

مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی سطح ایستابی آبخوان دشت صحنه - بیستون با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی

کوروش شیرانی^{۱*}، رامین ارفع‌نیا^۲، یزدان فریدونی^۳، رضا نادری سامانی^۳، محسن شریعتی^۴ و محمد فیضی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۵)

چکیده

آب زیرزمینی یکی از منابع مهم آبی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مانند ایران بوده و در سال‌های اخیر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه به شدت رو به کاهش رفته است. هدف این پژوهش تعیین بهترین مدل درونیابی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی در دشت صحنه - بیستون استان کرمانشاه طی سه دهه بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ است. بدین منظور نخست چهار نیم‌تغییرنمای گوسی، خطی، کروی و توانی برای مشاهدات به‌دست آمد. در مرحله بعد بهترین نیم‌تغییرنما و روش میان‌یابی از بین روش‌های مورد بررسی برای پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی در منطقه انتخاب شد. به‌منظور ارزیابی و تعیین مناسب‌ترین نیم‌تغییرنما و روش میان‌یابی برای پهنه‌بندی، کمترین مقدار مجموع معیارهای خطای RMSE، MAE، MBE و بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2) بین مشاهدات و برآوردها در هر سه دهه و میانگین کل دوره محاسبه و در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که روش کریجینگ معمولی با وریوگرام گوسی بهترین روش برای میان‌یابی عمق سطح آب زیرزمینی در دشت صحنه - بیستون است. اختلاف بین حداقل و حداکثر سطح ایستابی آب زیرزمینی بر مبنای چاه‌های مشاهده‌ای و مدل پهنه‌بندی به ترتیب بین ۱۲۷۹ تا ۱۳۷۲ متر و ۱۲۸۹ تا ۱۴۰۹ متر در دوره مورد بررسی است و با نزدیکی به نواحی مرکزی و جنوبی، سطح آب زیرزمینی در عمق بیشتری قرار می‌گیرد. بیشترین میزان کاهش و افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول سه دهه نسبت به همدیگر به ترتیب ۱۲ و ۱۹ متر بوده است. همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در طی این سه دهه نشان می‌دهد سطح تراز آب زیرزمینی در هر دو دهه دوم و سوم نسبت به دهه اول و دهه سوم نسبت به دهه دوم در بیشتر از ۵۰ درصد منطقه افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از ترسالی و مدیریت بهینه برداشت آب زیرزمینی در این سال‌ها باشد. بنابراین نتایج پایش تغییرات آب زیرزمینی در سه دهه اخیر کمک مؤثری برای کارشناسان و بهره‌برداران در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه آب زیرزمینی به‌منظور توسعه پایدار منابع آبی را به‌همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: دشت صحنه - بیستون، آب زیرزمینی، نیم‌تغییرنما، میان‌یابی

۱. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۴. پردیس فنی مهندسی، دانشکده محیط زیست، بخش آموزش، مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: KouroshShirani@gmail.com

مقدمه

آب زیرزمینی همواره یکی از منابع مهم آبی محسوب می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران که متوسط بارندگی سالانه آن، کفایت نیاز آبی را نمی‌دهد، حفظ و مدیریت منابع آب زیرزمینی اهمیت بالایی داشته و آگاهی از چگونگی تغییرات زمانی- مکانی سفره‌ها و همچنین ساختار ریاضی تغییرپذیری، به منظور مدیریت بهینه، اطلاعات مهمی در اختیار مدیران مربوطه قرار می‌دهد (۲۰). طبق گزارش سازمان هواشناسی جهانی، طی دهه‌های اخیر تقاضای جهانی برای آب به بیش از ۶ برابر رسیده است درحالی که جمعیت سه برابر شده است. در واقع تقاضا برای آب به سرعت روبه افزایش است درحالی که منابع آب تجدیدپذیر ظرفیتشان به نسبت پایدار است. مدل کردن سفره‌های آب زیرزمینی و به تبع آن پیش‌بینی سطح ایستابی از نظر ایجاد سازه‌های مهندسی، مصارف کشاورزی، مطالعات هیدرولوژی و مدیریتی و به دست آوردن آب‌های زیرزمینی با کیفیت مناسب، از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدیریت، برنامه‌ریزی و همچنین تجزیه و تحلیل‌های قوی آماری باعث شد که بسیاری از افراد در امور مختلف از آن به عنوان ابزاری قوی در تصمیم‌گیری‌ها استفاده کنند (۱). از آنجا که تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، متغیری مکانی و زمانی بوده و اندازه‌گیری آن در نقاط مختلف، در دوره‌های زمانی کوتاه مدت مشکل است و موجب صرف هزینه‌های زیادی می‌شود، بنابراین شناسایی و استفاده از ابزاری مناسب برای پایش میزان تراز و عمق آب‌های زیرزمینی و با نمونه‌برداری از نقاط محدودتر و درون‌یابی دقیق اطلاعات تهیه شده، ضروری است. روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هرکدام از آنها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت‌های گوناگونی است. شناسایی به موقع و تهیه نقشه از تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی و شناسایی عامل آن توسط روش‌های مشاهده‌ای و سنتی، کاری سخت، زمان‌بر و پرهزینه است. امروزه با استفاده

از سامانه اطلاعات جغرافیایی و ابزارهای درون‌یابی زمین‌آماری، تحلیل و ارزیابی تغییرات مکانی کمیت و کیفیت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی آسان‌تر و کارآمدتر شده است (۱۱). در این راستا پژوهش‌های متعددی انجام گرفته که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. آرکوس (۲) مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی سطوح آب‌های زیرزمینی را با استفاده از روش‌های درون‌یابی و ۹۵ حلقه چاه در یکی از استان‌های ترکیه به کمک GIS مورد ارزیابی قرار داد. در تحقیق مورد اشاره روند کاهش سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی مورد بررسی با استفاده از روش کریجینگ مناسب‌تر از روش وزنی معکوس فاصله ارزیابی شد. آناند و همکاران (۳) در یک دوره زمانی ۳۲ ساله با استفاده از ۵۷ چاه مشاهده‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام به تجزیه و تحلیل مکانی سطوح آب‌های زیرزمینی در یکی از استان‌های هند پرداخت و بر اساس بررسی‌های انجام گرفته از روند کاهش منابع آبی خبر داد (۳). بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت مشهد با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان داد که سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و غربی آبخوان تا ۳۰ متر کاهش یافته است (۱). بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت ارومیه نشان داد که در همه ایستگاه‌ها تراز آب زیرزمینی دارای روند منفی و در ۵۶ درصد ایستگاه‌ها روند منفی در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بودند (۲۰). بررسی‌های تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی دشت‌های اصفهان- برخوار، نجف‌آباد و چادگان نشان داد که در همه دشت‌ها و در بیشتر پیژومترها روند تغییرات سطح آب زیرزمینی کاهش است (۹). بررسی توزیع مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی در زیرحوضه وین‌گانگا کشور هند نشان داد کریجینگ معمولی در محیط GIS از توانایی و کارآمدی خوبی برای تعیین تغییرات دارا است (۱۹). پژوهشگران متعددی همچون اکبری و همکاران (۱)، آمایش و همکاران (۴)، چوی و همکاران (۷)، موکانا و کوئیک (۱۲)، نیک‌بخت و دلبری (۱۴)، نیلزاد و همکاران (۱۵)، پایری و بامری (۱۷)، رجایی و پوراصلان (۱۸) و صمدی و صمدی

بیستون تشکیل می‌دهد. دشت مذکور به لحاظ هیدرولوژیکی بخشی از حوضه رودخانه قره‌سو است. چشمه‌هایی که در دشت مذکور واقع هستند توسط توده آهکی پرآو - بیستون تغذیه می‌شوند. رودخانه‌های گاماسیاب و دیناور از وسط این دشت عبور می‌کند. برای بررسی سطح ایستابی در دشت صحنه - بیستون دو آبخوان صحنه و بیستون - دیناور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۱ و ۲ موقعیت جغرافیایی آبخوان‌های مورد بررسی و در مسیرهای دسترسی به منطقه ارائه شده است.

روش تحقیق

این پژوهش مطابق شکل ۳ و به شرحی که در ادامه آمده است، اجرا شد. پس از آماده‌سازی داده‌های سطح آب زیرزمینی در سه دهه بین ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ و به منظور تعیین بهترین مدل درون‌یابی و بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، نخست چهار نیم تغییرنمای گوسی، خطی، کروی و توانی برای مشاهدات، مدنظر قرار گرفت. در مرحله بعد بهترین نیم تغییرنما از بین آنها برای پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی در منطقه، بر اساس کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی با مشاهدات در هر سه دهه و میانگین کل دوره انتخاب شد. سپس برای انتخاب بهترین روش میان‌یابی با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی، فاصله معکوس موزون با توان‌های ۲ تا ۴، اسپیلاین و چندجمله‌ای عمومی، میانگین سطح آب زیرزمینی میان‌یابی شد. به منظور ارزیابی روش‌ها، معیارهای خطای RMSE، MAE، MBE و مقدار ضریب تعیین (R^2) به‌نماینده همبستگی بین مشاهدات و برآوردها نیز برای هر روش محاسبه شد. در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی میانگین آب زیرزمینی در سه دهه ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ تهیه شدند.

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی

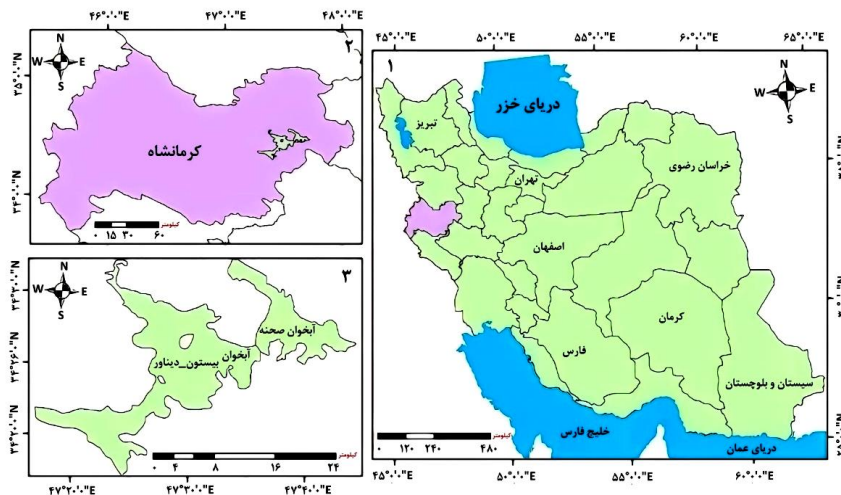
در این تحقیق به منظور بررسی سطح ایستابی آب زیرزمینی از داده‌های چاه‌های پی‌زومتری در سطح دو آبخوان صحنه و

(۲۰)، صاحب جلال و همکاران (۲۱)، بهمنش (۵)، پلنگی (۱۶)، آرکوس (۲)، دوبوآس و همکاران (۸)، مومن و همکاران (۱۳)، حسین و همکاران (۱۰) و برکات و همکاران (۶) در زمینه به‌کارگیری روش‌های زمین‌آمار در بررسی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی در محیط GIS و کارآمدی آنها متناسب با موقعیت مکانی مناطق مختلف تجارب خوبی را ارائه داده‌اند. از این‌رو با استناد بر پیشینه پژوهش هدف اول تحقیق حاضر معرفی بهترین مدل از بین مدل‌های درون‌یابی زمین‌آمار مورد بررسی برای تغییرات زمانی و مکانی آب زیرزمینی است. هدف دوم پژوهش حاضر مدل‌سازی مکانی - زمانی تراز، تعیین روند افت و تغییرات سطح آب زیرزمینی و پهنه‌بندی مناطق در محیط GIS در آبخوان دشت صحنه - بیستون کرمانشاه است. لازم به ذکر است تاکنون در محدوده آبخوان صحنه - بیستون استان کرمانشاه هیچ‌گونه ارزیابی و مقایسه روش‌های درون‌یابی با هدف انتخاب مناسب‌ترین روش انجام نشده است. بنابراین نتایج این پژوهش در راستای برنامه‌ریزی محیطی و صیانت از عرصه‌های منابع طبیعی در منطقه مورد مطالعه می‌تواند مفید واقع شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه

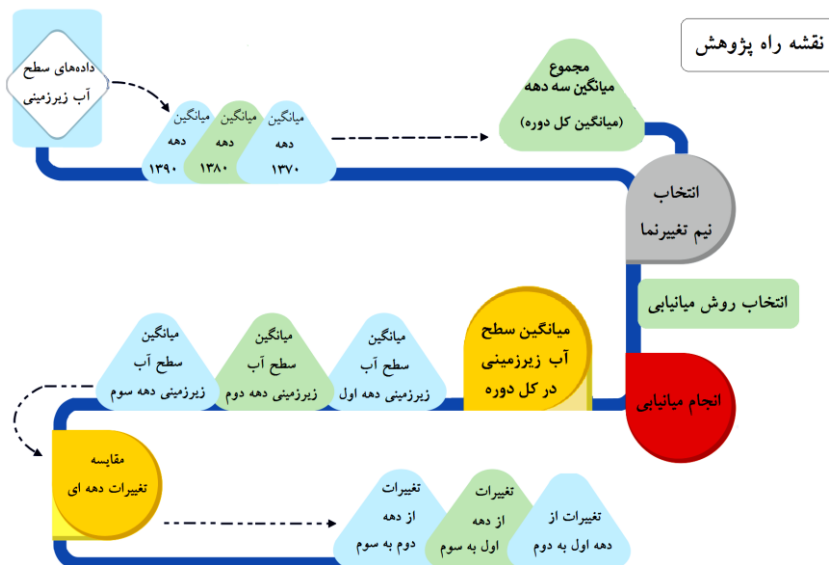
دشت صحنه - بیستون در استان کرمانشاه شامل دو دشت شمالی (دشت خاوری میان‌راهان) و جنوبی (دشت خاوری بیستون) است. این دشت به‌طور تقریبی بین عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه و ۳۴ درجه و ۳۱ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۰ دقیقه و ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی واقع شده است. دشت مذکور از شمال به سنقر از جنوب به همدان و هرسین، از شرق به کنگاور و از غرب به شهر کرمانشاه محدود می‌شود. متوسط ارتفاع دشت از سطح آزاد دریا حدود ۱۳۲۰ متر و مساحت آن به‌طور تقریبی ۲۹۵ کیلومتر مربع است. وسعت حوضه آبخیز بیستون حدود ۸۷۶۳۴/۱۷ هکتار است که ۴۵ درصد مساحت آن را دشت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی آبخوان‌های صحنه و بیستون - دیناور



شکل ۲. مسیرهای دسترسی به منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. نمودار گردش مراحل انجام پژوهش

روش‌های مذکور به‌اختصار ارائه شده است.

نیم‌تغییرنما یا واریوگرام

نیم‌تغییرنما، برای تشریح ارتباط مکانی مقدار یک متغیر در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه به‌کار می‌رود و یک ابزار اساسی در زمین‌آمار است. نیم‌تغییرنما همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آنها نشان می‌دهد. نیم‌تغییرنمای واقعی (تئوری)، از لحاظ علمی قابل دسترس نیست زیرا محاسبه آن نیازمند نمونه‌برداری از همه اجزای بی‌نهایت کوچک محیط مورد مطالعه است و این در طبیعت غیرممکن است. نوع دیگری از نیم‌تغییرنما وجود دارد که همان نیم‌تغییرنمای تئوری است ولی این بار در یک فضای کوچک‌تری بررسی می‌شود که باز هم در طبیعت قابل دستیابی نیست. به این نیم‌تغییرنما، نیم‌تغییرنمای مکانی گفته می‌شود، بنابراین در بررسی‌های زمین‌آمار، معمولاً از نوع دیگری از نیم‌تغییرنما که نیم‌تغییرنمای تجربی نام دارد، استفاده می‌شود.

پردازش مدل واریوگرام مناسب به ساختار فضایی داده‌ها و

تعیین متغیرهای آن

به‌منظور انتخاب واریوگرام مناسب به ساختار فضایی داده‌ها از نرم‌افزار GS⁺5.1 استفاده شد. در واقع سعی شد در محیط این نرم‌افزار برای انتخاب بهترین مدل نیم‌تغییرنمای برازش داده شده، شاخص‌های نیم‌تغییرنما به مقدار بهینه خود برسد. هرچقدر مقادیر R^2 افزایش و مجموع مربعات فاصله نقاط از خط برازش کاهش یابد، دقت مدل برازش یافته افزایش می‌یابد.

روش‌های زمین‌آمار

تخمین‌گیر زمین‌آمار فرایندی است که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به‌دست آورد. بهترین تخمین‌گر زمین‌آمار به افتخار آقای کریگ که یک مهندس معدن طلا در آفریقای جنوبی بوده به نام کریگینگ یا

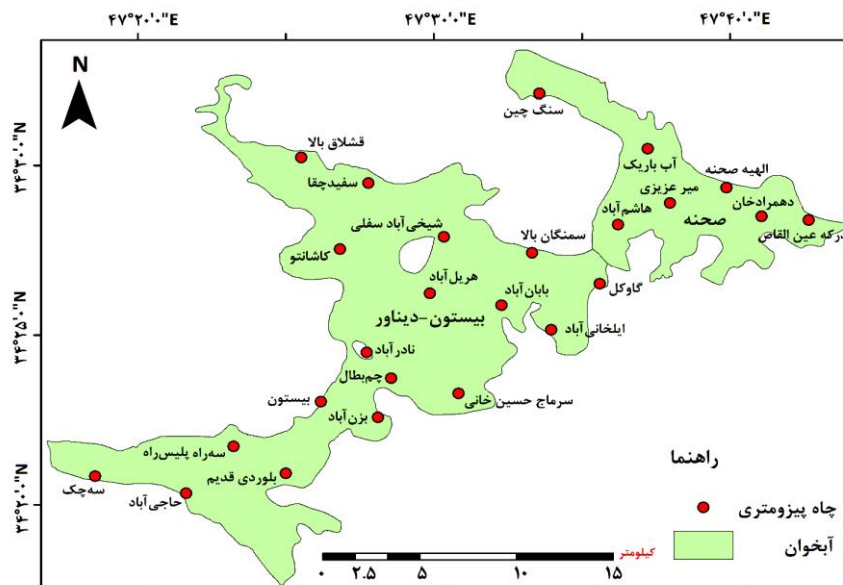
بیستون- دیناور استفاده شده است. همچنین از داده‌های ماهانه ارتفاع سطح ایستابی تعداد ۲۵ حلقه چاه پیزومتري در دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹) تهیه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه استفاده شد. موقعیت جغرافیایی و مشخصات چاه‌ها به‌ترتیب در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به شکل و جدول یاد شده تعداد ۷ حلقه چاه در آبخوان صحنه و ۱۸ حلقه چاه در آبخوان بیستون - دیناور قرار دارند، بنابراین در مجموع ۲۵ حلقه چاه پیزومتري سطح منطقه را پوشش می‌دهند.

میانگین و تغییرات سطح ایستابی

در ادامه میانگین سطح ایستابی آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ به تفکیک چاه‌های پیزومتري در دشت صحنه - بیستون تهیه شد. چاه‌های سنگ‌چین، سه‌چک و دهمرادخان به‌ترتیب دارای بالاترین سطح ایستابی و چاه‌های بلوردی قدیم، چم‌بطان و نادرآباد به‌ترتیب دارای پایین‌ترین سطح ایستابی در طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ هستند (شکل ۵). همچنین تغییرات سطح ایستابی آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ در دشت صحنه - بیستون تهیه شد که تغییرات سطح ایستابی در دهه ۷۰ به‌خصوص از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۰ به صورت نمایی در حال افزایش بوده است. در دهه ۸۰ به میزان قابل‌توجهی تا سال ۱۳۸۵ سطح ایستابی نزول پیدا کرده است (شکل ۶). از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴ روند نمودار سطح ایستابی آبخوان به‌صورت صعودی بوده است. به‌طور کلی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴ دو قله نمودار هستند که به‌ترتیب دارای سطح ایستابی ۱۳۲۱ و ۱۳۲۳ متر از سطح دریای آزاد هستند. از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ روند تغییرات سطح ایستابی آبخوان در منطقه مطالعه به‌صورت نزولی بوده است (شکل ۶).

تئوری زمین‌آمار

مهم‌ترین مفاهیم زمین‌آمار شامل متغیر ناحیه‌ای، نیم‌تغییرنما و روش تخمین است که با توجه به ماهیت این پژوهش، تئوری



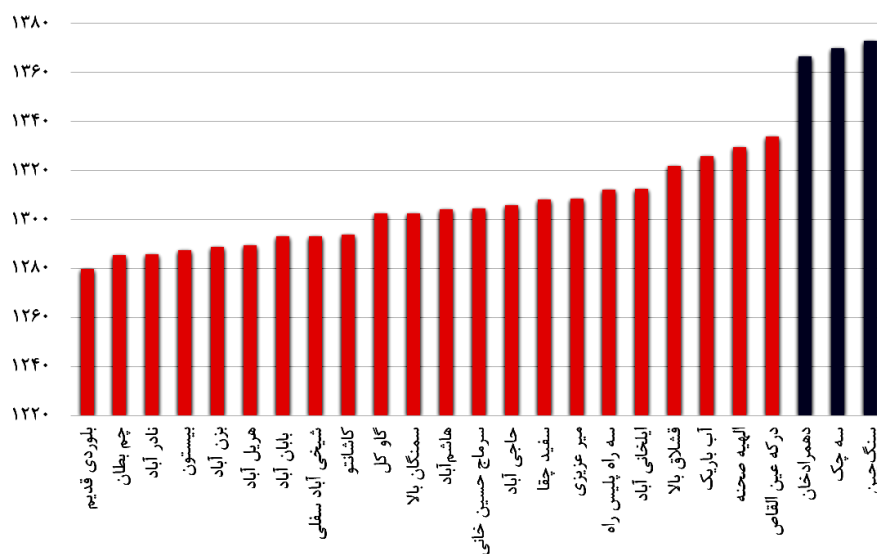
شکل ۴. موقعیت چاه‌های پیژومتری در دو آبخوان صحنه و بیستون - دیناور

جدول ۱. مشخصات چاه‌های پیژومتری مورد استفاده در تحقیق

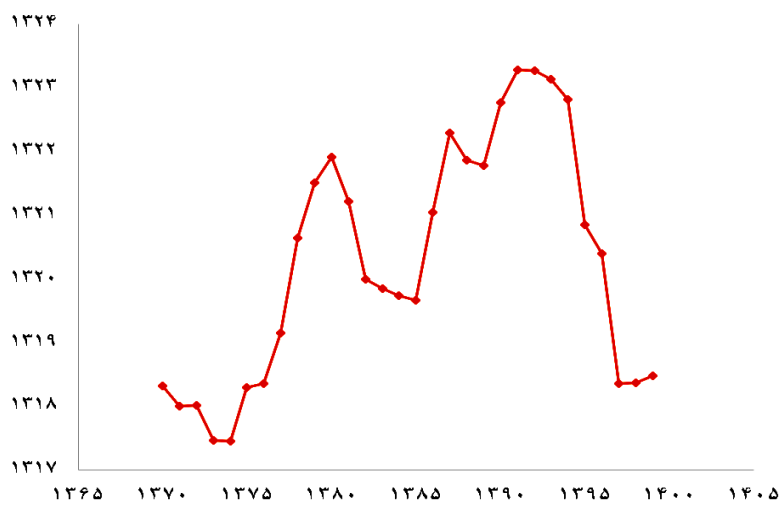
آبخوان	نام چاه	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	تراز آب زیرزمینی (متر)
بیستون - دیناور	ایلخانی آباد	۷۳۵۴۲۶	۳۸۱۰۹۹۱	۱۳۱۲/۴۲
بیستون - دیناور	بابان آباد	۷۳۲۸۵۲	۳۸۱۲۳۳۱	۱۲۹۳/۰۶
بیستون - دیناور	بزن آباد	۷۲۶۴۷۳	۳۸۰۶۲۱۹	۱۲۸۸/۸۲
بیستون - دیناور	بیستون	۷۲۳۵۲۲	۳۸۰۷۰۶۸	۱۲۸۷/۵۲
بیستون - دیناور	بلوردی قدیم	۷۲۱۷۱۵	۳۸۰۳۱۷۷	۱۲۷۹/۹۷
بیستون - دیناور	سهره پلیس راه	۷۱۹۲۴۹	۳۸۰۴۵۶۲	۱۳۱۲/۱۶
بیستون - دیناور	چم بطلان	۷۲۷۱۵۹	۳۸۰۸۳۵۷	۱۲۸۵/۵۹
بیستون - دیناور	حاجی آباد	۷۱۶۵۵۳	۳۸۰۲۰۸۳	۱۳۰۶
بیستون - دیناور	سرماج حسین خانی	۷۳۰۶۳۰	۳۸۰۷۵۲۹	۱۳۰۴/۶۶
بیستون - دیناور	سفید چقا	۷۲۵۹۸۱	۳۸۱۸۹۸۴	۱۳۰۸/۱۷
بیستون - دیناور	سمنگان بالا	۷۳۴۴۴۱	۳۸۱۵۱۸۲	۱۳۰۲/۶۵
بیستون - دیناور	سه چک	۷۱۱۸۵۲	۳۸۰۳۰۰۷	۱۳۶۹/۹۴
بیستون - دیناور	شیخی آباد سفلی	۷۲۹۸۸۰	۳۸۱۶۰۶۰	۱۲۹۳/۱۱
بیستون - دیناور	قشلاق بالا	۷۲۲۵۱۲	۳۸۲۰۳۸۸	۱۳۲۱/۸۱
بیستون - دیناور	کاشانتو	۷۲۴۵۱۰	۳۸۱۵۳۹۵	۱۲۹۳/۹۱
بیستون - دیناور	گاو کل	۷۳۷۹۴۳	۳۸۱۳۵۱۱	۱۳۰۲/۳۹
بیستون - دیناور	نادر آباد	۷۲۵۸۹۴	۳۸۰۹۷۶۰	۱۲۸۶/۰۱
بیستون - دیناور	هریل آباد	۷۲۹۱۵۴	۳۸۱۲۹۷۹	۱۲۸۹/۳۲
صحنه	درکه عین القاص	۷۴۶۳۰۲	۳۸۱۷۱۶۹	۱۳۳۴/۰۶

ادامه جدول ۱

آبخوان	نام چاه	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	تراز آب زیرزمینی (متر)
صحنه	الهیة صحنه	۷۴۴۴۸۸	۳۸۱۸۷۴۹	۱۳۲۹/۶۹
صحنه	آب باریک	۷۴۰۴۲۱	۳۸۲۰۸۵۷	۱۳۲۵/۸۱
صحنه	دهمراذخان	۷۴۸۱۷۳۳	۳۸۱۶۹۷۲	۱۳۶۶/۴۷
صحنه	سنگ‌چین	۷۳۴۸۱۳	۳۸۲۳۸۸۵	۱۳۷۲/۹۶
صحنه	میرعزیزی	۷۴۱۴۱۰	۳۸۱۷۸۶۹	۱۳۰۸/۵۷
صحنه	هاشم‌آباد	۷۳۸۸۸۰	۳۸۱۶۷۲۹	۱۳۰۴/۱۵



شکل ۵. میانگین سطح ایستابی آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ به تفکیک چاه‌های پیژومتری



شکل ۶. تغییرات سطح ایستابی آبخوان از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹

می‌دهد. بنابراین اوزان λ_i از طریق حل دستگاه معادله خطی زیر محاسبه می‌شوند (۱ و ۹):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(X_i, X_j) + \mu \gamma(X_i, X_j), j = 1, \dots, n \quad (3)$$

که در آن، $\gamma(X_i, X_j)$ مقدار نیم‌تغییرنا بین تمام نقاط معلوم، μ ضریب لاگرانژین برای به حداقل رساندن واریانس کریجینگ و $\gamma(X_i, X_j)$ میانگین نیم‌تغییرنا بین نقطه مجهول X_i و نقطه معلوم X_j است (۱ و ۹).

بررسی دقت روش‌های میان‌یابی و انتخاب بهترین روش

به منظور بررسی خطای هر روش میان‌یابی و انتخاب بهترین روش برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی آبخوان دشت صحنه - بیستون کرمانشاه در تحقیق حاضر از روش اعتبارسنجی متقاطع (Cross-Validation) استفاده شد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی میزان خطا و انتخاب بهترین روش از معیارهای آماری میانگین قدرمطلق خطا (Mean Absolute Error (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error (RMSE) و میانگین انحراف خطا (Mean Bias Error (MBA) استفاده شد. مناسب‌ترین روش درون‌یابی، روشی است که RMSE حداقل مقدار را داشته باشد و مقادیر MAE و MBE نزدیک به صفر باشند.

روش اجرای تحقیق

پس از تعیین بهترین روش میان‌یابی مربوط به سطح تراز آب زیرزمینی، نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی و زمانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS@10.6 تهیه شد. همچنین در تحقیق حاضر از نرم‌افزارهای SPSS@26 به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها و همگن بودن واریانس‌ها، Excel@2013 برای ترسیم نمودارها، GS+@5.1 برای ترسیم نیم‌تغییرناها و ArcGIS@10.6 برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شد. با توجه به اینکه انتخاب

کریجینگ نامگذاری شده است. این روش مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش درون‌یابی است که بر پایه مدل‌ها و روابط آماری پایه‌ریزی شده است. لایه رستری تولید شده از این روش، سطحی بسیار دقیق را نمایش می‌دهد.

روش کریجینگ

کریجینگ یک روش تخمین است که بر اساس منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و این تخمینگر البته نارایب شناخته می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ این است که به‌ازای هر تخمین، خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه کرد و معمولاً تعداد نقاط همسایگی در حدود ۱۰ نقطه مناسب تشخیص داده شده است. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده، می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد. درحالی‌که در روش‌های کلاسیک این عمل کارایی ندارد. کریجینگ برحسب ویژگی‌های ساختار مکانی به انواع کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ جهانی یا عمومی، کریجینگ شاخص و احتمال تقسیم‌بندی می‌شود. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از کریجینگ معمولی استفاده شد، این روش در ادامه توضیح داده شده است (۱ و ۹). روش کریجینگ معمولی از معروف‌ترین انواع کریجینگ است که در آن مقادیر متغیر در نقاط فاقد آمار بر اساس میانگین‌گیری متحرک وزنی خطی از مقادیر متغیر در نقاط معلوم تخمین زده می‌شوند:

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

که در آن:

$Z^*(X)$ مقدار برآورد شده متغیر Z در نقطه نامعلوم X ، $Z(X_i)$ مقدار متغیر Z در نقطه معلوم X_i و λ_i مقدار وزن نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه معلوم X_i و n تعداد کل مشاهدات است. برای نیل به یک تخمین نارایب $(E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0)$ ، مقدار جمع جبری وزن‌های نسبت داده شده بایستی برابر با یک شود. همچنین روش کریجینگ بهترین تخمین را با حداقل رساندن واریانس کریجینگ ارائه

معیارهای ارزیابی کیفیت میان‌یابی برای هر روش در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج این مرحله روش کریجینگ معمولی بهترین عملکرد را در میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی داشته است. این روش در دو معیار خطای RMSE و MAE عملکرد بهتری از روش‌های دیگر داشته است و فقط در مورد معیار خطای MBE روش چندجمله‌ای عمومی خطای کمتری نسبت به کریجینگ عمومی داشته است. مقدار R^2 محاسبه شده برای روش‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که روش کریجینگ عمومی با ضریب تعیین یا R^2 معادل با ۰/۶ بین مشاهدات و برآوردها بیشترین همبستگی را دارد. به‌طور کلی روش چندجمله‌ای عمومی ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است و تنها از نظر معیار MBE نسبت به روش‌های دیگر بهتر بوده است. بعد از روش کریجینگ معمولی نیز روش اسپیلاین بهترین برآوردها را انجام داده است (۲ و ۹). در نتیجه بهترین روش برای میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت صحنه - بیستون روش کریجینگ معمولی با نیم‌تغییرنمای گوسی ارزیابی می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه مقدار MBE برای همه مدل‌ها منفی است. بنابراین می‌توان گفت که تمامی مدل‌های مورد استفاده کم‌برآورد هستند.

پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت صحنه - بیستون

نتایج پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت صحنه - بیستون در سه دهه مطالعاتی پس از انتخاب نیم‌تغییرنما و روش میان‌یابی مناسب در شکل ۹ ارائه شده است. بر مبنای پهنه‌بندی‌های انجام گرفته، اختلاف میانگین حداقل و حداکثر سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در طول سه دهه سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ بین ۱۲۸۹ تا ۱۴۰۹ متر حاصل شده است (شکل ۹). به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شمال و شرق منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. در نتیجه هرچه به نواحی

روش مناسب پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی یک منطقه بشمار می‌رود. بدین منظور از روش‌های زمین‌آماری در نرم‌افزار ArcGIS®10.6 برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات مکانی استفاده شد. تمامی داده‌های مربوطه از نظر نرمال بودن و برازش واریوگرام مناسب به ساختار مکانی داده‌ها و پارامترهای موردنظر با استفاده از نرم‌افزار GS+®5.1 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در نهایت برای پهنه‌بندی و مدل‌سازی سطح و تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از تخمین‌گر زمین‌آماری کریجینگ استفاده شد. همچنین برای ارزیابی و دقت مدل تخمین‌گر زمین‌آماری و قطعی و بررسی خطای میان‌یابی و تعیین شاخص‌های مورد نظر از تکنیک اعتبارسنجی متقاطع استفاده شد.

نتایج و بحث

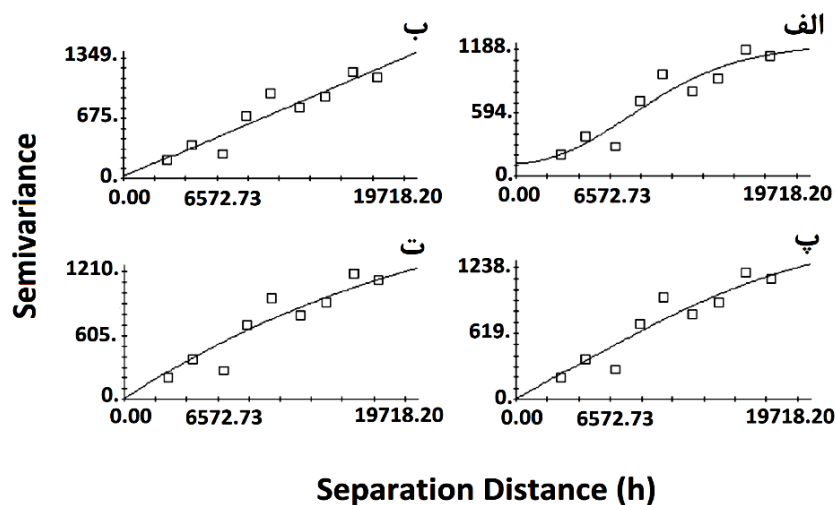
میانگین سطح آب زیرزمینی

انتخاب نیم‌تغییرنمای مناسب برای میانگین سطح آب زیرزمینی نتایج برازش نیم‌تغییرنمای میانگین سطح آب زیرزمینی شامل چهار مدل گوسی (الف)، خطی (ب)، کروی (پ) و نمایی بر مشاهدات و مقادیر عامل‌های مدل‌های مذکور در شکل ۷ و جدول ۲ ارائه شده است. نتایج مقایسه عامل‌ها نشان داد مدل گوسی کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی یا ضریب تعیین (R^2) با مشاهدات را دارا بوده و بهترین مدل برازش شده است. لذا برای میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی از مدل گوسی استفاده شده است.

انتخاب روش میان‌یابی مناسب برای میانگین سطح آب زیرزمینی

پس از انتخاب نیم‌تغییرنمای مناسب میانگین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با روش‌های مختلفی میان‌یابی و کیفیت عملکرد هر روش ارزیابی شد. نتایج میان‌یابی مشاهدات با ۶ روش مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج

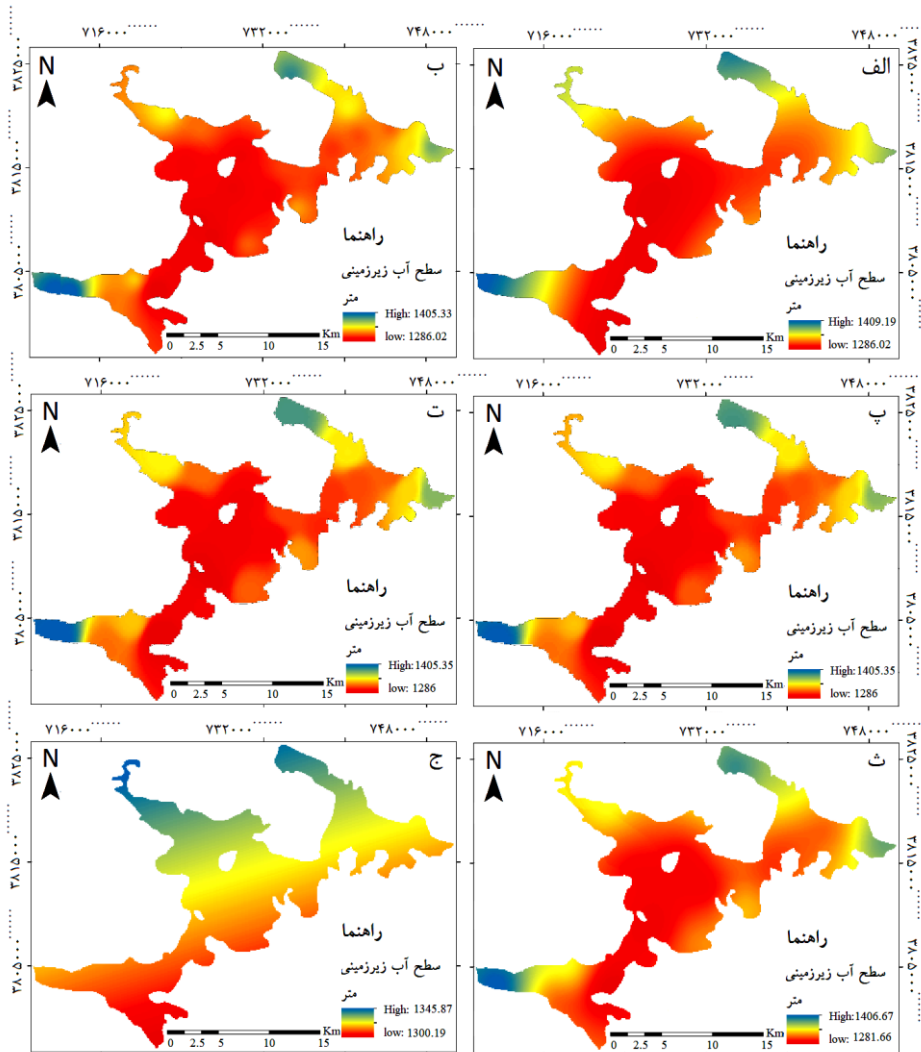
میانگین سطح آب زیرزمینی در کل دوره



شکل ۷. نیم تغییرنمای تجربی (مربع‌های توخالی) و مدل‌های برازش شده برای میانگین سطح آب زیرزمینی (الف: مدل گوسی، ب: مدل خطی، پ: کروی و ت: نمایی)

جدول ۲. عامل‌های مدل‌های برازش شده بر میانگین سطح آب زیرزمینی

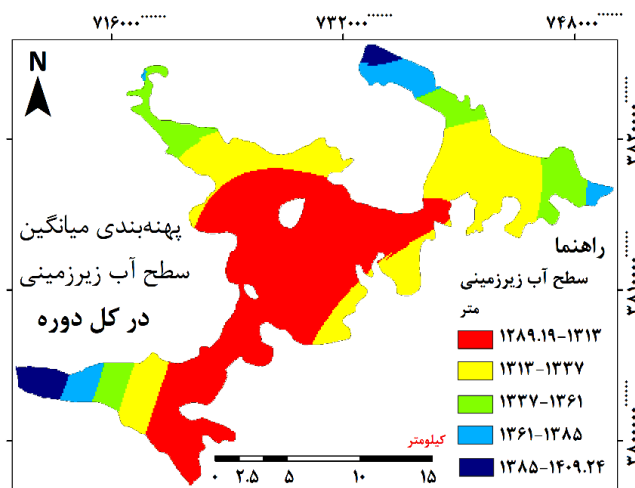
ضریب تعیین R ²	مجموع مربعات خطا RSS	تناسب مکانی C/(C ₀ + C)	شعاع تأثیر (A ₀)	آستانه (C ₀ + C)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	مدل	دهه‌ها
۰/۹	۱۲۰۹۵۶	۰/۹	۱۸۹۸۳/۳	۱۲۲۰	۱۱۸	گوسی	میانگین کل دوره
۰/۸۷	۱۳۷۳۳۴	۰/۹۸	۱۷۸۴۶/۸	۱۲۲۳/۲	۲۱/۸	خطی	
۰/۸۸	۱۳۰۵۱۸	۰/۹۹	۲۷۱۲۰	۱۳۷۸	۱	کروی	
۰/۸۸	۱۴۴۱۲۱	۱	۶۹۷۲۰	۲۱۱۲	۱	نمایی	
۰/۹	۱۲۱۳۹۰	۰/۹	۲۱۸۹۳/۱	۱۴۰۴	۱۵۲	گوسی	دهه اول
۰/۹	۱۲۶۰۲۲	۰/۹	۱۷۶۵۱/۱	۱۲۳۱	۱۸/۸	خطی	
۰/۸۹	۱۲۳۴۹۸	۰/۹۹	۳۸۳۲۰	۱۹۲۶	۱	کروی	
۰/۸۹	۱۵۵۱۹۴	۱	۶۶۳۰۰	۲۲۱۲	۱	نمایی	
۰/۹	۱۲۰۹۲۴	۰/۹۱	۱۸۴۹۸/۳	۱۲۱۰	۱۱۵	گوسی	دهه دوم
۰/۹	۱۴۱۰۶۴	۰/۹۸	۱۷۸۶۴/۸	۱۲۲۹/۳	۳۰/۹	خطی	
۰/۸۸	۱۳۱۴۵۷	۰/۹۹	۲۵۶۲۰	۱۳۲۹	۱	کروی	
۰/۸۸	۱۴۳۵۱۲	۱	۶۸۷۳۰	۲۱۱۲	۱	نمایی	
۰/۹	۱۱۹۳۳۷	۰/۹	۱۹۷۴۵/۴	۱۲۳۴	۱۲۲	گوسی	دهه سوم
۰/۹	۱۳۰۹۳۹	۰/۹۹	۱۷۸۴۶/۸	۱۲۰۸/۹	۱۱/۱	خطی	
۰/۸۸	۱۲۷۴۱۳	۰/۹۹	۲۹۴۲۰	۱۴۴۹	۱	کروی	
۰/۸۸	۱۴۳۰۷۸	۱	۷۱۱۳۰	۲۱۱۲	۱	نمایی	



شکل ۸. پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی با روش‌های مختلف میان‌یابی (الف: کریجینگ معمولی، ب: فاصله معکوس موزون با توان ۲، پ: فاصله معکوس موزون با توان ۳، ت: فاصله معکوس موزون با توان ۴، ث: اسپیلاین و ج: چندجمله‌ای عمومی) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳. معیارهای ارزیابی کیفیت روش‌های میان‌یابی سطح آب زیرزمینی

دهه‌ها	مدل	RMSE	MBE	MAE	R ²
میانگین کل دوره	کریجینگ معمولی	۲۰/۳	-۳/۷	۱۴/۲	۰/۶
	فاصله معکوس موزون با توان ۲	۲۸/۶	-۷/۸	۱۹/۵	۰/۱۶
	فاصله معکوس موزون با توان ۳	۲۸	-۷/۶	۱۹/۴	۰/۱۹
	فاصله معکوس موزون با توان ۴	۲۷/۸	-۷/۵	۱۹/۴	۰/۲
	اسپیلاین	۲۷/۱	-۵/۱	۱۸/۴	۰/۲۲
	چندجمله‌ای عمومی	۳۵/۲	-۱/۷	۲۶/۲	۰/۱۷
دهه اول دهه دوم دهه سوم	کریجینگ معمولی	۲۳/۵	-۳/۸	۱۶/۸	۰/۵
	کریجینگ معمولی	۲۰/۱	-۳/۶	۱۴/۱	۰/۶
	کریجینگ معمولی	۲۰/۶	-۳/۷	۱۴/۴	۰/۶



شکل ۹. پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت صحنه - بیستون در دوره مطالعاتی

میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه دوم مورد استفاده قرار گرفته است. در دهه سوم نیز مدل گوسی کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی با مشاهدات را دارا بوده و بهترین مدل برازش شده است. در این دهه نیز هر چند میزان همبستگی مدل خطی و مدل گوسی به یک اندازه برآورد شده است اما مدل گوسی به دلیل مقدار پایین‌تر مجموع مربعات خطا، در نهایت برای میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است.

پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی برای دهه‌های اول،

دوم و سوم در آبخوان دشت صحنه - بیستون

پس از انتخاب نیم‌تغییرنما، میانگین سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت صحنه - بیستون در دهه اول، دوم و سوم با روش کریجینگ معمولی پهنه‌بندی شد و نتیجه آن در شکل ۱۰ ارائه شد. میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه اول بین ۱۲۹۰ تا ۱۳۹۵ متر بوده است. به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شمال غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. معیارهای ارزیابی میان‌یابی انجام شده برای سطح آب در دهه

مرکزی و جنوبی نزدیک شویم سطح آب زیرزمینی در عمق بیشتری قرار می‌گیرد.

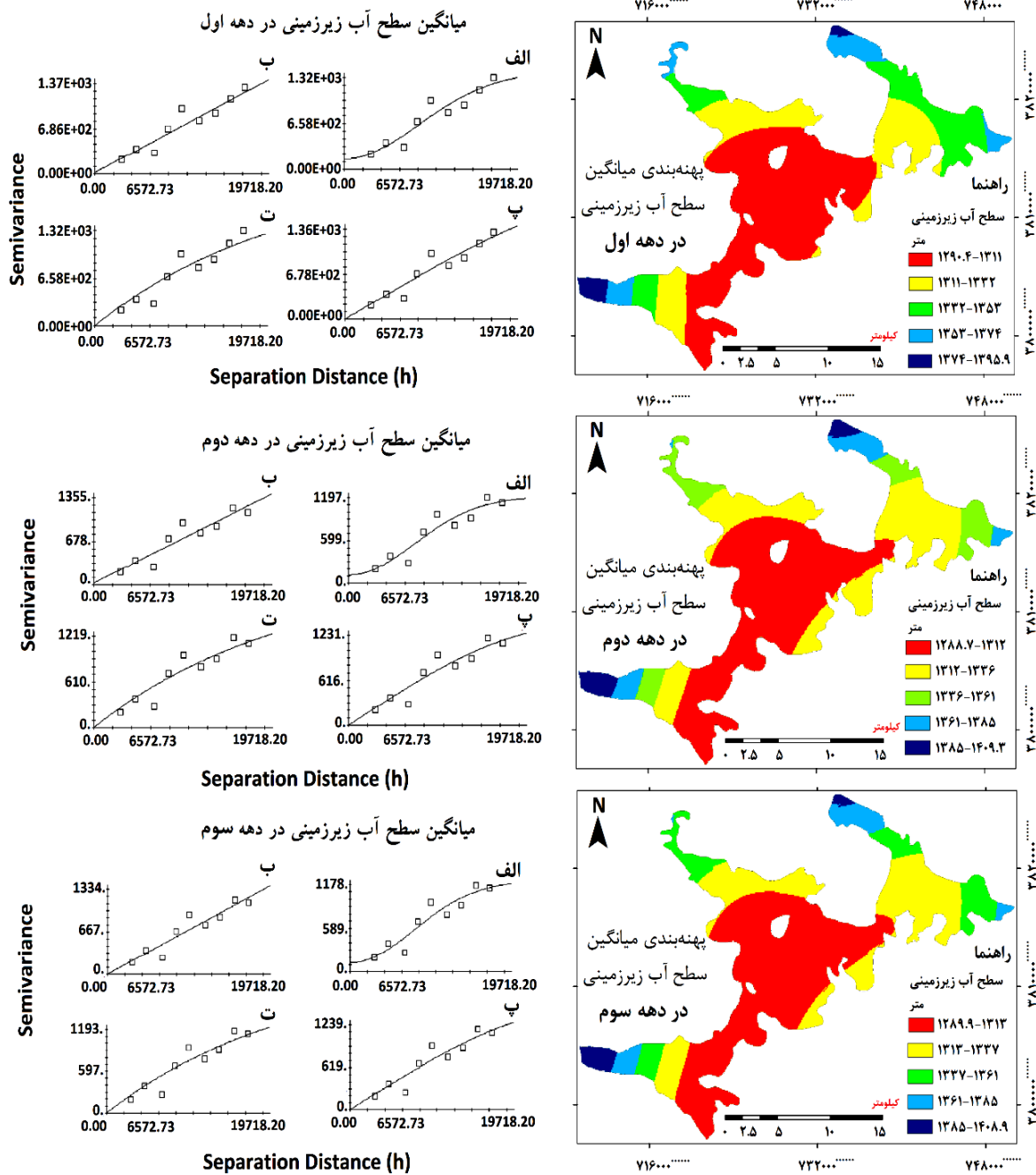
میانگین سطح آب‌های زیرزمینی در دهه‌های اول، دوم و سوم

بین سال‌های ۱۳۷۰ - ۱۳۹۹

انتخاب نیم‌تغییرنمای مناسب برای میانگین سطح آب

زیرزمینی در سه دهه

نیم‌تغییرنمای میانگین سطح آب زیرزمینی برای دهه‌های اول، دوم و سوم در شکل ۱۰ ارائه شده است. چهار مدل گوسی (الف)، خطی (ب)، کروی (پ) و نمایی بر مشاهدات برازش شده‌اند. عامل‌های مربوط به هر مدل‌ها برای ارزیابی در جدول ۲ ارائه شده است. با مقایسه عامل‌ها مشخص شد در دهه اول مدل گوسی کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی با مشاهدات را دارا بوده و بهترین مدل برازش شده است. لذا برای میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه اول از مدل گوسی استفاده شده است. در دهه دوم نیز مدل گوسی کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی با مشاهدات را دارا بوده و بهترین مدل برازش شده است. هر چند میزان همبستگی مدل خطی و مدل گوسی به یک اندازه برآورد شده است اما مدل گوسی به دلیل مقدار پایین‌تر مجموع مربعات خطا، در نهایت برای



شکل ۱۰. سمت چپ نیم‌تغییرنمای تجربی (مربع‌های توخالی) و مدل‌های برازش شده برای میانگین سطح آب زیرزمینی دهه اول، دوم و سوم (الف: مدل گوسی، ب: مدل خطی، پ: کروی و ت: نمایی) سمت راست پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت صحنه - بیستون در دهه‌های اول، دوم و سوم دوره مطالعاتی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مربعات خطای میان‌یابی (RMSE) در دهه اول نسبت به میانگین سه دهه ۳/۲ واحد بیشتر، میانگین انحراف خطا (MAE) ۲/۶ (MBE) ۰/۱ واحد بیشتر، میانگین قدر مطلق خطا

اول در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس این جدول میان‌یابی میانگین سطح آب در دهه اول با خطای بیشتر و دقت کمتری نسبت به میان‌یابی میانگین سه دهه انجام شده است. میانگین

زیرزمینی در ۴۷ درصد از منطقه با کاهش و در ۵۳ درصد از منطقه با افزایش مواجه بوده است (جدول ۴). بیشترین مقدار کاهش سطح آب زیرزمینی به اندازه ۱۲ تا ۸ متر بوده که در جنوب و شمال شرقی به وقوع پیوسته و ۷/۸ درصد از منطقه را شامل می‌شود. سطح آب در ۱۱/۹ درصد از منطقه نیز بین ۴ تا ۸ متر کاهش یافته که این بخش‌ها نیز در جنوب، شمال شرقی، مرکز و شمال منطقه قرار دارند. کمترین مقدار کاهش که بین صفر تا ۴ متر است در ۲۷/۳ درصد از منطقه به وقوع پیوسته که این نواحی نیز در شمال شرقی، جنوب، مرکز و شمال منطقه دیده می‌شوند. بیشترین مقدار افزایش سطح آب که بین ۱۶ تا ۱۹ متر بوده است و فقط در ۱/۸ درصد از سطح آبخوان رخ داده است که در جنوب غربی و شمال منطقه هستند. در ۶ درصد از منطقه افزایش سطح آب به بین ۱۲ تا ۱۶ متر بوده که این بخش‌ها نیز در جنوب غرب، جنوب و شمال آبخوان قرار دارند. در ۱۳/۴ درصد از منطقه افزایش سطح آب بین ۴ تا ۸ و در ۲۴/۷ درصد نیز بین صفر تا ۴ متر بوده است. این مناطق در مرکز، جنوب غرب، شرق، شمال شرقی و شمال آبخوان دشت صحنه - بیستون قرار دارند. به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شمال غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی قرار داشته است. از نظر مقدار خطای میان‌یابی دهه اول خطای بیشتر و دقت کمتری نسبت به میانگین کل دوره داشته است. بررسی نیم‌تغییرنمای مناسب برای میان‌یابی سطح آب در دهه دوم نیز به برتری نیم‌تغییرنمای گوسی بر مدل‌های کروی، نمایی و خطی انجامید.

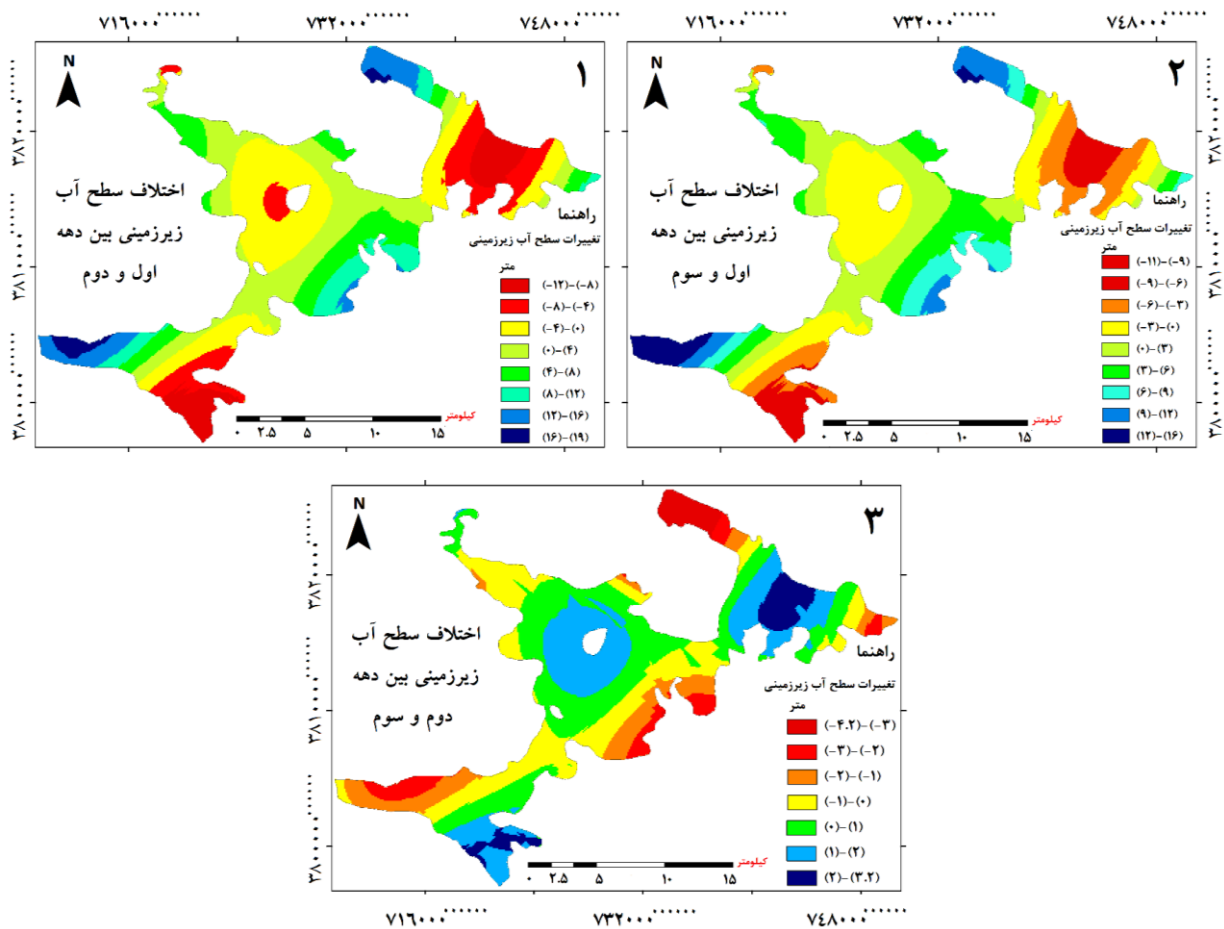
تفاوت دهه اول و سوم

سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از دهه اول به سوم تغییراتی بین ۱۱- تا ۱۶ متر داشته است (شکل ۱۱). سطح آب زیرزمینی در ۴۴ درصد از منطقه با کاهش و در ۵۶ درصد از منطقه با افزایش مواجه بوده است (جدول ۴). بیشترین مقدار کاهش سطح آب زیرزمینی به اندازه ۱۱ تا ۹ متر بوده که در

واحد بیشتر و مقدار ضریب تعیین (R^2) به‌نماینده‌گی میزان همبستگی ۰/۱ واحد کمتر بوده است. میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه دوم نیز بین ۱۲۸۸ تا ۱۴۰۹ متر بوده است. به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی در این دهه نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. لذا در دهه دوم نیز هرچه به نواحی مرکزی و جنوبی نزدیک شده، سطح آب زیرزمینی در عمق بیشتری قرار می‌گیرد. کیفیت میان‌یابی در دهه دوم نسبت به دهه اول و میانگین سه دهه بهبود یافته است، به نحوی که مقدار RMSE نسبت به میان‌یابی میانگین کل دوره ۰/۲ واحد کاهش، مقدار MAE و MBE ۰/۱ واحد کاهش داشته‌اند. مقدار ضریب تعیین بین مشاهدات و برآوردها نیز ۰/۶ بوده که برابر با مقدار متناظر در میان‌یابی سطح آب برای کل دوره است. میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه سوم نیز بین ۱۲۸۹ تا ۱۴۰۸ متر بوده است. به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در این دهه نیز در جنوب غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. معیارهای ارزیابی میان‌یابی در این دهه نشان می‌دهد که میان‌یابی میانگین سطح آب زیرزمینی در دهه سوم نسبت به دهه اول کیفیت بهتری داشته است اما نسبت به میانگین سه دهه و میانگین دهه دوم اندکی ضعیف‌تر بوده است به‌نحوی که مقدار RMSE نسبت به میانگین کل دوره ۰/۳ واحد و مقدار MAE ۰/۲ واحد بیشتر بوده‌اند. مقدار MBE با مقدار متناظر آن در میان‌یابی میانگین کل دوره برابر است ولی نسبت به دهه دوم ۰/۱ واحد افزایش دارد. با وجود این مقدار همبستگی در دهه سوم برابر با دهه دوم و میانگین کل دوره است (۹ و ۲۰).

تفاوت دهه اول و دوم

سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از دهه اول به دوم تغییراتی بین ۱۲- تا ۱۹ متر داشته است (شکل ۱۱). سطح آب



شکل ۱۱. اختلاف سطح آب زیرزمینی بین دهه‌های اول و سوم، اول و دوم، دوم و سوم

جدول ۴. تغییرات سطح آب زیرزمینی بین دهه‌های اول تا سوم

مجموع مساحت		مساحت		تغییرات	
درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	مقدار	حالت
۴۷	۱۳۱/۳	۷/۸	۲۱/۷	(-۱۲) - (-۸)	کاهش
		۱۱/۹	۳۳/۵	(-۸) - (-۴)	
		۲۷/۳	۷۶/۱	(-۴) - (۰)	
۵۳	۱۴۷/۸	۲۴/۷	۶۸/۸	(۰) - (۴)	زیرزمینی
		۱۳/۴	۳۷/۴	(۴) - (۸)	
		۷/۱	۱۹/۸	(۸) - (۱۲)	افزایش
		۶	۱۶/۹	(۱۲) - (۱۶)	
		۱/۸	۴/۹	(۱۶) - (۱۹)	

ادامه جدول ۴

مجموع مساحت		مساحت		تغییرات	
درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	مقدار	حالت
		۱/۶	۴/۳	(-۹)-(-۱۱)	
۴۴	۱۲۲/۵	۶/۷	۱۸/۷	(-۶)-(-۹)	کاهش
		۱۰/۹	۳۰/۳	(-۳)-(-۶)	تغییرات سطح
		۲۴/۸	۶۹/۲	(-۳)-(-۰)	آب
		۲۳/۴	۶۵/۳	(۰)-(-۳)	زیرزمینی
		۱۶/۱	۴۵/۱	(۳)-(-۶)	دهه اول و سوم
۵۶	۱۵۶/۶	۷/۷	۲۱/۸	(۶)-(-۹)	افزایش
		۵/۲	۱۴/۴	(۹)-(-۱۲)	
		۳/۶	۱۰	(۱۲)-(-۱۶)	
		۳/۳	۹/۲	(-۳)-(-۴/۲)	
۴۲/۴	۱۱۸/۷	۵/۷	۱۶	(-۳)-(-۲)	کاهش
		۱۰/۷	۲۹/۹	(-۲)-(-۱)	تغییرات سطح
		۲۲/۷	۶۳/۶	(-۱)-(-۰)	آب
		۲۹/۷	۸۲/۶	(۰)-(-۱)	زیرزمینی
۵۷/۶	۱۶۰/۳	۲۲/۲	۶۱/۹	(۱)-(-۲)	افزایش
		۵/۷	۱۵/۸	(۲)-(-۳/۲)	دهه دوم و سوم

است. این مناطق در مرکز، جنوب، جنوب غرب، شرق، شمال شرقی و شمال آبخوان دشت صحنه - بیستون قرار دارند. در این دهه نیز به طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار داشته و بیشترین عمق آب زیرزمینی در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. بر اساس معیارهای ارزیابی کیفیت میان‌یابی مشخص شد که دقت در این دهه بیشتر از دهه اول و میانگین کل دوره بوده است.

تفاوت دهه دوم و سوم

سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از دهه دوم به سوم تغییراتی بین ۴- تا ۳ متر داشته است (شکل ۱۱). سطح آب زیرزمینی در ۴۲/۴ درصد از منطقه با کاهش و در ۵۷/۶ درصد

اینجا نیز در مناطق جنوب و شمال شرقی به وقوع پیوسته و ۱/۶ درصد از منطقه را شامل می‌شود. در ۶/۷ درصد از منطقه نیز سطح آب بین ۶ تا ۹ متر کاهش یافته که این بخش‌ها نیز بیشتر در جنوب منطقه قرار دارند. کمترین مقدار کاهش که بین ۰ تا ۳ متر است در ۲۴/۸ درصد از منطقه به وقوع پیوسته که این نواحی نیز در شمال شرقی، جنوب، مرکز و شمال منطقه دیده می‌شوند. بیشترین مقدار افزایش سطح آب که بین ۱۲ تا ۱۶ متر بوده است و در ۳/۶ درصد از سطح آبخوان رخ داده است که در جنوب غربی و شمال منطقه واقع شده‌اند. در ۵/۲ درصد از منطقه افزایش به بین ۹ تا ۱۲ متر بوده که این بخش‌ها نیز در جنوب غرب، جنوب و شمال آبخوان قرار دارند. سطح آب زیرزمینی در ۷/۷ درصد از منطقه افزایش بین ۶ تا ۹، در ۱۶/۱ درصد ۳ تا ۶ متر و در ۲۳/۴ درصد نیز بین صفر تا ۳ متر بوده

زیرزمینی در سال ۱۳۹۴ نسبت به سال ۱۳۷۰ توسط این پژوهشگران بررسی شده است. درحالی که در تحقیق حاضر از میانگین‌های دهه‌ای برای بررسی تغییرات استفاده شده است که می‌تواند با دقت بالاتری تغییرات را در طول زمان نشان داده و از اعتبار بیشتری در بررسی تغییرات زمانی مکانی برخوردار باشند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تغییرات زمانی مکانی سطح آب زیرزمینی در سه دهه بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ در دشت صحنه - بیستون استان کرمانشاه پرداخته شد و میانگین سطح آب زیرزمینی برای کل دوره ارزیابی، محاسبه و ارائه شد. چهار نیم‌تغییرنمای گوسی، خطی، کروی و توانی برای مشاهدات مورد بررسی قرار گرفت و با مقایسه عامل‌ها مشخص شد که مدل گوسی کمترین مقدار مجموع مربعات خطا و بیشترین مقدار همبستگی با مشاهدات را دارا است. لذا نیم‌تغییرنمای گوسی برای پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی منطقه به‌عنوان مناسب‌ترین نیم‌تغییرنما انتخاب شد که نتایج غفاری و همکاران (۹) و نیلزاد و همکاران (۱۵) را تأیید می‌کند. میانگین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی، فاصله معکوس موزون با توان‌های ۲، ۳ و ۴، اسپیلاین و چندجمله‌ای عمومی میان‌یابی شد. روش کریجینگ معمولی با وریوگرام گوسی، بهترین روش برای میان‌یابی و پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی با کمترین معیارهای خطا شامل RMSE، MBE و MAE و بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2) بین مشاهدات و برآوردها در دشت صحنه - بیستون بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ است که نتایج نیلزاد و همکاران (۱۵) و صمدی و صمدی (۲۰) را تأیید می‌کند. بهترین کیفیت میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در منطقه، مربوط به دهه دوم و بیشترین خطا مربوط به دهه اول است. هرچند که مقدار خطا و دقت در دهه دوم، سوم و میانگین کل دوره با هم تفاوت دارند ولی به‌هم نزدیک هستند. به‌طورکلی متوسط تغییرات سطح آب زیرزمینی در

از منطقه با افزایش مواجهه بوده است (جدول ۴). بیشترین مقدار کاهش سطح آب زیرزمینی به‌اندازه ۳ تا ۴ متر بوده که در اینجا نیز در مناطق شمال و مناطق کوچکی از جنوب به وقوع پیوسته و ۳/۳ درصد از منطقه را شامل می‌شود. در ۵/۷ درصد از منطقه نیز سطح آب بین ۲ تا ۳ متر کاهش یافته که این بخش‌ها نیز بیشتر در جنوب، جنوب غرب، شمال و شمال شرق منطقه قرار دارند. کمترین مقدار کاهش که بین صفر تا ۱ متر است در ۲۲/۷ درصد از منطقه به‌وقوع پیوسته که این نواحی نیز در شمال، شمال شرقی، جنوب و جنوب غربی منطقه دیده می‌شوند. بیشترین مقدار افزایش سطح آب که بین ۲ تا ۳ متر بوده است در ۵/۷ درصد از سطح آبخوان رخ داده است که در جنوب غربی و شمال شرقی منطقه واقع شده‌اند. سطح آب زیرزمینی در ۲۲/۲ درصد از منطقه (در جنوب غرب، مرکز و شمال شرق آبخوان دشت صحنه - بیستون) به میزان ۱ تا ۲ متر و در ۲۹/۷ درصد منطقه (شمال شرق، شمال، جنوب و جنوب غرب آبخوان دشت صحنه - بیستون) نیز بین صفر تا ۱ متر افزایش داشته است. در این دهه نیز به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی در جنوب غربی، شرق و شمال منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. کیفیت میان‌یابی در دهه سوم نسبت به دهه اول بهتر ولی نسبت به دهه دوم و میانگین کل دوره اندکی ضعیف‌تر بوده است. نتایج بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در دشت صحنه - بیستون در هر دو دهه دوم و سوم نسبت به دهه اول در بیشتر از ۵۰ درصد از منطقه سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و در دهه سوم نیز نسبت به دهه دوم به‌همین شکل در بیش از ۵۰ درصد از منطقه افزایش سطح آب زیرزمینی دیده می‌شود. درحالی که بر اساس نتایج نیلزاد و همکاران (۱۵) در بیشتر نواحی دشت بیستون افت شدید سطح آب زیرزمینی به‌وقوع پیوسته است. دلیل اختلاف نتایج در دوره مورد بررسی با نیلزاد و همکاران (۱۵) ناشی از آن است که تنها شرایط تغییرات سطح آب

مقدار افزایش سطح آب زیرزمینی بین ۱۶ تا ۱۹ متر فقط در ۱/۸ درصد از سطح آبخوان در محدوده چاه‌های سه‌چک و سنگ‌چین (در جنوب غربی و شمال منطقه مورد مطالعه) بین دهه‌های اول و دوم رخ داده است. همچنین میزان تراز آب زیرزمینی، چاه سنگ‌چین، سه‌چک و دهمرادخان به ترتیب با ۱۳۷۲/۹۶، ۱۳۹۶/۹۴ و ۱۳۶۶/۴۷ دارای بالاترین سطح ایستابی و چاه بلوردی قدیم، چم‌بطان و نادرآباد به ترتیب با ۱۲۷۹/۹۷، ۱۲۸۵/۵۹ و ۱۲۸۶/۰۱ دارای پایین‌ترین سطح ایستابی در طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ بوده‌اند. بالا آمدن سطح ایستابی در محدوده چاه‌های سه‌چک و سنگ‌چین بین دهه اول و دوم می‌تواند ناشی از ترسالی و مدیریت برداشت آب در این سال‌ها باشد. نتایج این تحقیق که به‌نوعی پایش تغییرات آب زیرزمینی در سه دهه اخیر را رصد کرده است، کمک مؤثری برای کارشناسان و بهره‌برداران در برنامه‌ریزی و مدیریت آب زیرزمینی به‌منظور توسعه پایدار منابع آبی را به‌همراه دارد.

منطقه بین ۱۲۸۹/۱۹ تا ۱۴۰۹/۲۴ متر بوده است. سطح آب در جنوب غربی، شمال و شرق منطقه در ارتفاع بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر قرار دارد. بیشترین عمق آب زیرزمینی نیز در نواحی مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. بنابراین با نزدیکی به نواحی مرکزی و جنوبی، سطح آب زیرزمینی در عمق بیشتری قرار می‌گیرد. تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در قالب سه دهه شامل دهه اول از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۹، دهه دوم از ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ و دهه سوم از ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ به ترتیب بین ۱۲۹۰ تا ۱۳۹۵ متر، ۱۲۸۸ تا ۱۴۰۹ متر و ۱۲۸۹ تا ۱۴۰۸ متر بوده است. در مجموع تغییرات سطح آب زیرزمینی در دهه‌های دوم نسبت به اول، سوم نسبت به اول و دوم به ترتیب بین ۱۲- تا ۱۹ متر، ۱۱- تا ۱۶ متر و ۴/۲- تا ۳/۲ متر بوده است. به‌عبارت دیگر بر مبنای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی سه دهه نسبت به همدیگر، بیشترین میزان کاهش و افزایش به ترتیب تا ۱۲ متر و تا ۱۹ متر بوده است. بیشترین

منابع مورد استفاده

1. Akbari, M., M. R. Jarge and H. Madani Sadat. 2009. Assessment of decreasing of groundwater-table using geographic information system (GIS) (Case study: Mashhad plain aquifer). *Journal of Water and Soil Conservation (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)* 16(4): 63-78.
2. Arkoç, O. 2022. Modeling of spatiotemporal variations of groundwater levels using different interpolation methods with the aid of GIS, case study from Ergene Basin, Turkey. *Modeling Earth Systems and Environment* 8(1): 967-976.
3. Anand, B., D. Karunanidhi, T. Subramani, K. Srinivasamoorthy and M. Suresh. 2020. Long-term trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in Lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. *Environment. Development and Sustainability* 22(4): 2779-2800.
4. Ammeish, E. S., B. M. Mabrouk and W. S. Morsy. 2016. RS and GIS based approach for detecting landuse changes and its impact on the groundwater aquifer. *Life Science Journal* 13(4): 62-74.
5. Behmanesh, J. 2016. Investigation of groundwater level changes trend (Case study: Urmia plain). *Journal of Water and Soil Conservation* 22(4): 67-84.
6. Barkat, A., F. Bouaicha, T. Mester, M. Debabeche and G. Szabó. 2022. Assessment of spatial distribution and temporal variations of the phreatic groundwater level using geostatistical modelling: the case of oued souf valley—southern East of Algeria. *Water* 14(9): 1415.
7. Choi, W., U. Galasinski, S. J. Cho and C. S. Hwang. 2012. A Spatiotemporal analysis of groundwater level changes in relation to urban growth and groundwater recharge potential for waukesha county. *Wisconsin Geographical Analysis* 44(3): 219-234.
8. Dubois, E., M. Larocque. S. Gagné and G. Meyzonnat. 2021. Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: contributions of a water budget approach in cold and humid climates. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(12): 6567-6589.
9. Ghafari, S., H. Moradi and R. Modares. 2018. Comparison of temporal and spatial changes of groundwater level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan plains. *Physical Geography Research Quarterly* 50(1): 22-24.
10. Hussain, S., L. Lu, M. Mubeen, W. Nasim, S. Karuppannan, S. Fahad, A. Tariq, B. G. Mousa, F. Mumtaz and M. Aslam. 2022. Spatiotemporal variation in land use land cover in the response to local climate change using

- multispectral remote sensing data. *Land* 11(5): 595.
11. Khashei-Siuki, A. and M. Sarbazi. 2015. Evaluation of anfis, ann, and geostatistical models to spatial distribution of groundwater quality (Case study: Mashhad plain in Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 8(2): 903-912.
 12. Moukana, J. A. and K. Koike. 2008. Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images. *Computers & Geosciences* 34(11): 1527-1540.
 13. Moumane, A., F. E. Ghazali, J. Karkouri, J. Delorme, M. Batchi, D. Chafiki and A. Karmaoui. 2021. Monitoring spatiotemporal variation of groundwater level and salinity under land use change using integrated field measurements, GIS, geostatistical, and remote-sensing approach: case study of the Feija aquifer, Middle Draa watershed, Moroccan Sahara. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(12): 1-21.
 14. Nikbakht, S. and M. Delbari. 2014. Estimation of groundwater levels using geostatistical methods. *Journal of Water and Sustainable Development* 1(1): 49-56.
 15. Nilzad, M., H. Moradi and K. Jalili. 2018. Estimation of temporal and spatial variations of the level of the aquifers in bisotun plain of kermanshah province with geostatistical methods. *Irrigation & Water Engineering* 8(32): 79-92.
 16. Palangi, J., M. Gholami Sefidkouhi and M. Abdimoftikolai. 2017. Spatial and temporal variability analysis of shallow water table using deterministic and geostatistical methods (case study: dashte- naz of sari). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 11(2): 192-201.
 17. Piri, H. and A. Bameri. 2014. Investigating the quantity variation trend of ground water table using geostatistics and Gis (Case study: Sirjan plain). *Journal of Rs and Gis for Natural Resources* 5(1): 29.
 18. Rajayee, T. and F. Pouraslan. 2015. Spatiotemporal groundwater level forecasting in Davarzan plain. *Hydrogeomorphology* 2(4): 1-19.
 19. Singh, C. K. and Y. B. Katpatal. 2018. Spatial and temporal variations of groundwater level (Case study: Wainganga sub-basin, Nagpur, India. *Groundwater* 21-30.
 20. Samadi, J. and J. Samadi. 2017. Spatial-temporal modeling of groundwater level variations of urban and rural areas in Kashan aquifer using Gis techniques. *Journal of Environmental Science and Technology* 19(1-72): 63-77.
 21. Sahebjalal, E., F. Dehghany and M. S. Tabatabaezade. 2013. Investigating spatio-temporal variations of groundwater quality using Kriging method TT. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 17(65): 51-61.

Spatiotemporal Variations Modelling of Water Table Surface using GIS in Sahneh-Biston Plain Aquifer

K. Shirani^{1*}, R. Arfania², Y. Fereydoni³, R. Naderi Samani³, M. Shariati⁴
and M. Faizi³

(Received: June 21-2022; Accepted: July 27-2022)

Abstract

Groundwater is always considered one of the important water resources, especially in arid and semi-arid regions of the world, such as Iran. In recent decades, it has decreased drastically due to excessive use. The objective of this study was to determine the best interpolation method and evaluation of the spatiotemporal variations for the groundwater level in the Sahneh-Biston plain of Kermanshah province during three decades from 1991 to 2020. At first, four Gaussian, linear, spherical, and power semi-variograms were obtained for observations. Then, the best semi-variogram and interpolation methods were selected among the evaluated methods for zoning the groundwater level in the region. The lowest value of the sum of RMSE, MBE, and MAE error criteria and the highest coefficient of determination (R^2) between observations and estimates in all three decades and the average of the entire period were calculated and considered to evaluate the most appropriate semi-variogram and interpolation methods for spatial distribution. The results showed that the ordinary kriging method with Gaussian semi-variogram is the best method to estimate the groundwater level in the Sahneh-Biston plain. The average difference between the minimum and maximum groundwater levels based on the observation wells of the study area and the zonation method is from 1279 to 1372 meters and 1289 to 1409 meters during the studied period time, respectively. The groundwater level is placed in more depth with the proximity to the central and southern regions. The maximum decrease and increase of groundwater level variations have been 12 and 19 meters during three decades, respectively. Also, the underground water level variations during these three decades showed that both the second and third decades compared to the first decade and the third decade compared to the second decade have increased in more than 50% of the region. This increase can be caused by the optimum management and water use in these years. Therefore, groundwater level monitoring provides effective help for experts and users in planning and optimal management of groundwater for the sustainable development of water resources.

Keywords: Sahneh-Biston plain, Groundwater, Semi-variogram, Interpolation

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

2. Department of Geology, Faculty of Technology and Engineering, Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan) Branch, Isfahan, Iran.

3. Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center (AREEO), Isfahan, Iran.

4. Department of Environmental Planning, Management and Education, Faculty of Environment, Tehran University, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: KouroshShirani@gmail.com