نشریه علمی علوم و فنون نقشه برداری، دوره ۱۳، شماره ۳، صفحه ۴۱ تا ۵۷، اسفند ماه ۱۴۰۲ - مقاله پژوهشی

استفاده از اطلاعات کمکی در کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری سطح آب زیرزمینی

نوید هوشنگی[1*]، سیدرضا غفاری رزین[2]

[1] استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.
hooshangi@arakut.ac.ir

[2] دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.
mr.ghafari@arakut.ac.ir

(تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: دی ۱۴۰۲)

چکیده

احداث چاه‌های پیزومتری متعدد، نگه‌داری و پایش سالیانه‌ی آن‌ها به‌دلیل مشکلاتی مالی، زمانی و فنی همواره با محدودیت‌هایی روبرو بوده‌است. تعیین ارزش نسبی چاه‌های موجود و در نتیجه کاهش ابعاد شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی در مدیریت مالی شبکه تأثیر مستقیم دارد. هدف اصلی این تحقیق استفاده از اطلاعات کمکیِ موجود در شبکه‌ی پایش کیفی آب زیرزمینی به‌منظور کاهش تعداد چاه‌های پیزومتریِ شبکه‌ی پایش سطح آب زیرزمینی دشت تبریز می‌باشد. در این مطالعه با رویکردی نوین از روش کوکریجینگ برای لحاظ اطلاعات کمکی در تئوری جک‌نایف استفاده می‌شود. بر اساس تئوری نمونه‌برداری جک‌نایف درصورتی‌که مقادیر چاه‌ها با داده‌های جانبی و کمکی قابل برآورد باشد، آن چاه قابل حذف می‌باشد. برای اجرای تحقیق ابتدا ضریب همبستگی بین سطح آب زیرزمینی و داده‌های شبکه‌ی پایش کیفی محاسبه و در ادامه تئوری جک‌نایف و کوکریجینگ برای تعیین ارزش نسبی چاه‌ها پیاده‌سازی شد. در نهایت مقایسه‌ی نتایج با روش وزن‌دهی‌معکوس‌فاصله (IDW) و کریجینگ‌عمومی صورت گرفت. در این تحقیق از مقادیر کلر آب‌زیرزمینی به دلیل ضریب همبستگی ۰/۶۱- در رویکرد پیشنهادی استفاده شد. نتایج نشان داد اگرچه کوکریجینگ با روش IDW و کریجینگ‌عمومی در تئوری جک‌نایف دارای شباهتی بیش از ۶۵٪ است، اما تغییر روش درون‌یابی منجر به تغییر ارزش چاه‌ها می‌شود. در رویکرد پیشنهادی بر اساس کوکریجینگ به علت مقدار RMSE کمتر در پهنه‌بندی سطح جدید و افزایش دقت برآورد در چاه‌های حذف‌شده عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. بر این اساس ٪۲۲ از چاه‌های دشت تبریز قابل حذف از چرخه‌ی نمونه‌برداری می‌باشند. لذا استفاده از اطلاعات کمکی ضمن افزایش دقت درون‌یابی سطح آب زیرزمینی منجر به کاهش تعداد نمونه-برداری‌ها و صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

واژگان کلیدی: روش کوکریجینگ، تئوری جک‌نایف، شبکه‌ی پایش، آبخوان تبریز.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

محدودیت‌ها و بحران‌های آبی یکی از اصلی‌ترین چالش‌های کشور ایران است، که ضرورت مدیریت صحیح منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد [۱]. مدیریت صحیح و توسعه‌ی استراتژی‌های اصلاحی هدفمند نیازمند ثبت تغییرات مکانی و زمانی مقادیر کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در شبکه‌ی پایش مربوطه می‌باشد [۲, ۳]. اندازه‌گیری سطح آب‌های زیرزمینی از طریق منابع نقطه‌ای (چاه‌های نمونه‌برداری) چندین بار در سال انجام شده [۴] و در ادامه سطح پیوسته‌ی آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات نقاط هم‌جوار با استفاده از روش‌های درون‌یابی محاسبه می‌شود [۵]. اطلاعات دقیقِ شبکه‌های پایش به منظور تعیین برنامه‌های بهره‌برداری آب برای انواع مصارف و یا ایجاد هر گونه سازه‌ی آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶]. توزیع نامناسب محل چاه‌های پایش یا تعداد ناکافی آن‌ها مانع از درک رفتار آبخوان‌ها و تعیین خصوصیات رفتاری آن‌ها می‌شود [۷]. از طرفی درصورتی‌که تعداد محل‌های نمونه‌برداری خیلی زیاد باشند اطلاعات به‌دست‌آمده زائد بوده و پایش پیوسته و بلندمدت آن پرهزینه (هزینه‌هایی اعم از حفر، تجهیز، نمونه‌برداری، نگهداری، آنالیز آزمایشگاهی) و ناکارآمد خواهد بود [۳, ۸]. همواره به دلیل وجود محدودیت‌های مختلف و نبود فرصت و بودجه‌ی کافی، در عمل امکان نمونه‌برداری کامل و به‌موقع از تمام چاه‌ها وجود ندارد [۹]. بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش با هدف دستیابی به حداکثر اطلاعات ممکن با انجام نمونه‌برداری از حداقل چاه‌ها با صرف حداقل زمان و هزینه یکی از چالش‌های اساسی در مطالعه‌ی شبکه‌های پایش می‌باشد [۱۰].

آب‌های زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان بیش‌ازحد مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [۷]. با توجه به محدودیت منابع آبی و بحران آب در ایران ذخایر آبی کشور به ویژه در حاشیه‌ی دریاچه ارومیه بیش‌ازحد کاهش‌یافته و منجر به بحرانی شدن دشت‌ها و در نتیجه بیلان منفی آن‌ها شده‌است [۴, ۱۱]. در طول دهه‌ی گذشته افت سطح آب و تأمین آب شرب در دشت تبریز نیز باعث شده این دشت جز مناطق ممنوعه برداشت آب زیرزمینی شود [۱۲]. در آبخوان‌هایی که با بهره‌برداری بیش‌ازحد مواجه می‌باشند، داشتن یک تخمین جامع، دقیق و قابل‌اعتماد از سطح آب‌ها زیرزمینی نیاز اساسی مدیران می‌باشد. بر این اساس ایجاد شبکه‌ی پایشی مناسب جهت بررسی دقیق میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در این دشت لازم و ضروری است.

برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی یک آبخوان الزاماً شبکه‌ی پایش با تراکم نمونه‌برداری بالا مناسب نبوده و با تراکم کمتر به ویژه برای آبخوان‌ها با گستره‌ی زیاد می‌توان به هدف طراحی رسید [۱۳]. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی وجود دارد که به دو دسته کلی هیدروژئولوژیکی و آماری تقسیم می‌شوند. روش هیدروژئولوژیکی بر پایه‌ی اطلاعات کمی و کیفی و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و آب زیرزمینی منطقه پیاده‌سازی می‌شوند [۶]. روش‌های آماری مورد استفاده در طراحی بهینه‌ی شبکه‌های پایش آب زیرزمینی شامل روش‌های زمین‌آماری، مونت‌کارلو، فیلتر کالمن، تجزیه‌وتحلیل مؤلفه اصلی[۱] (PCA) است که برای انواع طراحی‌های شبکه از قبیل تعیین زمان نمونه‌برداری، موقعیت مناسب چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. امروزه روش‌های داده‌کاوی مختلفی از جمله تئوری آنتروپی [۱۵]، بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری (مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۲] (PSO) [۱۳]، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[۳] (NSGA-II) [۱۶] و غیره) به عنوان مجموعه‌ی دیگری از روش‌های بهینه‌سازی شبکه‌های پایش مطرح می‌شوند. مزایا و معایب روش‌های طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های اندازه‌گیری به مقیاس پایش (میدانی یا منطقه‌ای)، هدف پایش، نوع داده‌های موجود (داده‌های کیفی و کمی، هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی) و ماهیت منطقه مورد بررسی (زون اشباع یا غیراشباع) وابسته می‌باشند. در دهه‌های گذشته پیشرفت‌های زیادی در استراتژی‌های پایش آب‌های زیرزمینی وجود داشته که اکثر آن‌ها بر رویکرد آماری تمرکز داشته‌اند [۱۷].

روش‌های زمین‌آماری به عنوان زیرمجموعه‌ای از روش‌های آماری، ضمن لحاظ اطلاعات عددی، رابطه‌ی مکانی بین اعداد را نیز لحاظ می‌کنند [۱۸]. روش‌های زمین‌آماری از روش‌های رایج برای آنالیز آب‌های زیرزمینی می‌باشند [۸].

۱ Principal Component Analysis
۲ Particle Swarm Optimization
۳ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

این روش‌ها اغلب دقیق‌ترین تخمین‌ها را ارائه می‌دهند؛ زیرا ساختار مکانی متغیرها را در نظر گرفته و امکان کمی‌سازی خطای تخمین مربوطه را فراهم می‌کنند [۱۹]. استفاده از رویکرد زمین‌آماری و تئوری جک‌نایف[۱] از جمله روش‌های مبنا و رایج در کاهش تعداد چاه‌های آب زیرزمینی می‌باشد [۱۸, ۲۰]. در قالب این روش ابتدا سطح پیوسته‌ای از نمونه-های موجود با استفاده از روش‌های درون‌یابی ایجاد می‌شود، در ادامه مقدار خطا در هر چاه برآورد شده و چاهی که کمترین خطا را داشته باشد حذف می‌شود. این فرآیند تا رسیدن به تعداد بهینه انجام می‌گردد. در این روش برای ایجاد سطح پیوسته از روش‌های مختلف درون‌یابی مانند وزن دهی معکوس فاصله[۲] (IDW)، توابع شعاع محور[۳] (RBF) و کریجینگ استفاده می‌شود [۷]. کریجینگ از جمله روش‌های رایج در پهنه‌بندی آب زیرزمینی می‌باشد [۳, ۵, ۷]. مقایسه-ی این روش با سایر روش‌های درون‌یابی از جمله IDW، توابع پایه شعاعی و چندجمله‌ای‌های سراسری و محلی نشان از قابلیت این روش در پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی می‌باشد [۱۸, ۲۱]. انواع روش‌های کریجینگ برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌های پایش در سیستم‌های آب زیرزمینی استفاده شده‌است [۵]. از روش کریجینگ برای بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش به صورت مستقیم در بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش کیفی آب زیرزمینی با روش جک‌نایف در دشت شمیل تخت در استان هرمزگان [۲۰]، در گستره‌ی آبخوان اوگالالا[۴] در تگزاس [۷]، در آبخوان بیترفلد/ولفن[۵] آلمان [۱۷] استفاده شده‌است. همچنین از این روش به صورت غیرمستقیم در روش مبتنی بر انتخاب نماینده[۶] در دشت نیشابور [۱]، در تلفیق با روش PCA در حوضه‌ی ماهش ورم[۷] کشور هند، در روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در دشت‌های اشتهارد [۶]، آستانه-کوچصفهان [۱۳] و دزفول-اندیمشک [۲۲] و در تئوری آنتروپی برای دشت سیلاخور [۱۵] و آبخوان شهر مشهد [۲۳]، در تلفیق با تحلیل عاملی همراه با تکنیک خوشه‌بندی برای بهینه‌سازی شبکه‌ی بارش رشته‌کوه‌های زاگرس [۲۴] استفاده و توصیه شده‌است. در اکثر مطالعات صورت گرفته با روش‌های زمین‌آماری تعیین چاه‌های نمونه-برداری شاخص و کاهش تعداد نمونه‌ها صرفاً با استفاده از اطلاعات چاه‌های دیگر مدنظر بوده‌است. در این مطالعات قابلیت استفاده از داده‌های کمکی و تأثیر آن‌ها در فرآیند استخراج اطلاعات یک چاه از چاه‌های مجاور بررسی نشده‌است. رویکردهای چند متغیره‌ی کریجینگ که با نام کوکریجینگ[۸] (CoK) شناخته می‌شوند می‌توانند برای انجام درون‌یابی مکانی از ترکیب اطلاعات یک یا چند متغیر ثانویه برای کاهش واریانس خطای پیش‌بینی متغیر اولیه استفاده کنند [۵]. براساس پژوهش‌های انجام شده، به‌کارگیری روش‌های چندمتغیره‌ی آماری مانند کوکریجینگ در اولویت‌بندی شاخص‌های کیفی، درک بهتری از تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب ایجاد می‌کنند [۲۵].

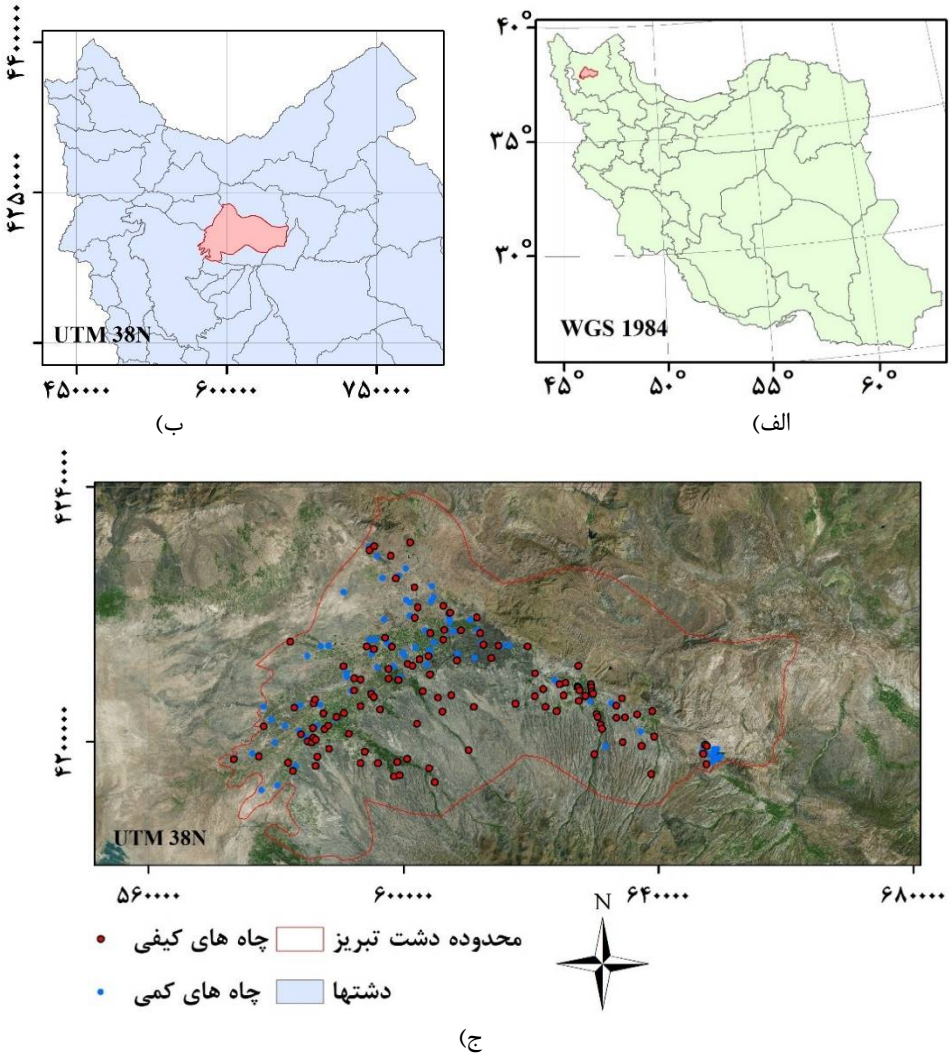
اگرچه در تحقیقات مختلفی از داده‌های کمکی برای درون‌یابی سطح آب‌های زیرزمینی استفاده شده و مزیت روش کوکریجینگ اثبات شده‌است، اما تاکنون از این روش برای کاهش تعداد چاه‌های پیزومتری شبکه‌ی پایش استفاده نشده‌است. از طرفی در روش جک نایف تأثیر روش‌های مختلف درون‌یابی در خروجی روش مورد بررسی قرار نگرفته‌است. لذا هدف اصلی این تحقیق استفاده از اطلاعات کمکی در روش کوکریجینگ برای پیاده‌سازی روش جک نایف به منظور کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری سطح آب زیرزمینی دشت تبریز می‌باشد. همچنین در این تحقیق نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد جک نایف با روش‌های مختلف درون‌یابی (کوکریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ عمومی) ارزیابی می‌شود. بدین منظور برای مقایسه‌ی خروجی هر روش از معیاری شبیه به ضریب همبستگی که در این تحقیق توسعه داده شده استفاده می-گردد. اطلاعات کمکی استفاده شده مجموعه‌ای از پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی برداشت شده از چاه‌های نمونه‌برداری کیفی می‌باشد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده

محدوده منطقه‌ی مطالعاتی (دشت تبریز) در شکل ۱ نمایش داده شده‌است. این دشت از شمال به دامنه‌های جنوبی کوه‌های میشو، از جنوب به دامنه‌های شمالی سهند، از غرب به اراضی شوره‌زار دریاچه‌ی ارومیه و از شرق به شهر

۱ Jacknife
۲ Inverse Distance Weighting
۳ Radial Basis Function
۴ Ogallala
۵ Bitterfeld/Wolfen
۶ Election-Kriging Method
۷ Maheshwaram Catchment
۸ CoKriging

تبریز محدود می‌گردد. شهر تبریز مهم‌ترین و بزرگ‌ترین شهر واقع در این دشت می‌باشد. رود اصلی دشت آجی چای است. درجه‌ی حرارت متوسط سالانه‌ی منطقه مورد مطالعه بر اساس اندازه‌گیری ایستگاه سینوپتیک تبریز، ۱۳/۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در ایستگاه تبریز، متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۲۵۰/۶۹ میلی‌متر در سال، حداکثر مقدار تبخیر و تعرق مربوط به تیرماه با ۲۵۸/۶ میلی‌متر و حداقل تبخیر و تعرق مربوط به دی‌ماه با ۳۴/۹ میلی‌متر می‌باشد.



الف) ب) ج)

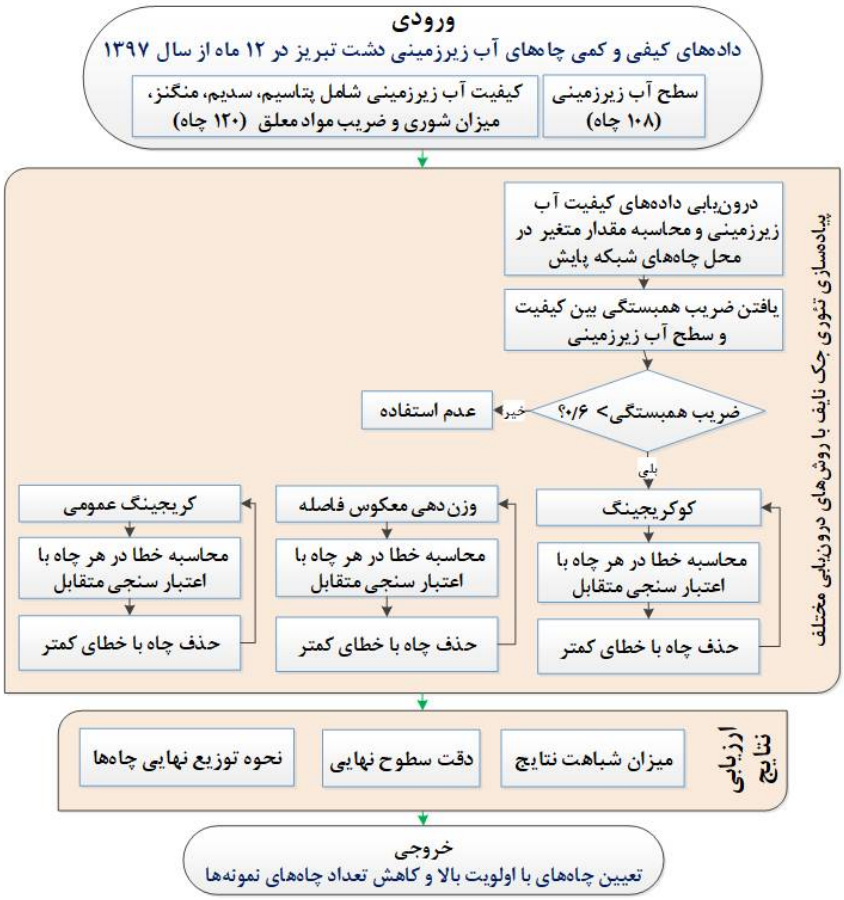
شکل ۱. منطقه‌ی مطالعاتی: الف) کشور ایران، ب) شمال غرب ایران، ج) محدوده‌ی دشت تبریز

آبخوان دشت تبریز افزون بر گستره‌ی بزرگ دارای ساختمان هندسی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی پیچیده‌ای می‌باشد. در لایه‌ی آبدار اول و دوم دشت تبریز کیفیت و فشار پیزومتریک متفاوت است [۳۰]. لایه‌ی آبدار سوم و چهارم دارای کیفیتی مشابه لایه‌ی دوم بوده و تنها از نظر فشار پیزومتریک اندکی تفاوت دارد. مبنع اصلی تغذیه‌ی لایه‌ی آبدار سطحی (اول) در بستر گستره‌ی دشت تبریز جریان آب رودخانه‌ی آجی چای، نفوذ آب باران و پساب‌های شهری است. در این تحقیق از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای سطح و کیفیت آب زیرزمینی لایه‌ی اول (لایه‌ی آزاد) برداشت شده در سال ۱۳۹۷ استفاده شده‌است. داده‌های این تحقیق از شرکت مدیریت منابع آب ایران دفتر مطالعات پایه‌ی منابع آب دریافت شد.

۳- روش‌شناسی

در طراحی شبکه‌های پایش، انتخاب موقعیتِ ایستگاه‌های بااهمیت به‌گونه‌ای که اطلاعات ضروری و نه مازاد را در اختیار قرار دهند، همواره مورد توجه بوده‌است. مراحل پیاده‌سازی تحقیق در شکل ۲ ارائه شده‌است. در این تحقیق بعد از جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از رویکرد جک

نایف چاه‌هایی که در هر مرحله اطلاعات کمتری به شبکه اضافه می‌کنند، مشخص می‌شوند. با توجه به اینکه نتایج روش جک‌نایف به روش درون‌یابی استفاده شده وابسته است، در روش جک‌نایف از سه روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، کریجینگ عمومی[1] (UK) و CoK برای درون‌یابی استفاده می‌شود تا خروجی روش‌ها با هم مقایسه شوند. برای پیاده‌سازی روش CoK ابتدا همبستگی بین مقدار سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی با مقادیر پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی مقدار ضریب همبستگی پیرسون با توجه به اینکه موقعیت مکانی چاه‌هایی که اطلاعات کمی و کیفی برداشت شده‌اند با هم تفاوت دارد؛ ابتدا از درون‌یابی UK استفاده شده و مقدار متغیرهای کیفی آب زیرزمینی در محل چاه‌هایی که سطح آب زیرزمینی برداشت شده‌اند محاسبه می‌شود. در ادامه از داده و یا داده-هایی که همبستگی آن‌ها بالاتر از ۰/۶ باشد، برای پیاده‌سازی روش CoK در رویکرد جک نایف استفاده می‌شود. در ادامه نتایج تحقیق از نظر میزان شباهت، دقت سطوح نهایی و نحوه توزیع چاه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این مطالعه روشی نوین برای ارزیابی میزان شباهت خروجی روش‌های ارزیابی شده ارائه شده‌است که در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۲. روندی نمای تحقیق

۳-۱- تئوری جک‌نایف

روش بازنمونه‌گیری جک‌نایف یک روش نمونه‌گیری بدون جایگذاری است که برای برآورد مقدار اریبی و واریانس مناسب و مفید می‌باشد. در این روش با نگرشی آماری به وضعیت ایستگاه‌های موجود در شبکه‌ی پایش، آمار و اطلاعات آن‌ها و همچنین ارتباط مکانی ایستگاه‌ها با یکدیگر، امکان حذف ایستگاه‌های مازاد بررسی می‌شود. روند پیاده-سازی روش جک نایف بدین صورت است که مشاهدات تک‌به‌تک از نمونه‌ی اصلی خارج شده و نمونه‌ی جک‌نایف ایجاد می‌شود. فرض کنید n داده از منطقه وجود دارد. در این روش ابتدا با استفاده از داده‌های n-1 چاه، سطح پیوسته

۱ Universal Kriging

از منطقه (با استفاده از روش‌های درون‌یابی) ایجاد شده و مقداری برای چاه لحاظ نشده محاسبه می‌شود. مقایسه‌ی بین مقدار واقعیِ سطح آب زیرزمینی و مقدار برآورد شده برای چاه حذف‌شده با استفاده از روش‌های درون‌یابی، نشان‌دهنده‌ی مقدار خطا در آن محل در صورت حذف چاه است. به عبارت دیگر اختلاف زیاد بین مقدار واقعی سطح آب زیرزمینی چاه حذف‌شده و مقدار برآورد شده برای چاه حذف‌شده ارزش اطلاعاتی چاه را نشان می‌دهد. اختلاف زیاد بین مقدار واقعی و برآورد شده نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در موقعیت چاه حذف شده با استفاده از سایر چاه‌ها قابل برآورد نخواهد بود. در ادامه این خطا برای تمامی چاه‌ها محاسبه می‌شود [۲۰]. در نهایت چاهی که کمترین اختلاف بین مقدار محاسبه شده با روش‌های درون‌یابی و مقدار واقعی را داشته در اولویت برای حذف خواهد بود، چرا که با حذف آن چاه خطای کمتری به سطح وارد می‌شود [۱۸]. در ادامه، رویکرد جک‌نایف برای سایر نقاط باقیمانده پیاده‌سازی می‌شود تا مقدار خطا در صورت حذف این چاه‌ها نیز برآورد گردد. در ادامه مقایسه‌ی تعداد نقاط حذف‌شده و خطای ایجاد شده در قالب نموداری ترسیم شده و بر اساس نظرات کارشناسی و بودجه مالی تعداد چاه‌های مناسب مشخص می‌شود. در این روش برای محاسبه‌ی مقادیر چاه‌های حذف شده از چاه‌های باقیمانده، از روش‌های مختلف درون‌یابی می‌توان استفاده کرد. لذا نتیجه‌ی پیاده‌سازی جک‌نایف به روش درون‌یابی استفاده شده وابسته است.

در این فرآیند سلیقه کاربر به هیچ وجه تعیین کننده نبوده و کل فرآیند براساس مقدار خطای روش‌های درون‌یابی در برآورد مقدار سطح آب زیرزمینی یک چاه در صورت حذف آن چاه انجام می‌شود.

۳-۲- درون‌یابی

در مطالعات پدیده‌های جغرافیایی مانند بارش، شرایط آب و هوایی، سطح و کیفیت آب‌های زیرزمینی و غیره عملاً برداشت اطلاعات در تمامی نقاط ممکن نیست، لذا برداشت اطلاعات در تعدادی نقطه‌ی معین انجام شده و مقادیر سایر نقاط با استفاده از روش‌های درون‌یابی محاسبه می‌شود. نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهد انتخاب بهترین و بهینه‌ترین روش درون‌یابی به پارامترهای زیادی وابسته بوده و عملاً روشی غالب بدین منظور وجود ندارد. روش‌های درون‌یابی به دو دسته‌ی قطعی و زمین‌آماری تقسیم می‌شوند [۵]. تفاوت عمده‌ی این روش‌ها مربوط به نحوه‌ی محاسبه‌ی وزنی است که به نقاط مشاهده شده اطراف نقطه مجهول داده می‌شود. روش‌های قطعی با استفاده از تابع ریاضی یک مقدار معین را مشخص می‌کنند اما روش‌های زمین‌آماری از تخمین‌های احتمالی مانند واریانس استفاده می‌کند [۱]. در این تحقق از روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) به عنوان یک روش قطعی درون‌یابی و از کریجینگ به عنوان روشی زمین‌آماری که هر دو از رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی هستند، استفاده می‌شود.

۳-۲-۱- وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)

روش وزن‌دهی معکوس فاصله از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی قطعی می‌باشد که وزن نقاط نمونه‌برداری در همسایگی نقطه‌ی مجهول بر اساس تابع ریاضی فاصله‌ای بین نقاط معلوم و نقطه‌ی مجهول محاسبه می‌شود [۶]. این اوزان توسط توان در IDW کنترل می‌شوند، به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه‌ی مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به صورت یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله‌ی آن‌ها را در نظر می‌گیرد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند. فرض اصلی این روش این است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه برآورد، شباهت بیشتری نسبت به نقاط دورتر دارد [۲۱]. در این روش خطای برآورد محاسبه نشده و به شکل قرارگیری نمونه‌ها توجهی نمی‌شود. این روش به دلیل اینکه محاسبات ساده‌ای دارد مناسب برای درون‌یابی داده‌های حجیم است.

۳-۲-۲- کریجینگ

از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ به عنوان یک روش درون‌یابی، استفاده از ساختار فضایی نقاط و برآوردهای احتمالاتی مانند واریانس در فرآیند درون‌یابی می‌باشد که به ازای هر تخمین، خطای مرتبط با آن را نیز محاسبه می‌کند [۶]. لذا برای هر مقدار تخمین زده شده، می‌توان دامنه‌ی اطمینان آن را محاسبه کرد. کریجینگ به کمک مقادیر نقاط مجاور و وزن‌های تعیین شده توسط مدل نیم تغییرنما (واریوگرام) به برآورد مقادیر نقاط مجهول می‌پردازد [۲۰, ۲۱]. واریوگرام نموداری است که میزان وابستگی نمونه‌های

مجاور بر اساس فاصله‌های مختلف را نشان می‌دهد [۲۴]. این روش بهترین تخمین‌گر نااریب[۱] در میان روش‌های درون‌یابی می‌باشد [۱۵]. روش کریجینگ انواع مختلف از جمله کریجینگ ساده[۲]، معمولی[۳]، عمومی[۴]، شاخص[۵]، کوکریجینگ و غیره دارد [۱۹]. تفاوت روش‌های کریجینگ به تفاوت آن‌ها در فرضیاتشان برمی‌گردد. در کریجینگ عمومی (UK) که یکی از رایج‌ترین روش‌های کریجینگ است، مقدار میانگین متغیر و نامعلوم می‌باشد. کریجینگ عمومی یک رابطه‌ی خطی بین مقدار مورد انتظار و مختصات مکانی در همسایگی، شبیه به روند، فرض می‌کند [۵]. لذا در شرایط حضور روند و ناتوانی در مدل‌سازی مستقل آن، کریجینگ عمومی، مناسب‌ترین گزینه در بین تخمین‌گرهای مختلف کریجینگ است. در درون‌یابی به روش کریجینگ لازم است داده‌ها نرمال باشند [۲۱]. بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های مختلفی از جمله آزمون کلموگروف-اسمیرنوف قابل انجام می‌باشد. در صورت نرمال نبودن داده‌ها باید ابتدا داده‌ها تصحیح و سپس درون‌یابی شوند [۲۰].

روش کوکریجینگ گونه‌ای از روش‌های کریجینگ می‌باشد که با در نظر گرفتن رابطه‌ی فضایی بین متغیر اصلی و متغیر دیگری که با متغیر اصلی همبستگی بالایی داشته باشد مقادیر مجهول را تخمین می‌زند. تحقیقات نشان داده اگر متغیر اولیه با ویژگی‌های ثانویه همبستگی متقابل داشته باشد، گنجاندن اطلاعات اضافی می‌تواند دقت تخمین را بهبود بخشد [۵]. در آمار کلاسیک روش‌های چند متغیره برای تخمین وجود دارد، در زمین‌آمار هم می‌توان از روش کوکریجینگ که بر اساس همبستگی مکانی بین داده‌ها عمل می‌کند، محاسبات را با دقت بیشتری انجام داد [۲۵]. در واقع تخمین‌گر کوکریجینگ همان کریجینگ توسعه‌یافته‌است که در آن متغیرهای ثانویه (متغیرهای کمکی) نیز لحاظ شده‌اند. تخمینگر کوکریجینگ برای مواردی استفاده می‌شود که دو متغیر دارای تغییرات مکانی بوده و از یک متغیر به اندازه کافی نمونه‌برداری نشده باشد. در این تحقیق برای پیاده‌سازی روش کوکریجینگ از داده‌های کیفیت آب زیرزمینی به عنوان داده ثانویه (کمکی) استفاده می‌شود. از بین مجموعه اطلاعات برداشت شده در شبکه‌ی پایش کیفیت آب زیرزمینی داده‌ای انتخاب می‌شود که همبستگی بالاتر از ۰/۶ با سطح آب زیرزمینی داشته باشد.

۳-۳- نحوه ارزیابی نتایج

ارزیابی خروجی تحقیق با سه رویکرد میزان شباهت خروجی روش‌های مختلف درون‌یابی به کار رفته در رویکرد جک‌نایف، ارزیابی دقت سطوح ایجاد شده از هر روش و بررسی نحوه‌ی توزیع چاه‌ها حذف شده انجام می‌شود.

۳-۳-۱- بررسی میزان شباهت نتایج

برای بررسی میزان شباهت نتایج از پارامتری شبیه به ضریب همبستگی که در این تحقیق توسعه داده شده‌است استفاده می‌شود. فرآیند پیاده‌سازی روش جک نایف مرحله به مرحله بوده و در هر مرحله چاه‌ها با اولویت پایین‌تر حذف می‌شوند. در هر مرحله میزان شباهت نتایج روش‌های IDW، کریجینگ عمومی و کوکریجینگ از نظر تعداد چاه‌های حذف‌شده‌ی مشترک بین روش‌ها قابل محاسبه می‌باشد. در این مرحله میزان شباهت نتایج روش‌های IDW، کریجینگ عمومی و کوکریجینگ از نظر تعداد چاه‌های حذف‌شده‌ی مشترک بین روش‌ها قابل محاسبه می‌باشد. برای محاسبه متوسط درصد شباهت روش‌ها رابطه‌ی ۱ قابل استفاده می‌باشد:

$$I = \frac{I_{IDW,UK} + I_{IDW,CoK} + I_{UK,CoK}}{3 * n} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق I متوسط درصد شباهت، $I_{IDW,UK}$ تعداد چاه‌های مشترک بین IDW و UK، $I_{IDW,CoK}$ تعداد چاه‌های مشترک بین IDW و CoK، $I_{UK,CoK}$ تعداد چاه‌های مشترک بین CoK و UK و n تعداد چاه‌های حذف شده می‌باشد. در این فرمول ابتدا متوسط تعداد چاه‌های مشابه به هم که به صورت دو به دو بین روش‌ها محاسبه شده برآورد می‌شود. در ادامه درصد چاه‌های مشترک به کل چاه‌های حذف شده تعیین می‌شود. بدین صورت برای هر سه روش مشخص می‌شود که اگر n چاه حذف شود، چند درصد از چاه‌های حذف‌شده دو به دو، بین این سه روش مشترک است. بدین صورت برای هر سه روش مشخص می‌شود که اگر n چاه

۱ Best Linear Unbiased Estimator
۲ Simple
۳ Ordinary
۴ Universal
۵ Indicator

حذف شود، چند درصد از چاه‌های حذف‌شده دو به دو بین این سه روش مشترک است. در پیاده‌سازی این رویکرد باید توجه کرد که در تئوری جک نایف به دلیل نزدیکی دو چاه ممکن است با اختلاف جزئی دو چاه مجاور در اولویت حذف باشند. مثلاً اگر دو چاه t و p با فاصله مکانی کمتر از ۱ کیلومتر که سطح آب زیرزمینی آن‌ها با هم اختلافی برابر با ۰/۵ متر دارد وجود داشته‌باشد، ممکن است در یک روش چاه t در اولویت حذف باشد و در روش دیگر چاه شماره‌ی p در اولویت حذف قرار گیرد. از طرفی بعد از حذف شدن یک چاه (مثلاً t)، در تئوری جک‌نایف به دلیل اینکه چاه حذف شده (t) دیگر در برآورد چاه باقیمانده (p) استفاده نمی‌شود، همواره چاه باقیمانده (p) اهمیت بالاتری داشته و در بین چاه‌های حذف شده نخواهد بود. لذا با وجود این‌که این دو چاه اهمیت یکسانی برای شبکه دارند ولی ارزش آن‌ها متفاوت برآورد می‌شود. برای لحاظ این مورد چاه‌هایی که حداکثر یک کیلومتر با چاه دیگر فاصله داشته و مقادیر آن‌ها کمتر از ۱ متر با هم اختلاف داشته باشند، در یک سطح از اولویت لحاظ می‌شوند. لذا اگر چاه t در لیست چاه‌های حذف شده یک روش و چاه p در لیست روش دیگر باشد، با توجه به فاصله کم و مقادیر نزدیک آن‌ها به عنوان چاه مشابه شمارش می‌شود.

۳-۳-۲- ارزیابی دقت سطح نهایی

یکی از روش‌های ارزیابی بررسی مقدار خطای ایجاد شده در چاه‌های حذف‌شده می‌باشد که با استفاده از تکنیک ارزیابی متقابل انجام می‌شود [۶، ۲۵]. در این روش، در هر مرحله با استفاده از چاه‌های باقیمانده یک سطح پیوسته ایجاد شده و مقدار خطای سطح محاسبه می‌شود [۲۱]. مثلاً در مرحله‌ی ۱۰، که ۱۰ چاه حذف‌شده، با استفاده از n-10 چاه موجود سطح پیوسته‌ای ایجاد شده و مقدار خطای سطح جدید محاسبه می‌شود. هر چه مقدار خطای سطح کمتر باشد نشان‌دهنده‌ی دقت روش درون‌یابی استفاده شده می‌باشد. برای محاسبه‌ی دقت سطح جدید در ارزیابی متقابل مقدار خطا در هر کدام از چاه با فرض حذف شدن آن محاسبه می‌شود. معیارهای مختلفی برای تعیین مجموع خطاها در روش‌های درون‌یابی وجود دارد که از جمله‌ی مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خطای جذر میانگین مربعات[۱] (RMSE) اشاره کرد [۶، ۱۵]. مقدار RMSE با رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه X_p مقدار محاسبه شده، X_r مقدار زمینی و n تعداد چاه‌های استفاده شده در ایجاد سطح جدید می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(X_p - X_r)^2}{n}} \qquad (۲)$$

۳-۳-۳- بررسی نحوه‌ی توزیع چاه‌ها قابل حذف

طراحی و تعیین تراکم نقاط اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در واحد سطح آبخوان بر حسب گستره و وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی آبخوان، اهداف و محدودیت‌های مالی از پیش تعیین شده متفاوت می‌باشد [۶]. در طراحی شبکه‌ی چاه‌های آبخوان آزاد تراکم مناسب و قابل قبولی که پیشنهاد می‌شود، ۴ حلقه چاه مشاهده‌ای برای هر ۱۰۰ کیلومترمربع آبخوان است [۲۶]. البته لازم به ذکر است که ضوابط طراحی شبکه‌ی پایش کمی آب زیرزمینی بیشتر در اضافه نمودن چاه، در نقاط تنک شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد [۱۳]. با این وجود توزیع چاه‌های قابل حذف نباید به‌گونه‌ای باشد که توزیع کلی نقاط در شبکه را تغییر دهد. یکنواخت بودن توزیع چاه‌های نهایی انتخاب شده در منطقه نشان دهنده‌ی دقت قابل قبول روش می‌باشد [۱].

۳-۴- نتایج و بحث

برای پیاده‌سازی این تحقیق از نرم‌افزار ArcGIS10.4.1 و SPSS 19 استفاده شد. خلاصه‌ی آماری داده‌های استفاده شده در جدول ۱ مشخص می‌باشد. برای انجام درون‌یابی کریجینگ، متغیر مورد نظر باید دارای توزیع نرمال باشد. برای کنترل نرمال بودن داده‌ها با توجه به تعداد کم نمونه‌ها (۱۰۸ چاه) به اقتباس از Ghorbani, Salarjazi [۲۱] از آزمون کلموگروف- اسمیرنوف استفاده شد. در آزمون مربوطه، سطح معناداری[۲] (Sig.) برابر با ۰/۰۰۱ (کوچک‌تر از ۰/۰۵) محاسبه شد که نشان داد داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند. نرمال نبودن داده‌های آب زیرزمینی در تحقیقات مختلفی مشاهده شده که از جمله دلایل آن کم بودن حجم داده‌ها در بعد زمان و مکان بیان شده‌است [۲۳]. با توجه به اینکه داده‌های این تحقیق توزیع نرمال ندارند داده‌ها با استفاده از

۱ Root Mean Square Error

۲ Significance level

تابع لگاریتمی (Log) نرمال‌سازی شدند. برای پیاده‌سازی روش کوکریجینگ در رویکرد جک‌نایف ضریب همبستگی بین داده‌های سطح آب زیرزمینی و داده‌های پارامترهای کیفی آب زیرزمینی محاسبه شد.

جدول ۱. خلاصه‌ی آماری داده‌های سطح و کیفیت آب زیرزمینی

	کمیت	کیفیت				
	سطح آب زیرزمینی	سختی کل آب	منگنز	سولفات	کلر	اسیدیته
کمینه	۱۲۶۸/۵۴	۶۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۱	۰/۲	۳/۸۵
بیشینه	۱۷۴۰/۶۷	۲۹۶۰/۰	۲۰/۱	۱۸/۳۵	۹۶/۷۵	۸/۸
میانگین	۱۴۰۹/۰۲	۵۶۹/۲۱	۴/۷۱	۴/۰۲	۱۵/۱۳	۷/۷۴
انحراف معیار	۲۰/۶۲	۵۵۳/۱۴	۴/۵۲	۳/۶۶	۲۱/۴۸	۰/۸۳
تعداد	۱۰۸	۹۷	۹۶	۹۶	۹۷	۹۷

برای این کار با توجه به اینکه موقعیت چاه‌هایی که سطح آب زیرزمینی در آن‌ها برداشت شده با موقعیت مکانی چاه‌هایی که پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در آن‌ها اندازه‌گیری شده متفاوت است، مستقیماً نمی‌توان ضریب همبستگی را محاسبه کرد. لذا ابتدا مقدار پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در موقعیت چاه‌هایی که برداشت سطح آب زیرزمینی انجام شده با استفاده از سطح خروجی روش UK محاسبه شد. ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده در نرم‌افزار SPSS به صورت جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. ضریب همبستگی محاسبه شده بین سطح آب زیرزمینی و پارامترهای کیفی آب زیرزمینی

	سطح آب زیرزمینی	سختی کل آب	منگنز	سولفات	کلر	اسیدیته
سطح آب زیرزمینی	۱	-۰/۴۶	-۰/۴۵	-۰/۴۰	-۰/۶۱	-۰/۲۴
سختی کل آب		۱	۰/۸۸	۰/۷۴	۰/۷۷	-۰/۳۵
منگنز			۱	۰/۷۴	۰/۷۶	-۰/۳۷
سولفات				۱	۰/۶۹	-۰/۳۰
کلر					۱	-۰/۳۲
اسیدیته						۱

مقادیر ضریب همبستگی پیرسون نشان می‌دهد که بین سطح آب زیرزمینی و تمامی پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده همبستگی منفی وجود دارد. نتیجه‌ای مشابه با این تحقیق در مطالعه‌ی Choubin and Malekian [۲۷] نیز مشاهده شده‌است. در علوم مکانی ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۶، ضریب همبستگی بالا محسوب می‌شود [۲۹]؛ لذا در اجرای روش کوکریجینگ از داده‌های مربوط به کلر به عنوان داده کمکی استفاده شد. نحوه استفاده بدین صورت است که در هنگام پیاده‌سازی روش کوکریجینگ، داده کلر به عنوان مجموعه داده‌ی ثانویه وارد محاسبات می‌شود. در تمامی نتایج ارائه شده برای روش کوکریجینگ مقدار کلر در خروجی روش لحاظ شده است.

برای پیاده‌سازی رویکرد جک نایف هر کدام از روش‌های IDW، UK و CoK به تعداد ۱۰۸ بار اجرا شدند. شماره چاه‌های حذف شده در هر مرحله‌ی تکرار به صورت جدول ۳ می‌باشد. در جدول ۳ می‌بایست شباهت چاه‌هایی که حداکثر یک کیلومتر با چاه دیگر فاصله داشته و مقادیر آن‌ها کمتر از ۱ متر با هم اختلاف داشته‌اند نیز لحاظ گردد. این شرط در هشت جفت چاه از چاه‌های موجود صدق کرد. جدول ۴۲ میزان شباهت نتایج روش‌ها بر اساس تعداد چاه‌های مشترک به ازای تعداد مختلف از چاه‌های حذف‌شده را ارائه می‌دهد. برای نمونه زمانی که تعداد چاه‌های حذف‌شده ۲۰ چاه است، تعداد چاه‌های حذف‌شده مشابه در هر دو روش IDW و UK 13 چاه، در روش‌های IDW و CoK 14 چاه و چاه‌های مشابه حذف‌شده بین روش UK و CoK 10 چاه می‌باشد.

جدول ۳. شماره‌ی چاه حذف‌شده در هر مرحله از اجرا تئوری جک نایف با روش‌های IDW، UK و CoK

تکرار	کوکریجینگ	کریجینگ	IDW	تکرار	کوکریجینگ	کریجینگ	IDW	تکرار	کوکریجینگ	کریجینگ	IDW
۱	۴۸	۵۴	۹۹	**۳۷**	۶۹	۱۰۰	۲۱	**۷۳**	۵۳	۱۰۴	۳۳
۲	۳۵	۶۱	۴۲	**۳۸**	۷۷	۹۷	۴	**۷۴**	۴۵	۵۹	۸۵
۳	۴۲	۵	۵۶	**۳۹**	۲۷	۶	۶۹	**۷۵**	۸۰	۴۵	۶۸
۴	۲۸	۵۶	۵۵	**۴۰**	۱۰	۳	۱۷	**۷۶**	۹۶	۱۸	۹۳
۵	۱۳	۹۹	۹۰	**۴۱**	۳۷	۴۰	۸۷	**۷۷**	۴	۲۳	۱۰۴
۶	۹۹	۵۰	۹	**۴۲**	۱۰۰	۶۹	۸۹	**۷۸**	۱۷	۳۴	۱۰۵
۷	۵۶	۵۷	۱۳	**۴۳**	۲۱	۲۹	۹۷	**۷۹**	۷	۸۴	۷۸
۸	۱۴	۴۲	۷۲	**۴۴**	۴۹	۲۴	۱۹	**۸۰**	۱۶	۴	۹۲
۹	۶۱	۶۴	۱۴	**۴۵**	۶	۱۷	۱۸	**۸۱**	۳	۱۰۵	۷۶
۱۰	۷۲	۱۰۱	۱۰۰	**۴۶**	۵۸	۲	۲۲	**۸۲**	۶۳	۱۰۲	۶۰
۱۱	۴۷	۱۳	۵	**۴۷**	۹	۱	۴۹	**۸۳**	۱۰۵	۹۸	۸۸
۱۲	۵۴	۹۵	۵۰	**۴۸**	۶۰	۷	۷۷	**۸۴**	۱۰۳	۹۶	۳۵
۱۳	۵	۳۲	۵۴	**۴۹**	۸۶	۱۹	۵۷	**۸۵**	۳۰	۸۹	۷۰
۱۴	۰	۷۵	۶۴	**۵۰**	۱۰۴	۳۷	۸	**۸۶**	۷۶	۴۶	۷۱
۱۵	۶۶	۶۶	۲۸	**۵۱**	۳۸	۳۶	۵۲	**۸۷**	۴۶	۷۳	۳۶
۱۶	۹۵	۷۲	۹۵	**۵۲**	۱۰۷	۸۳	۱۰۳	**۸۸**	۴۴	۱۰۶	۹۸
۱۷	۷۵	۳۵	۷۵	**۵۳**	۸۳	۸۵	۳۴	**۸۹**	۴۳	۷۴	۹۶
۱۸	۵۵	۴۸	۰	**۵۴**	۳۳	۴۷	۵۱	**۹۰**	۷۴	۹۲	۱۰۲
۱۹	۵۲	۳۹	۶	**۵۵**	۱	۷۷	۸۶	**۹۱**	۷۳	۷۶	۲۳
۲۰	۵۰	۲۵	۶۷	**۵۶**	۱۰۶	۱۶	۸۲	**۹۲**	۹۸	۱۲	۸۴
۲۱	۶۷	۵۲	۷	**۵۷**	۵۹	۸۶	۴۷	**۹۳**	۹۳	۳۰	۴۸
۲۲	۳۹	۵۵	۳۲	**۵۸**	۸۴	۷۹	۱۰۷	**۹۴**	۷۰	۴۴	۷۹
۲۳	۱۵	۱۰۳	۲۰	**۵۹**	۸۵	۹۱	۸۰	**۹۵**	۴۱	۴۳	۴۴
۲۴	۹۰	۶۸	۱۰	**۶۰**	۹۳	۹۳	۵۸	**۹۶**	۱۲	۶۳	۴۳
۲۵	۳۲	۲۲	۸۳	**۶۱**	۵۱	۸۷	۸۱	**۹۷**	۶۲	۶۲	۶۵
۲۶	۱۹	۸	۱۰۱	**۶۲**	۹۴	۸۸	۱۰۶	**۹۸**	۷۱	۷۱	۶۶
۲۷	۶۴	۶۷	۳۸	**۶۳**	۷۸	۹۰	۴۶	**۹۹**	۱۱	۷۰	۹۱
۲۸	۸	۲۷	۲۵	**۶۴**	۸۷	۱۰۷	۴۵	**۱۰۰**	۳۱	۲۶	۱۱
۲۹	۱۰۱	۱۰	۱	**۶۵**	۲۹	۱۵	۳۷	**۱۰۱**	۲۳	۲۰	۶۳
۳۰	۹۷	۰	۲	**۶۶**	۸۸	۷۸	۵۳	**۱۰۲**	۷۹	۴۱	۶۲
۳۱	۲۵	۳۸	۲۹	**۶۷**	۸۹	۵۸	۵۹	**۱۰۳**	۲۰	۸۰	۷۳
۳۲	۲۲	۹	۳۹	**۶۸**	۸۲	۴۹	۹۴	**۱۰۴**	۹۱	۹۴	۱۵
۳۳	۱۸	۶۰	۴۱	**۶۹**	۲۴	۳۳	۲۶	**۱۰۵**	۶۵	۳۱	۲۴
۳۴	۶۸	۵۱	۴۰	**۷۰**	۸۱	۵۳	۳۰	**۱۰۶**	۱۰۲	۶۵	۳۱
۳۵	۴۰	۱۴	۱۶	**۷۱**	۵۷	۸۱	۳	**۱۰۷**	۳۶	۱۱	۱۲
۳۶	۲	۲۱	۶۱	**۷۲**	۳۴	۸۲	۲۷	**۱۰۸**	۲۶	۲۸	۷۴

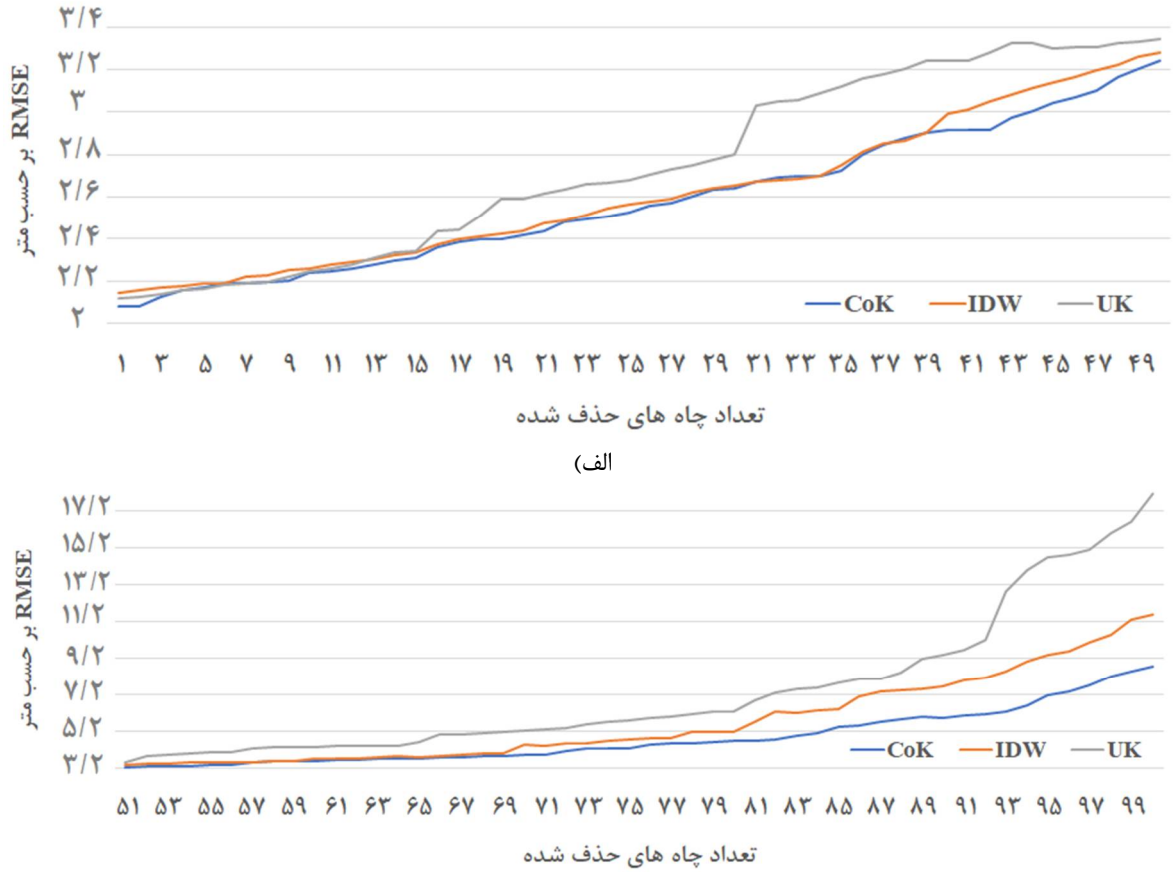
جدول ۴. بررسی میزان شباهت نتایج تئوری جک‌نایف به ازای روش‌های IDW، UK و CoK

چاه‌های حذف‌شده	میزان شباهت نتایج	چاه‌های حذف‌شده	میزان شباهت نتایج
۱۰	IDW UK CoK ۶ ۳ ۱۰ CoK ۴ ۱۰ UK ۱۰ IDW متوسط شباهت $= ۱۰۰ \times \left(\left(\frac{۳+۴+۶}{۳}\right)/۱۰\right)$ ۴۳٪	۲۰	IDW UK CoK ۱۵ ۱۲ ۲۰ CoK ۱۲ ۲۰ UK ۲۰ IDW متوسط شباهت= ۶۵ درصد
۳۰	IDW UK CoK ۲۰ ۱۵ ۳۰ CoK ۲۰ ۳۰ UK ۳۰ IDW متوسط شباهت= ۶۱ درصد	۴۰	IDW UK CoK ۲۷ ۲۷ ۴۰ CoK ۳۰ ۴۰ UK ۴۰ IDW متوسط شباهت= ۷۰ درصد
۵۰	IDW UK CoK ۳۹ ۳۷ ۵۰ CoK ۳۷ ۵۰ UK ۵۰ IDW متوسط شباهت= ۷۵ درصد	۶۰	IDW UK CoK ۴۷ ۴۹ ۶۰ CoK ۵۰ ۶۰ UK ۶۰ IDW متوسط شباهت= ۸۱ درصد
۷۰	IDW UK CoK ۵۹ ۶۰ ۷۰ CoK ۵۸ ۷۰ UK ۷۰ IDW متوسط شباهت= ۸۴ درصد	۸۰	IDW UK CoK ۷۴ ۷۴ ۸۰ CoK ۷۳ ۸۰ UK ۸۰ IDW متوسط شباهت= ۹۲ درصد
۹۰	IDW UK CoK ۸۴ ۸۲ ۹۰ CoK ۸۲ ۹۰ UK ۹۰ IDW متوسط شباهت= ۹۲ درصد	۱۰۰	IDW UK CoK ۹۶ ۹۴ ۱۰۰ CoK ۹۶ ۱۰۰ UK ۱۰۰ IDW متوسط شباهت= ۹۵ درصد

بر اساس جدول فوق مشخص است که نتایج بین روش‌های مختلف در تئوری جک‌نایف شباهت‌ها و البته مغایرت‌هایی با هم دارند. هر چه تعداد چاه‌های حذف‌شده افزایش می‌یابد نسبت چاه‌های مشابه حذف‌شده نیز افزایش می‌یابد. در بین روش‌های بررسی شده شباهت روش IDW و CoK بیشتر می‌باشد. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود

که استفاده از روش‌های درون‌یابی در تئوری جک‌نایف به صورت متوسط ۴۰ الی ۱۰ درصد نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا تعیین روش و انتخاب صحیح روش می‌تواند نقش تأثیرگذاری در بهینه بودن شبکه‌ی پایش داشته باشد.

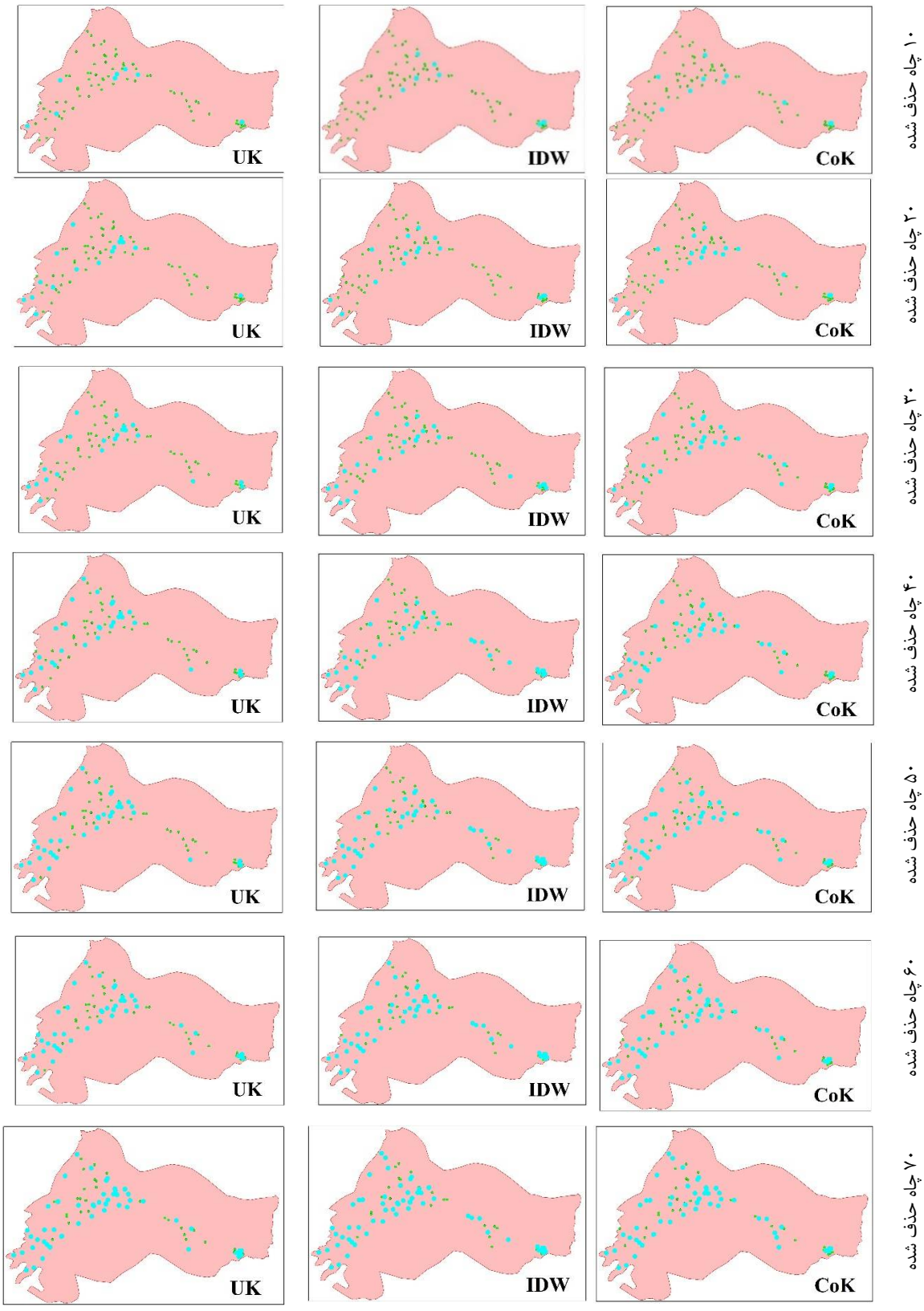
در این مرحله برای یافتن بهترین روش درون‌یابی، مقدار خطای ایجاد شده در سطح جدید برحسب RMSE محاسبه شد. شکل ۳ خطای ایجاد شده در سطح جدید به ازای تعداد مختلف چاه‌های حذف‌شده را نشان می‌دهد.



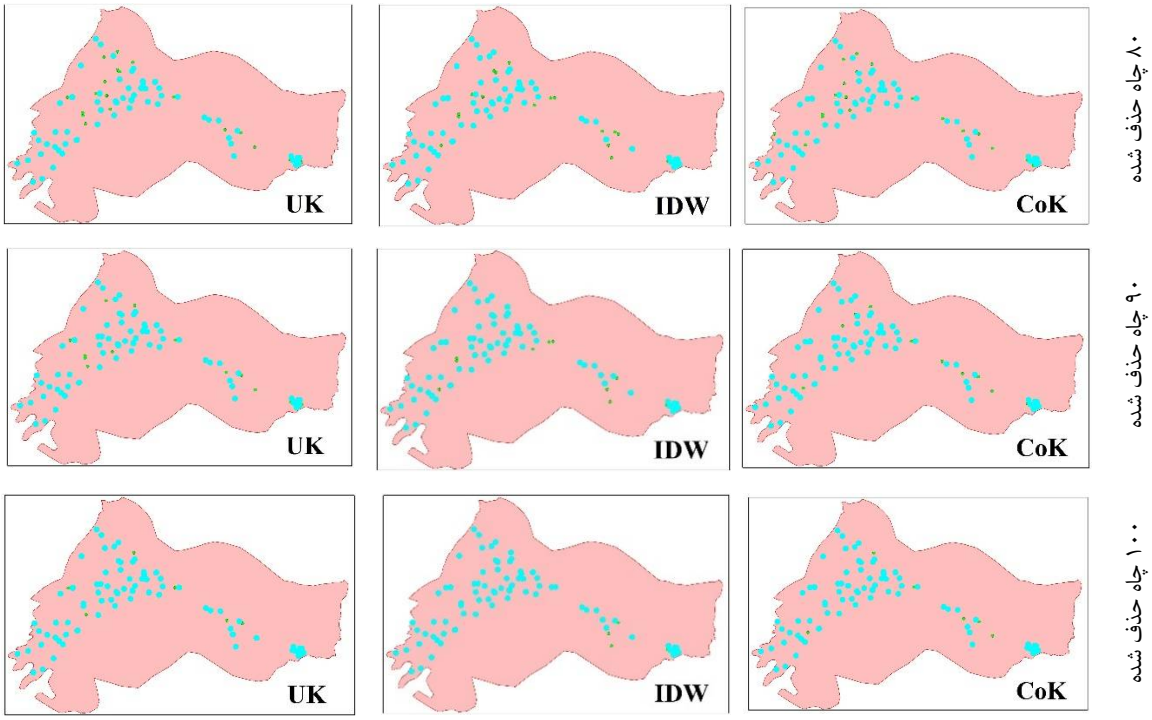
شکل ۳. مقدار خطای ایجاد شده در سطح جدید به ازای تعداد چاه‌های حذف‌شده با روش‌های CoK، UK و IDW: الف) تعداد چاه‌های حذف شده از ۱ تا ۵۰ چاه، ب) تعداد چاه‌های حذف شده از ۵۰ تا ۱۰۰

بر اساس شکل ۲ همواره روش CoK سطح جدید را با دقت بالاتر و روش UK با دقت کمتری درون‌یابی می‌کند. یکی از دلایل کم بودن دقت روش UK نرمال نبودن داده‌ها می‌باشد [۲۸]. در این بین با لحاظ اینکه روش IDW پیش فرض نرمال نبودن داده‌ها را ندارد عملکرد بهتری در درون-یابی سطح جدید نسبت به UK داشته‌است که در مطالعه‌ی Hooshangi, Alesheikh [۲۹] نتیجه‌ای مشابه مشاهده شده‌است. در شکل ۳ هر چه تعداد نقاط حذف‌شده افزایش یابد، مقدار خطای ایجاد شده در سطح جدید بیشتر می‌شود. مقدار خطای ایجاد شده در هر روش روندی مشابه هم دارند. به ازای حذف ۱۰ چاه از مجموعه چاه‌های موجود، مقدار خطا در سطح ایجاد شده با ۹۸ چاه در روش کوکریجینگ ۲/۴ متر بوده و برای IDW و UK به ترتیب ۲/۴۹ و ۲/۶۶ متر می‌باشد. روش کوکریجینگ به ازای مقادیر مختلف حذف‌شده همواره خطای کمتری در نقاط حذف‌شده داشته که نشان از برتری این روش می‌باشد. دلیل اصلی این نتیجه به داده‌های کمکی استفاده شده در روش کوکریجینگ برمی‌گردد، چرا که در روش کوکریجینگ درون‌یابی با داده اصلی و ۹۷ داده کمکی که ضریب همبستگی ۰/۶۱ دارد برآورد سطح آب زیرزمینی انجام می‌شود.

موقعیت چاه‌های حذف‌شده در رویکرد جک‌نایف با روش CoK، IDW و UK به ازای حذف ۱۰ تا ۱۰۰ چاه در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. توزیع چاه‌های حذف شده در منطقه (چاه‌ها با رنگ آبی روشن نشان‌دهنده‌ی چاه‌های حذف شده و چاه با رنگ سبز نشان‌دهنده‌ی چاه‌های باقیمانده است)



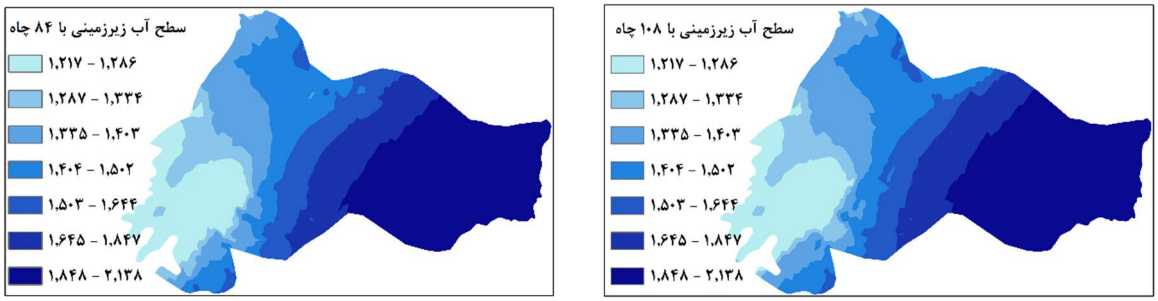
شکل ۴ (ادامه). توزیع چاه‌های حذف شده در منطقه (چاه‌ها با رنگ آبی روشن نشان‌دهنده‌ی چاه‌های حذف شده و چاه با رنگ سبز نشان‌دهنده‌ی چاه‌های باقیمانده است)

اولین ۱۰ چاه حذف‌شده در روش CoK و UK در بخش‌های مختلف منطقه مشاهده می‌شوند در حالی که این تعداد چاه حذف شده در روش IDW صرفاً در مرکز و بخش جنوب شرقی دشت قرار دارند. اولین چاه‌های حذف شده بیشتر در بخش مرکزی دشت قرار دارند. در هر سه روش ارزیابی شده، در ۳۰ چاه حذف شده چاهی از بخش شمالی دشت حضور ندارد. توزیع چاه‌های انتخاب شده در گستره‌ی منطقه برای روش CoK یکنواخت است که نشان دهنده دقت خوب روش است.

تعداد چاه‌های حذف‌شده در تحقیقات مختلفی، متفاوت برآورد شده و معیار و محدودیت خاصی برای انتخاب تعداد چاه‌های حذف‌شده بیان نشده‌است. Ganji khorramdel, Kikhaei [۱۳] بر روی یک شبکه پایش آستانه-کوچصفهان با تعداد ۵۷ چاه مشاهده‌ای کاهش ۲۱٪ از چاه‌ها، Komasi and Goudarzi [۱۵] کفایت یک شبکه با ۱۱ ایستگاه را از میان ۲۹ ایستگاه پایش (۶۲٪ کاهش) برای آبخوان دشت سیلاخور، Akbar Zadeh, Ghahraman [۲۳] از ۲۸۷ حلقه چاه کافی بودن تعداد ۱۱۱ حلقه چاه (۶۱٪ کاهش) در آبخوان شهر مشهد، Raeisi Isa Abadi, Ghafouri [۲۲] از ۷۶ چاه کفایت ۶۰ چاه (۲۱٪ کاهش) در دشت دزفول - اندیمشک، Thakur (۲۰۱۵) به ترتیب ۳۷٪ و ۲۸٪ کاهش در آبخوان‌های کواترنر[۱] و ترتیاری[۲]، Amiri [۲۰] از شبکه نمونه‌برداری اولیه ۲۳ چاه از ۴۴ حلقه چاه (۴۸٪ کاهش) را مناسب دانستند. در این تحقیق با توجه به خطای سطح جدید ایجاد شده و توزیع چاه‌های حذف شده در گستره‌ی دشت، خروجی روش کوکریجینگ در جک‌نایف به عنوان روش مناسب برای کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شد. در ادامه، بر اساس مقدار خطای ایجاد شده در روش کوکریجینگ، موقعیت چاه‌های حذف شده و نظرات کارشناسی ۲۴ چاه با اولویت پایین برای کاهش ابعاد شبکه‌ی پایش انتخاب شدند. در این ۲۴ چاه برای برداشت‌های بعدی می‌توان نمونه‌برداری انجام نشود. شکل ۵ سطح پیوسته‌ی ایجاد شده برای آب زیرزمینی قبل و بعد از حذف ۲۴ چاه‌های نمونه‌برداری را نمایش می‌دهد.

۱ Quaternary

۲ Tertiary



شکل ۵. سطح آب زیرزمینی قبل و بعد از حذف ۲۴ چاه‌ها نمونه‌برداری

بررسی بصری دو سطح ایجاد شده در شکل ۵ شباهت بالای دو سطح را نشان می‌دهد. همچنین ضریب همبستگی محاسبه شده بین دو سطح رستری در نرم افزار ArcGIS نیز برابر با ۰/۹۶ شد که مبین شباهت بالای این دو سطح می‌باشد. این شباهت بین دو سطح رستری ایجاد شده تاثیر اندک چاه‌های حذف شده در ایجاد سطح نهایی آب زیرزمینی و کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳-۵- نتیجه‌گیری

داشتن حداکثر اطلاعات از چاه‌های مشاهداتی برای موفقیت در طرح‌های آبی همواره مدنظر مدیران منابع آب زیرزمینی بوده‌است. یکی از پارامترهایی که در پایش کمی آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، دقت اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی می‌باشد. هرچه تراکم شبکه‌ی پایش بالاتر باشد، ایجاد سطح پیوسته‌ی آب زیرزمینی با دقت بیشتری انجام می‌پذیرد، اما اندازه‌گیری‌های زمینی و انجام محاسبات مربوطه، در بازه‌های زمانی مکرر فرآیندی زمان‌بر و مستلزم صرف وقت و هزینه می‌باشد. بدین منظور شبکه باید تا حدّی بهینه شود تا به طور کافی مبین شرایط منطقه‌ی مورد نظر باشد. در این تحقیق کاهش داده‌های برداشت شده‌ی آب زیرزمینی در دشت تبریز با روش بازنمونه‌گیری جک‌نایف به‌گونه‌ای انجام شد که با استفاده از داده‌های کمکی در روش کوکریجینگ، کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری تأثیر قابل‌توجهی در سطح پیوسته‌ی نهایی نداشته باشد. به دلیل نتایج مختلف روش‌های درون‌یابی در روش جک‌نایف، رویکرد پیشنهادی با روش‌های IDW و UK مقایسه شد.

ارزیابی روش‌های CoK، IDW و UK در روش جک‌نایف نشان داد اگرچه در چاه حذف شده در هر سه روش شباهت‌هایی وجود دارد، اما تأثیر روش درون‌یابی در نتایج غیر قابل انکار می‌باشد. از نظر دقت سطح نهایی ایجاد شده نیز مشخص شد که در مقایسه با روش‌های IDW و UK، همواره راه‌حل‌های حاصل از کوکریجینگ با داده‌ی کمکی کلر که ضریب همبستگی ۰/۶۱ با سطح آب زیرزمینی دشت تبریز داشته، از راندمان بالاتری برخوردار بوده‌است. استفاده از داده‌های کمکی همچنان که موجب افزایش دقت روش‌های درون‌یابی می‌شود، موجب انعطاف عمل در کاهش چاه‌های مشاهداتی نیز می‌شود. توزیع چاه‌های قابل حذف در سطح منطقه با روش کوکریجینگ نیز مؤید این مطلب بود که این روش ویژگی‌های کلی سطح را لحاظ کرده و کاهش چاه‌های نمونه‌برداری به گونه‌ای انجام شده که دقت نهایی سطح کاهش نیابد. بر اساس مقدار خطای ایجاد شده در روش کوکریجینگ، موقعیت چاه‌های حذف شده و نظرات کارشناسی ۲۴ چاه با اولویت پایین برای کاهش ابعاد شبکه‌ی پایش انتخاب شدند. با مقایسه‌ی سطح آب زیرزمینی قبل و بعد از حذف ۲۴ چاه، شباهتی بیش از ۹۶ درصد بین سطوح مشاهده شد که کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری تأثیر قابل‌توجهی در سطح پیوسته‌ی نهایی نداشته باشد. این کاهش تعداد چاه‌های پیزومتری موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. نتایج تحقیق نشان داد که رویکرد جک نایف در کنار روش درون‌یابی کوکریجینگ می‌تواند برای شناسایی اهمیت چاه‌های نمونه‌برداری در شبکه‌ی نظارت بر آب زیرزمینی استفاده شود. این رویکرد ساده‌تر از سایر روش‌های کاهش تعداد نمونه‌برداری‌های شبکه پایش مانند روش‌های بهینه‌سازی قابل اجرا می‌باشد، زیرا به طور منطقی همبستگی فضایی را در هر مرحله حفظ کرده و هر بار تنها یک چاه از مجموعه‌ی داده‌ی اصلی حذف می‌شود. رویکرد پیشنهادی در صورتی که برای سایر شبکه‌های پایشِ پارامترهای جغرافیایی داده‌ی کمکی وجود داشته باشد قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود روش کوکریجینگ در پیاده‌سازی روش جک نایف در بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش

سایر پدیده‌های جغرافیایی مانند بارش استفاده شده و عملکرد آن با خروجی تحقیق حاضر بررسی شود. در این تحقیق اطلاعات زمانی چاه‌های پایش لحاظ نشد، در ادامه می‌توان رویکرد پیشنهادی این تحقیق را برای ماه‌های متوالی از شبکه‌ی پایش پیاده‌سازی کرده و عملکرد چاه‌ها در ماه‌های مختلف را بررسی گردد. در رویکرد پیشنهادی همواره به یک داده‌ی کمکی که موجب بهبود دقت روش‌های درون‌یابی شود نیاز است، یافتن داده‌های کمکی دیگری مانند مدل رقومی ارتفاعی منطقه، داده‌های هواشناسی و غیره می‌تواند در بهینه‌سازی و کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری آب زیرزمینی مفید وکاربردی باشد.

منابع

[۱] Kavusi, M., Khashei Siuki, A., and Dastourani, M. (2020). "Optimal Design of Groundwater Monitoring Network Using the Combined Election-Kriging Method." Water Resources Management. Vol. 34, No. 8, PP. 2503-2516.

[۲] Office of engineering and technical standards of water, and the office of technical system affairs, "Groundwater quality monitoring guidelines. Publication No. 620. 2012, Ministry of Energy and Vice President of Strategic Supervision. 1-108 (in Persian).

[۳] Xiong, Y., Luo, J., Liu, X., Liu, Y., Xin, X ,.and Wang, S. (2022). "Machine learning-based optimal design of groundwater pollution monitoring network." Environmental Research. Vol. 211, No., PP. 113022.

[۴] Vice President of Human Environment, and Water and soil environmental protection and management office, "Guidelines for monitoring industrial groundwater pollution. 2020. pp. 1-15.

[۵] Panagiotou, C.F., Kyriakidis, P., and Tziritis, E. (2022). "Application of geostatistical methods to groundwater salinization problems: A review." Journal of Hydrology. Vol. 615, No., PP. 128566.

[۶] Mirzaei Nodoushan, F., Bozorg Haddad, O., and Khayat Kholghi, M. (2019). "Optimization and development of groundwater-level monitoring network in Eshtehard plain." Journal of Watershed Engineering and Management. Vol. 11, No. 1, PP. 273-282 (in Persian).

[۷] Uddameri, V., Karim, A., Uddameri, E., and Srivastava, P., "Sensitivity of Wells in a Large Groundwater Monitoring Network and Its Evaluation Using GRACE Satellite Derived Information". 2017. p. 235-256.

[۸] Bhat, S., Motz, L.H ,.Pathak, C., and Kuebler, L. (2015). "Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA." Environ Monit Assess. Vol. 187, No. 1, PP. 4183.

[۹] Nabi, A., Gallardo, A.H., and Ahmed, S" .(۲۰۱۱) .Optimization of a Groundwater Monitoring Network for a Sustainable Development of the Maheshwaram Catchment, India." Sustainability. Vol. 3, No. 2, PP. 396-409.

[۱۰] Farlin, J., Gallé, T., Pittois, D., Bayerle, M., and Schaul, T. (2019). "Groundwater quality monitoring network design and optimisation based on measured contaminant concentration and taking solute transit time into account." Journal of Hydrology. Vol. 573, No., PP. 516-523.

[۱۱] Hooshangi, N., and Ghaffari Razin, M.R. (2021). "Optimization of sampling wells by a spatial-temporal approach in the groundwater level monitoring network (Case study: Sarab plain)." Iranian journal of Ecohydrology. Vol. 8, No. 3, PP. 777-790 (in Persian).

[۱۲] Deputy for protection and, and exploitation of underground water resources, "The forbidden plains of the country. 2020: Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Organization, Office of Basic Studies of Water Resources. 1-80 (in Persian).

[۱۳] Ganji khorramdel, n., Kikhaei, F., Mohammadi, K., and Manem, M.J. (2015). "Optimization of Groundwater Level Monitoring Network Design using Particle Swarm Metaheuristic Method." Journal of Hydraulics. Vol. 10, No. 1, PP. 25-35 (in Persian).

[۱۴] Janatrostami, S., and Salahi, A. (2020). "Design of the optimal groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach." Environmental Sciences. Vol. 18, No. 2, PP. 19-40 (in Persian).

[۱۵] Komasi, M., and Goudarzi, H. (2019). "The Application of the Entropy and Empirical Basin Kriging for the Optimization and Spatial Interpolation of Groundwater Monitoring Network (Case Study: Silakhor Plain)." Hydrogeomorphology. Vol. 5, No. 19 (in Persian).

[۱۶] Sadatinejadi, S.J., Ghasemi, L., and Yousefi, H. (2018). "Redesign of Groundwater Monitoring Network Kuhdasht Aquifer." Iranian journal of Ecohydrology. Vol. 5, No. 4, PP. 1255-1266 (in Persian).

[۱۷] Thakur, J.K. (2015). "Optimizing Groundwater Monitoring Networks Using Integrated Statistical and Geostatistical Approaches." Hydrology. Vol. 2, No. 3, PP. 148-175.

[۱۸] Ganji Khoramdel, N., Keykhaei, F., and Mardian, M. (2015). "Design and development of groundwater level monitoring network using geostatistical and statistical methods in Arak plain." Iranian Journal of Geophysics. Vol. 9, No. 3, PP. 17-29 (in Persian).

[۱۹] Bhunia, G.S., and Shit, P.K., "Chapter 1 - Principle of GIScience and geostatistics in groundwater modeling", in Case Studies in Geospatial Applications to Groundwater Resources, P. Shit, G. Bhunia, and P. Adhikary, Editors. 2023, Elsevier. p. 1-11.

[۲۰] Amiri, V. (2021). "Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network Using Geostatistical Method." Journal of Arid Biome. Vol. 10, No. 2, PP. 37-52 (in Persian).

[۲۱] Ghorbani, K., Salarjazi, M., and Farnia, E. (2018). "Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in ground water level zoning." Journal of Water and Soil Conservation. Vol. 25, No. 1, PP. 165-182 (in Persian).

[۲۲] Raeisi Isa Abadi, A., Ghafouri, H.R., and Moslemzadeh, M. (2018). "Minimization of Groundwater Observation Wells Using Geostatistics and Optimization Technique (Case study: Dezfoul-Andimeshk plain)." Journal of Water and Soil Conservation. Vol. 25, No. 3, PP. 79-96 (in Persian).

[۲۳] Akbar Zadeh, M., Ghahraman, B., and Davary, K. (2016). "Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network in Mashhad Aquifer Using Spatio-Temporal Modeling." Iran-Water Resources Research (IWRR). Vol. 12, No. 1 (in Persian).

[۲۴] Shaghaghian, M.R., and Abedini, M.J. (2013). "Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques." Scientia Iranica. Vol. 20, No. 2, PP. 259-269.

[۲۵] Ahmed, S., Kumar, D., and Bhat, A.N., "Application of Geostatistics in Optimal Groundwater Monitoring Network Design", in Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers: Sustainable Management and Optimal Monitoring Network Design. 2008, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 179-190.

[۲۶] Office of Basic Studies, and of Water Resources, "Guidelines for design, monitoring and quantitative and qualitative control of underground water resources of the country. 2002: Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Organization (in Persian).

[۲۷] Choubin ,B., and Malekian, A. (2013). "Relationship between Fluctuations in the Water Table and Aquifer Salinization (Case Study: Aquifer Aspas-Fars Province)." Desert Management. Vol. 1, No. 1, PP. 13-26 (in Persian).

[۲۸] Tutmez, B., and Hatipoglu, Z. (2010). "Comparing two data driven interpolation methods for modeling nitrate distribution in aquifer." Ecological Informatics. Vol. 5, No. 4, PP. 311-315.

[۲۹] Hooshangi, N., Alesheikh, A.A., Nadiri, A.A., and Asghari Moghaddam, A. (2015). "Evaluation and comparison of geostatistical and fuzzy interpolation methods in estimation of groundwater arsenic, Case study: Khoy plain aquifer." Journal of Echo Hydrology. Vol. 2, No. 1, PP. 63-77 (in Persian).

[۳۰] Hooshangi, N., Alesheikh, A.A., Nadiri, A.A. (2016). "Optimization of Piezometers Number for Groundwater Level Prediction Using PCA and Geostatistical Methods." Water and Soil Science. Vol. 25, No. 4.2, PP. 53-66 (in Persian).