       |       |
| ۱۲        |         |          |       |       |       |        | ۲۶/۲۱ |       |       |       |       |       |

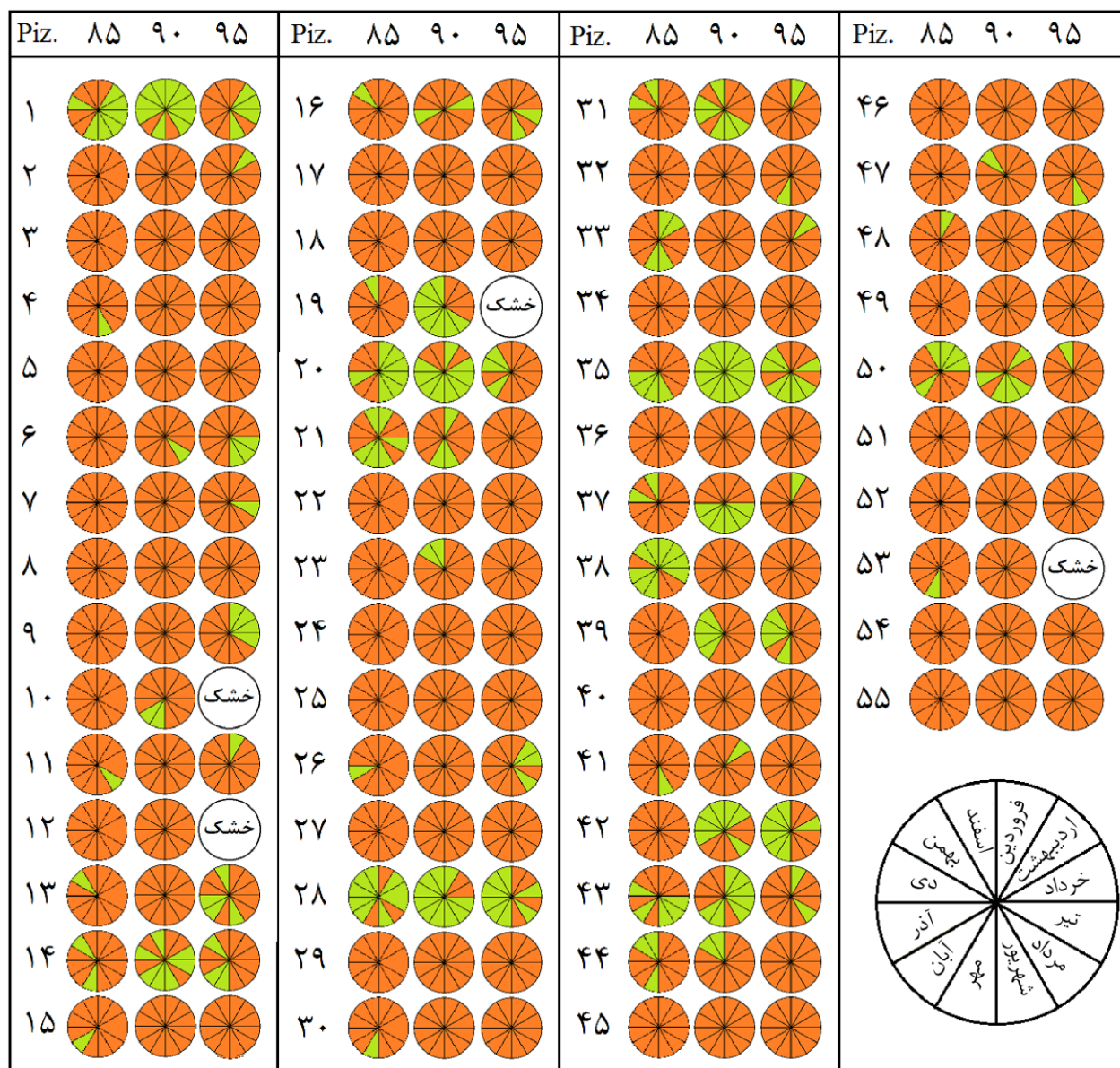
جدول (۳): مقدار تغییرات RMSE بر اساس تعداد چاه حذف شده برای دوازده ماه سال ۱۳۹۵

| تعداد چاه | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر   | مرداد | شهریور | مهر   | آبان  | آذر   | دی    | بهمن  | اسفند |
|-----------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ۰         | ۲۸/۴۱   | ۲۶/۱۴    | ۲۶/۷۳ | ۲۶/۸۲ | ۲۷/۸۹ | ۲۷/۷۴  | ۲۷/۱۹ | ۲۷/۳۱ | ۲۷/۷۴ | ۲۷/۱۳ | ۲۶/۸۷ | ۲۶/۶  |
| ۱         | ۲۹/۰۹   | ۲۶/۵۳    | ۲۷/۳۵ | ۲۷/۸۶ | ۲۸/۷۲ | ۲۷/۰۵  | ۲۷/۶۳ | ۲۷/۶۸ | ۲۸/۷۴ | ۲۷/۶۹ | ۲۷/۶۷ | ۲۷/۰۹ |
| ۲         | ۲۹/۷۴   | ۲۶/۹۴    | ۲۷/۷۱ | ۲۹/۰۹ | ۲۹/۵۲ | ۲۷/۰۶  | ۲۸/۰۱ | ۲۸/۰۴ | ۲۸/۸۳ | ۲۸/۰۷ | ۲۷/۷۷ | ۲۷/۱  |
| ۳         | ۳۱/۷۹   | ۲۷/۸۷    | ۲۸/۶۷ | ۲۹/۳۸ | ۳۰/۱۰ | ۲۸/۴۲  | ۲۸/۶۶ | ۲۸/۹  | ۲۹/۴۱ | ۲۸/۶۴ | ۲۷/۹۲ | ۲۷/۵۴ |
| ۴         |         | ۲۸/۱۱    | ۲۹/۶۶ | ۳۰/۳۵ | ۳۰/۸۲ | ۲۸/۵۸  | ۲۹/۱۱ | ۲۹/۱۴ | ۳۲/۰۷ | ۲۹/۱۷ | ۲۸/۵۱ | ۲۹/۶۳ |
| ۵         |         | ۲۹/۰۷    | ۲۹/۴۴ |       | ۳۲/۰۴ | ۳۰/۵۸  | ۲۹/۵۴ | ۲۹/۷۸ |       | ۳۰/۲۵ | ۲۹/۱۵ |       |
| ۶         |         |          | ۳۰/۷۹ |       | ۳۱/۴۸ | ۳۰/۳۶  | ۳۰/۵۴ |       |       |       | ۳۰/۱۱ |       |

بر اساس نتایج مربوط به سال ۱۳۸۵، در اردیبهشت ماه و خرداد ماه کمترین تعداد و در مهرماه بیشترین تعداد پیزومتر قابل حذف بوده است. در مورد سال ۱۳۹۵، حداقل تعداد پیزومترهای قابل حذف مربوط به فروردین ماه بوده است که تنها ۳ پیزومتر حذف شده اند و با حذف سه پیزومتر میزان خطای RMSE، ۱۱/۸ درصد افزایش یافته است. بیشترین تعداد حذف پیزومترها در سال ۱۳۹۵، ۶ پیزومتر و مربوط به ماه های خرداد، شهریور، مهر، آبان و بهمن بوده است که در هر کدام از این ماه ها بعد از حذف ۶ پیزومتر، میزان خطا به ترتیب ۱۵/۱۸، ۱۳/۴۸، ۱۱/۶۵، ۱۱/۸۲ و ۱۲/۰۵ درصد افزایش یافته است. به طور کلی میزان خطای RMSE مربوط به سال ۱۳۹۵ نسبت به دو دوره گذشته بالاتر و تعداد پیزومترهای قابل حذف کمتر است. به این ترتیب، پیزومترهایی که در هر ماه قابل حذف هستند مشخص و در شکل ۴ ارائه شده است. رنگ سبز نشان دهنده حذف و رنگ قرمز نشان دهنده عدم حذف پیزومتر است.

برای تعیین شبکه پایش بهینه، داده برداری از پیزومتری قابل چشم پوشی است که در تمامی دوره ها قابل حذف باشد. با توجه به نتایج حاصل می توان بیان نمود که در ماه های متوالی هیچ یک از پیزومترها قابل حذف نیستند. اگرچه ممکن است در هر ماه چند پیزومتری قادر به حذف باشد و حتی در چند ماه متوالی این شرایط برقرار باشد، اما در تمام ماه های مربوط به یک دوره، پیزومتری قابل حذف نیست. این بدان معناست که پیزومترهای حذف شده برای داده برداری در ماه های آینده و دوره های بعدی ضروری اند. به عنوان مثال پیزومتر شماره ۳۵ (پیزومتر شمال غرب قروچای)، در دوازده ماه سال ۱۳۹۰ حذف شده است در حالی که در سال ۱۳۸۵ فقط در ماه های شهریور، مهر، آبان و آذر، و در سال ۱۳۹۵ هم در خرداد، مرداد، شهریور، مهر، آبان، دی و بهمن ماه حذف شده است. همچنین سایر پیزومترهای دیگر موجود در دشت هم نه تنها در طی دوره های متوالی بلکه ماه به ماه هم تغییر کرده اند.





شکل (۴): نتایج بهینه‌سازی پیزومترها برای ماه‌های ۸۵، ۹۰ و ۱۳۹۵. رنگ سبز مجاز بودن حذف پیزومتر را نشان می‌دهد.

بر اساس ماتریس نتایج، پیزومتری که در تمامی ماه‌ها قابل حذف باشد، وجود ندارد. به نظر می‌رسد که اگر در بهینه‌سازی از تمام ماه‌ها استفاده نشده و تنها به داده‌های فصلی بسنده شود، شاید این مشکل پوشیده شده و از نظر پنهان باقی بماند. برای بررسی این موضوع و مشخص کردن این که عدم استفاده از تمام داده‌ها چه تأثیری بر داده‌برداری‌های بعدی ایجاد می‌کند، ماه‌های میانی هر فصل به عنوان نماینده آن فصل در نظر گرفته شد و بهینه

سازی بر اساس آن‌ها صورت گرفت. پیزومترهای قابل حذف اردیبهشت، مرداد، آبان و بهمن ماه مربوط به سال ۱۳۸۵ از محاسبات سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ حذف شده و مقدار خطای ایجاد شده در تخمین سطح ایستابی به‌دست آمد. در جدول ۴ پیزومترهای حذف شده و در جدول ۵ مقدار خطای تخمین آورده شده است.

جدول (۴): پیزومترهای حذف شده در اردیبهشت، مرداد، آبان و بهمن ماه سال ۱۳۸۵

| پیزومتر  | آب باریک      | حسن آباد     | سلسله          | شمال شرق حاجی پموق | طهماسب قلی      | کیلومتر ۷۵ |
|----------|---------------|--------------|----------------|--------------------|-----------------|------------|
| اردیبهشت | شماره پیزومتر | ۱            | ۲۰             | ۲۸                 | ۳۳              | ۳۸         |
| مرداد    | نام پیزومتر   | آب باریک     | تلوار          | حسن آباد           | قروچای          | ۵۰         |
| آبان     | شماره پیزومتر | ۱            | ۱۱             | ۲۰                 | ۴۳              | ۷۵         |
| بهمن     | نام پیزومتر   | جنوب کرونجان | حسینی          | سلسله              | شمال غرب قروچای | طهماسب قلی |
|          | شماره پیزومتر | ۱۵           | ۲۱             | ۲۸                 | ۳۵              | ۳۸         |
|          | نام پیزومتر   | جنوب قاملو   | جنوب کاظم آباد | جوانمرد آباد       | سلسله           | طهماسب قلی |
|          | شماره پیزومتر | ۱۳           | ۱۴             | ۱۶                 | ۲۸              | ۳۸         |

جدول (۵): درصد افزایش خطای درون یابی برای اردیبهشت، مرداد، آبان و بهمن ماه سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵، بر اساس نتایج بهینه سازی سال ۱۳۸۵

| سال  | اردیبهشت | مرداد | آبان | بهمن |
|------|----------|-------|------|------|
| ۱۳۹۰ | ۱۰/۵     | ۴/۹   | ۶/۵  | ۹/۶  |
| ۱۳۹۵ | ۱۳/۲     | ۹/۵   | ۱۲/۶ | ۹/۹  |

حذف نیستند. تعداد و نوع پیزومترهای حذفی در هر ماه نسبت به ماه‌های دیگر متفاوت است. فارغ از دلایل این موضوع، به طور کلی با توجه به نتایج ارائه شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی شبکه پایش بستگی به شرایط موجود در دشت دارد و نمی‌توان تنها به نتایج یک دوره اکتفا کرد. بنابراین باید در بهینه‌سازی شبکه پایش بسیار محتاط عمل نمود. هر چند ممکن است حذف پیزومترها در کوتاه مدت باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها شود ولی تأثیر آن در مقابل پایش زمین و پایش منابع آب بسیار ناچیز است و در بلند مدت، نقص شبکه داده می‌تواند تأثیرات مخرب‌تری را در پی داشته باشد. چهار پیزومتر تازه آباد چراغ آباد، جاده قدیم، چمقلو و لاله‌ای در سال ۱۳۹۵ نسبت به دو دوره قبل خشک شده و از آن‌ها داده‌برداری صورت نگرفته است. در این گونه موارد باید مراقب بود که در ماه‌های پرآبی و یا احياناً جبران ذخیره آبخوان از حیث داده‌برداری فراموش نشوند. لذا پیشنهاد می‌شود شبکه پایش‌های بهینه‌سازی شده حتماً در بازه زمان‌های مشخص بعدی مورد بازبینی قرار گیرند.

#### منابع

همان‌طور که از نتایج گزارش شده در جدول ۵ مشهود است، مقادیر خطای درون‌یابی مربوط به سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ که بر اساس شبکه پایش بهینه‌شده سال ۱۳۸۵ محاسبه شده‌اند، کم بوده و غیر از اردیبهشت و آبان ماه ۱۳۹۵ بقیه موارد خطایی کمتر از ۱۱ درصد دارند. این نتایج نشان می‌دهد اگرچه حذف پیزومترها در اولین دوره تنش آبی مشکل خاصی را به وجود نیاورده است اما در تنش آبی بعدی مشکل‌ساز شده و اعتبار و پایایی نتایج بهینه‌سازی را رد می‌کند. علاوه بر آن نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های فصلی به جای داده‌های ماهانه، می‌تواند مقادیر خطا را خفیف جلوه داده و گمراه‌کننده باشند.

#### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای بهینه‌سازی شبکه پایش سطح ایستابی دشت دهگلان از داده‌های مربوط به ۵۵ پیزومتر فعال در دشت استفاد شد. برای اطمینان از بهینه بودن شبکه پایش، اعتبارسنجی و عدم ایجاد نقص داده در سال‌های آینده، بهینه سازی برای سه دوره تنش آبی، انجام گردید و نتایج حاصل نشان داد که اگرچه می‌توان در هر ماه پیزومترهای بهینه را تعیین کرد اما هیچ‌یک از پیزومترها به صورت مشترک برای تمامی ماه‌ها قابل

- بذرافشان، ا.، رحیمی، ف.، محمدی کنگرانی، ح.، ۱۳۹۵. مدیریت بهینه آب در شرایط خشکسالی، مطالعه موردی دشت سرخون- استان هرمزگان. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ششم، شماره ۲۳، بهار ۱۳۹۵، ص ۱۱۷-۱۰۳.
- جعفرزاده، ا.، خاشعی سیوکی، ع.، ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد مدل بهینه سازی شبکه پایش آب زیرزمینی بر پایه شبکه عصبی و جستجوی گرگ خاکستری (GNN) (مطالعه موردی: دشت بیرجند). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال هشتم، شماره ۳۱، بهار ۱۳۹۷، ص ۱۳۹-۱۲۱.
- حسینی پاک، ع.، ۱۳۹۴. زمین آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۳۲۸ ص.
- خسروی، ی.، عباسی، ا.، ۱۳۹۵. تحلیل فضایی داده های محیطی با زمین آمار. زنجان نشر آذرکلک، چاپ اول، ۲۸۰ ص.
- رحیمی، م.، سلیمانی، ک.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با استفاده از تکنیک تصمیم گیری چند متغیره. نشریه علمی پژوهشی - علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال دهم، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۵، ص ۳۹-۲۷.
- فروغی، ف.، رضایی، ر.، ۱۳۹۱. بهینه سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت تبریز با استفاده از روش زمین آمار. فصلنامه علمی- پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، سال هفتم، شماره ۲۲، بهار ۱۳۹۲، ص ۹۳-۱۰۳.
- گنجی خرم دل، ن.، کیخایی، ف.، محمدی، ک.، جوادمنعم، م.، ۱۳۹۴. بهینه سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش فراکاوشی اجزای جمعی. مجله علمی پژوهشی هیدرولیک، دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، ص ۲۵-۲۵.
- نوری قیداری، م.، ح.، ۱۳۹۱. تعیین چاه های مؤثر در تعیین تراز سطح آب زیرزمینی با آنالیز مؤلفه های اصلی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال هفدهم، شماره ۴۶، تابستان ۱۳۹۲، ص ۱۴۹ تا ۱۵۸.
- هوشنگی، ن.، آل شیخ، ع.، ندیری، ع.، ۱۳۹۴. بهینه سازی تعداد پیژومترها در پیش بینی سطح آب زیرزمینی با روش های PCA و زمین آماری. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۴/۲، صفحه ۵۳ تا ۶۶، ۱۳۹۴.
- یوسفی، ن.، کرد، م.، ۱۳۹۸. بهینه سازی شبکه چاه های مشاهده ای دشت دهگلان با استفاده از روش های کربچینگ و وزن دهی معکوس فاصله. سومین همایش ملی مدیریت منابع آب نواحی ساحلی. مازندران، ساری.
- Abedian, H., Mohammadi, K., Rafiee, R., 2013. Optimizing monitoring network of water table by geostatistical methods. *Journal of Geology and Mining Research*. 5(9): 223-231.
- Cetinkaya, C.P., Harmancioglu, N.B., 2014. Reduction of streamflow monitoring networks by a reference point approach. *Journal of Hydrology*, 512: 263-173.
- Edalat, M., Rakhshandehroo, G., 2013. Groundwater modeling and optimization of a pump and treat scheme in Shahreza plain, Iran, using Genetic algorithm. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/292967629>.
- Naseer, A., Honma, S.H., 2014. A Method for optimizing groundwater management. *Proc. Schl. Eng. Tokai Univ, Ser. E* 39.
- Rajaei, T., Nourani, V., Pouraslan, F., 2016. Groundwater level forecasting using wavelet and kriging. *J. Hydraul. Struct*, 2(2): 1-21.
- Sun, Y., Kang, S., Li, F., 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 and Software*, 24:1163-1170.