



دوره ۳۵، شماره ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۳۵، تابستان ۱۴۰۱، صفحه‌های ۴۵-۵۹

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.356299.1437

پژوهش‌های آبخیزداری

مقاله‌ی پژوهشی



تغییر مکانی و زمانی تراز ایست‌آبی زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین، استان اردبیل

زینب حزباوی

(نویسنده‌ی مسئول) * استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مرتضی قراچورلو

دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

* رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: z.hazbavi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۲ مهر ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۸ آبان ۱۴۰۰

چکیده

این پژوهش با هدف آگاهی از تغییر زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین در استان اردبیل بر پایه‌ی تحلیل‌های آمار فضایی و وایازی (رگرسیون) زمانی و با داده‌های ژرفای آب زیرزمینی در مقیاس سالانه در ۲۰ چاه نمونه در دهه‌ی ۱۳۸۶-۱۳۹۵ انجام شد. برای دستیابی به روش بهینه‌ی پهنه‌بندی تغییرهای مکانی تراز آب زیرزمینی از مقایسه‌ی روش‌های گوناگون درون‌یابی مانند تابع‌های شعاعی پایه، وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ بر پایه‌ی اعتبارسنجی متقاطع بهره‌گیری شد. رابطه‌های وایازی میان تراز آب زیرزمینی و سال‌های بررسی، برای شناخت شیوه‌ی افزایش و کاهش مجموعه‌ی زمانی داده‌ها برازش داده شدند. نتیجه‌ی مقایسه‌ی روش‌های درون‌یابی بر پایه‌ی اعتبارسنجی متقاطع نشان داد که ریشه‌ی دوم میانگین مربع‌های خطا به‌دست‌آمده از کاربرد روش‌های تابع‌های شعاعی پایه، وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ به‌ترتیب ۲۱/۹۸، ۲۲/۸۵ و ۲۲/۵۷ در ۱۳۸۶، ۲۳/۴۵ و ۲۷/۸۸ و ۲۶/۲۵ در ۱۳۹۵ بود. بنابراین، به‌دلیل توان به‌کار برده‌شده بر داده‌های پراکنده، و کم بودن جاهای نمونه‌برداری در هر دو سال، خطای برآورد روش تابع شعاعی پایه کم‌ترین بود، و روش بهینه‌ی برآورد تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین دانسته شد. میانگین وزنی افت در کل آبخوان در این دهه نُه متر محاسبه شد. افزون بر این، نقشه‌ی هم‌افت تراز آب زیرزمینی نشان‌گر کاهش تراز آب زیرزمینی در نیمه‌ی غربی، و افزایش آن در نیمه‌ی شرقی آبخوان بود، که با عامل‌های انسانی (برداشت آب از چاه‌ها در زمین‌های کشاورزی) مرتبط است. در مجموع به نظر می‌رسد که دقت و کارایی روش‌های درون‌یابی به ویژگی‌های منطقه و داده‌های بررسی‌شده بستگی دارد. در آبخوان دشت مشگین، بیش‌تر بودن تخلیه از تغذیه در افت‌وخیزهای سالانه‌ی تراز آب زیرزمینی مؤثر بوده است. بنابراین، برقرار کردن توازن میان الگوی کشت و آبیاری، و الگوی تغییر زمانی-مکانی تراز آب زیرزمینی در طرح‌های مدیریت آبخوان دشت مشگین ضروری است.

واژگان کلیدی: تغییرپذیری، توزیع مکانی، دشت مشگین، روش‌های درون‌یابی، منابع آب زیرزمینی

مقدمه

در نوار غزه‌ی فلسطین، اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۵) در دشت اردبیل، احمدیان و همکاران (۲۰۱۵) در دشت کبودرآهنگ فامنین، خزاز و همکاران (۲۰۱۵) در هائوز مراکش، دلبری و همکاران (۲۰۱۶) در آبخوان کوهپایه-سگری استان اصفهان، اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۸) در دشت سراب، عبادی و همکاران (۲۰۱۹) در دشت شبستر، اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۹) در دشت بروجن، اسفندیاری و همکاران (۲۰۲۰) در دشت تبریز، آرکوج (۲۰۲۱) در حوضه ارگن ترکیه و اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۲۱) در دشت اردبیل دقت و کارآیی روش‌های گوناگون درون‌یابی را در زمینه‌ی برآورد تراز ایستابی زیرزمینی مقایسه کرده‌اند.

علاوه بر تغییرهای مکانی تراز آب زیرزمینی، تغییرهای زمانی آن نیز بسیار مهم است و بررسی یکی بی دیگری نارسا و ناقص است. در این پژوهش‌ها بیش‌تر به اثرهای دوگانه‌ی تغذیه (بارندگی) و تخلیه (استخراج و بهره‌برداری) اندوخته‌های آب زیرزمینی توجه می‌شود. برای نمونه تحلیل تغییرهای زمانی ژرفای آب زیرزمینی در واحه‌ی مین‌کین چین (سان و همکاران ۲۰۰۹) نشان داد که افت سریع تراز ایستابی در ۲۲ سال به استخراج فزاینده و کاهش نشت از آب‌راه‌های آبیاری مربوط بود. با بررسی تاثیر هم‌بستگی فضایی داده‌های تراز آب زیرزمینی بر انتخاب روش مناسب درون‌یابی (ژی و همکاران ۲۰۱۳) مشخص شد که فعالیت‌های انسانی تأثیر ناچیزی بر ژرفای آب زیرزمینی دارد. تغییرهای مکانی تراز آب زیرزمینی در بنگال غربی در هند بر پایه‌ی ۱۶ مجموعه از داده‌های مشاهده‌ی در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ بررسی شد (چودوری و همکاران ۲۰۱۶). از میان چهار روش زمین‌آماری به کار برده‌شده‌ی کریجینگ خطی، کروی، گوسی و نمایی، دو روش کروی و نمایی بهترین برازش را نشان داد. کاهش معنی‌دار تراز آب زیرزمینی (با میانگین ۰/۲۲۸ و ۰/۲۶۷ متر در سال) در منطقه‌ی آگرای هند (بیسواس و همکاران ۲۰۱۸) به عامل‌های طبیعی (کاهش بارندگی) و انسانی (تمرکزگرایی شدید جمعیتی، بهره‌برداری ناصحیح و فزاینده، و کم‌بود روش‌های مدیریت آب) نسبت داده شد. بررسی روند زمانی تراز آب زیرزمینی در دشت‌های اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و چادگان با آزمون‌های من-کندال نشان داد که روند کاهشی تغییر تراز آب زیرزمینی در سال‌های گذشته به دلیل عامل‌های انسانی (غفاری و همکاران ۲۰۱۸) بوده است. مقامی‌مقیم و تقی‌پور (۲۰۱۹) عامل‌های انسانی مانند افزایش جمعیت، شهرنشینی و ناآگاهی فرهنگی را در بروز تغییر منفی تراز آب زیرزمینی در دشت صفی‌آباد اسفراین مؤثر دانستند. ییلماز و همکاران (۲۰۲۰) تقاضای روزافزون آب برای کشاورزی را دلیل کاهش فزاینده‌ی تراز آب زیرزمینی در شارجه، امارات، دانستند. چراغی و همکاران (۲۰۲۰) نیز بهره‌برداری بی‌رویه و ناصولی از اندوخته‌های آب زیرزمینی را عامل اصلی افزایش

منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین بخش از آب‌های شیرین بهره‌دهنده و دسترس انسان در بسیاری از کشورها است (کاراد و همکاران ۲۰۱۹؛ رهنما و همکاران ۲۰۲۰). این منبع به‌ظاهر پایدار، به‌ویژه در خشکسالی‌ها منشأ حیات است و برای تداوم آن، و سلامتی و مدیریت بوم‌نظام ضروری است. با این حال، امروزه به دلیل رشد بیش از اندازه‌ی جمعیت، توسعه‌ی شهری، و صنعتی شدن، تقاضا برای آب بسیار افزایش یافته، و در این میان، آب زیرزمینی بیش‌ترین تأثیر گرفته است (بیسواس و همکاران ۲۰۱۸). افت کمی و کیفی آب، فرونشست زمین، و شوری از دشواری‌های عمده‌ی اندوخته‌های آب زیرزمینی است که وضعیت حاد و نگران‌کننده‌ی در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک به‌وجود آورده است. بیش‌تر پژوهش‌های در زمینه‌ی روند تغییر زمانی آب زیرزمینی در ایران نشان‌دهنده‌ی کاهش تراز آب زیرزمینی در دشت‌های گوناگون کشور است (دانشور و ثوقی و همکاران ۲۰۱۲؛ زارعیان و همکاران ۲۰۲۱؛ غفاری و همکاران ۲۰۲۱). بی‌آمدهای زبان‌بار اقتصادی و اجتماعی این پدیده با در نظر گرفتن وابستگی جدی بخش‌های کشاورزی به اندوخته‌های ارزشمند آب زیرزمینی ایجاب می‌کند که توجهی بنیادین به پایش و پیش‌بینی دقیق تغییرهای تراز آب زیرزمینی شود. بررسی تغییرهای مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی یکی از گام‌های مؤثر در شناخت توان‌مندی آبی منطقه برای برنامه‌ریزی است (دهقانی و نورعلینی ۲۰۱۶) که خود نشان دهنده‌ی برتری حفاظت و احیای سرزمین است.

اندازه‌گیری کمیت آب‌های زیرزمینی به دلیل نگرش‌های اقتصادی و نیاز به وقت و هزینه‌ی زیاد در پهنه‌ی پیوسته ممکن نیست، و بیش‌تر در چهارچوب داده‌های نقطه‌ی و گسسته‌ی چاه‌های مشاهده‌ی است. در همین حال، برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی محیطی به نقشه‌های سطحی و پیوسته نیاز است (ییلماز و همکاران ۲۰۲۰؛ آرکوج ۲۰۲۱). از این‌رو روش‌های تحلیل فضایی به نام روش‌های درون‌یابی بسط و توسعه یافته‌اند که شبیه‌سازی ریاضی-آماری داده‌های کمی از جمله ژرفا و تراز آب زیرزمینی را در نقشه‌های پهنه‌بندی ممکن کرده‌اند. این روش‌های درون‌یابی جبری و زمین‌آمار بر پایه‌ی رابطه‌های مکانی و ساختار فضایی سنج‌های اندازه‌گیری‌شده است، و برای منطقه‌های گوناگون بسته به شرایط گیتاشناسی و ویژگی‌های داده‌های آن‌ها متفاوت است (اسفندیاری و همکاران ۲۰۱۸؛ کاراد و همکاران ۲۰۱۹). این موضوع منجر به گسترش و توسعه‌ی پژوهش‌هایی در زمینه‌ی ارزیابی تغییرهای مکانی تراز ایستابی زیرزمینی شده است تا از این راه مدل‌های بهینه و مفید درون‌یابی و تعمیم منطقه‌ی انتخاب شود و در دست مدیران و برنامه‌ریزان باشد. سان و همکاران (۲۰۰۹) در واحه‌ی مین‌کین در شمال غرب چین، رحب و همکاران (۲۰۱۱)

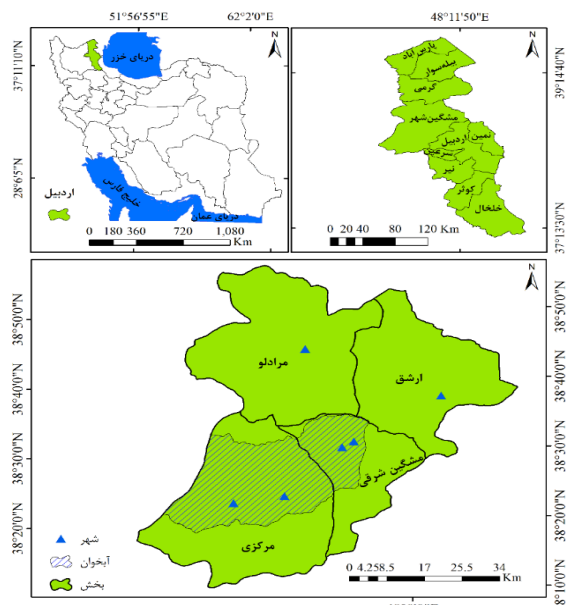
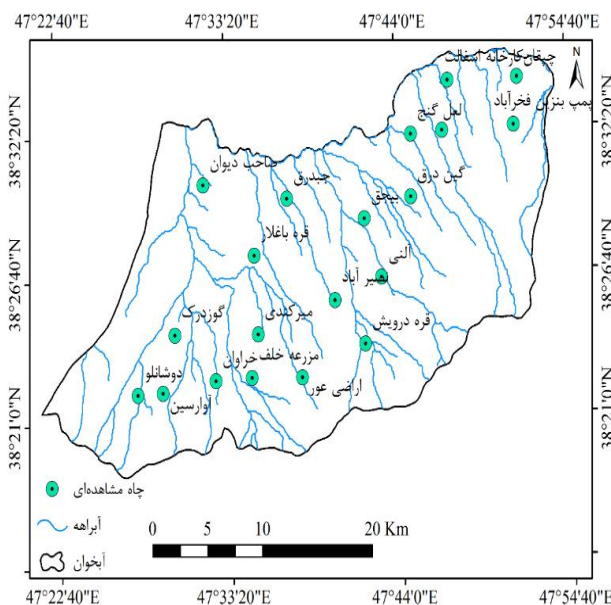
پژوهش برای شناسایی این تغییرها با روش‌های تحلیل آماری- فضایی مناسب است. یافته‌های این پژوهش ممکن است به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان برای مدیریت بهتر اندوخته‌های آب آبخیزها یاری برساند.

مواد و روش‌ها

آبخوان دشت مشگین با مساحت ۱۴۶۰ کیلومتر مربع در نیمه‌ی جنوبی شهرستان مشگین‌شهر، ۳۸٪ از مساحت شهرستان است که از کوه‌پایه‌های سبلان (در جنوب) تا بستر رود قره‌سو (در شمال) گسترش دارد (شکل ۱). بخش بزرگ آبخوان در مرکز شهرستان، و با شیب جنوبی-شمالی در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه سبلان و قوشه‌داغ است. بیشینه‌ی بلندی ۲۱۲۰ m در جنوب آبخوان در کوه‌پایه‌ها و تپه‌های کوهستان سبلان، و کمینه‌ی بلندی ۷۶۰ m در شمال و کرانه‌های رود قره‌سو است. منطقه در اقلیم نیمه‌خشک سرد است (شبانی و همکاران ۲۰۱۹)، اما در جنوب و جنوب غرب (دامنه‌های شمالی کوهستان سبلان) اقلیم نیمه‌مرطوب نیز دیده می‌شود. میانگین بارش سالانه‌ی ایستگاه هم‌دید مشگین‌شهر در ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵، حدود ۳۹۲ mm و میانگین دمای سالانه‌ی آن $11/3^{\circ}C$ است. ویژگی‌های اقلیمی منطقه نقش مؤثری در کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی دارد. به‌دلیل رطوبت بیشتر در جبهه‌ی شمالی سبلان، و ماندگاری بیشتر برف در این جبهه، در جنوب شهرستان مشگین شبکه‌ی آب‌های سطحی گسترده‌تر و اندوخته‌های آب همیشگی‌تر از شمال آن است (احداوغلی ۲۰۲۰).

ژرفای آب زیرزمینی در دشت سروستان استان فارس گزارش کردند. آرکوج (۲۰۲۱) نیز دریافت که افت تراز آب زیرزمینی در حوزه‌ی ارگن ترکیه ناشی از آب‌کشیدن فزاینده در منطقه‌های صنعتی و کشت‌زارها بوده است. به‌تازگی نیز اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تغییر تراز آب زیرزمینی در دشت اردبیل در سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ نشان دادند که بیش‌ترین افت در زمین‌های کشت آبی بوده است.

شهرستان مشگین‌شهر به‌دلیل داشتن رتبه‌ی دوم جمعیت در استان اردبیل، بودن بخش بزرگی از مرتع‌های استان اردبیل در آن، قطب‌بودن در دامداری، باغداری پررونق، اندوخته‌های هنگفت معدنی، گردشگاه‌ها و زیستگاه‌های ارزشمند مانند دره‌ی شیروان و مویبل، و چشمه‌ها و رودهای فراوان جایگاه ویژه‌ی در طرح‌های آمایش و عمران منطقه‌ی دارد (شورای برنامه‌ریزی و توسعه‌ی استان اردبیل ۲۰۱۲). دشت مشگین که در کانون این هدف‌های اقتصادی است، یکی از دشت‌های حاصل‌خیز استان اردبیل است که آبخوان‌های زیرزمینی بسیار خوبی دارد. در این جا مانند دیگر منطقه‌های ایران، بهره‌گیری از چاه‌ها از دیرباز عامل ایجاد سکونت‌گاه‌های انسانی و رونق زندگی بوده است. از آب این چاه‌ها برای مصرف خانگی، دامداری، و کشاورزی بهره گرفته می‌شود. از سوی دیگر، بودن بخش بزرگی از منطقه در اقلیم نیمه‌خشک باعث شده است که سفره‌های آب زیرزمینی به اندازه‌ی زیادی بهره‌برداری شوند (واحدی ۲۰۱۶). همین حساسیت اقلیمی به گواهی کاهش بارندگی‌ها و اثر آن بر افت تراز آب زیرزمینی، ضرورت آگاهی از تغییرهای مکانی-زمانی تراز آب زیرزمینی را ضروری می‌کند. بر همین اساس، این



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ی در محدوده‌ی آبخوان دشت مشگین.

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت مشگین در استان اردبیل و ایران.

روش زمین‌آماری بر پایه‌ی ویژگی‌های آماری مجموعه‌ی مکانی متغیر مانند میانگین و انحراف معیار است. در این روش‌ها افزون بر فاصله، به موقعیت مکانی و هم‌بستگی تغییرهای مکانی نقطه‌های نمونه نیز توجه می‌شود. این روش تغییرهای فضایی متغیر را با مدل‌های گوناگون نیم‌تغییرنا (واریوگرام) برای رسیدن به بهترین تخمین‌گر خطی نارایب از داده‌های وابسته به فضا تحلیل می‌کند. در KRG شبیه به روش IDW وزن‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی کناری برای پیش‌بینی کردن در هر موقعیت به کار برده می‌شود، با این تفاوت که وزن‌ها تنها مبتنی بر فاصله‌ی میان نقطه‌های اندازه‌گیری‌شده و موقعیت دل‌خواه برای پیش‌بینی اختصاص داده نمی‌شود، بل که آرایش مکانی سرتاسری میان نقطه‌های اندازه‌گیری‌شده نیز بر آن‌ها تأثیرگذار است (ترابی‌آزاد و همکاران ۲۰۱۰؛ اسفندیاری و همکاران ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰).

پس از به‌کاربردن روش‌های گوناگون درون‌یابی بر داده‌های ژرفای آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ی، برای رسیدن به مدل بهینه‌ی برآورد تغییرهای فضایی تراز آب زیرزمینی در پهنه‌ی آبخوان مشگین، این روش‌ها با روش اعتبارسنجی متقاطع مقایسه کرده شد (دلبری و همکاران ۲۰۱۶). مدلی که کم‌ترین خطا را در تخمین داشت، بهترین دانسته‌شد. معیارهای اعتبارسنجی متقاطع (ایساک و اسریواستاوا ۱۹۸۹) ریشه‌ی دوم میانگین مربع‌های خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) بود (رابطه‌ی ۱ و ۲). هر چه RMSE کم‌تر باشد، خطای مدل کم‌تر است. MBE نشان‌گر میانگین انحراف اندازه‌ی برآوردشده از اندازه‌ی مشاهده‌شده است، که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. این آماره ممکن است مثبت یا منفی باشد. اگر برآورد بیش‌تر بوده‌باشد مثبت، و برعکس آن منفی است (ایساک و اسریواستاوا ۱۹۸۹؛ ثقفیان و همکاران ۲۰۱۲؛ دی‌پیازا و همکاران ۲۰۱۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N_v} (z(x_i) - \hat{z}(x_i))^2} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} [z(x_i) - \hat{z}(x_i)] \quad (2)$$

$Z(x_i)$ ، اندازه‌ی برآوردشده‌ی متغیر در \hat{X}_i ، اندازه‌ی مشاهده‌شده‌ی متغیر در X_i و n ، تعداد نقطه‌های با متغیر مشاهده‌ی است.

روند مجموعه‌ی زمانی متغیرهای مکانی نیز از راه برقراری رابطه‌های وایازی میان متغیر دل‌خواه (متغیر وابسته) و زمان

این پژوهش بر پایه‌ی تحلیل‌های آماری با داده‌های ژرفای آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ی بود. جامعه‌ی آماری پهنه‌ی آبخوان دشت مشگین، و جامعه‌ی نمونه چاه‌های نمونه در آبخوان بود، که چون پراکنش آن‌ها مناسب و داده‌های آن‌ها کافی و مطمئن بود انتخاب شد. تحلیل‌ها با نرم‌افزارهای Excel و ArcGIS 10.8، IBM SPSS Statistics 24 انجام شد. پس از دریافت کردن داده‌های ژرفای آب زیرزمینی شهرستان مشگین (شرکت آب منطقه‌ی استان اردبیل، مکاتبه‌ی شخصی)، بازبینی اولیه برای حذف کردن داده‌های مشکوک و پرت، از راه رسم کردن نمودار پراکنش داده‌ها در بازه‌ی زمانی انجام شد. پایه‌ی زمانی مشترک با داده‌های موجود، و پراکنش مناسب چاه‌های مشاهده‌ی انتخاب شد. دهه‌ی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ برای تحلیل مکانی-زمانی تراز آب زیرزمینی در محدوده‌ی آبخوان برگزیده شد. برای ۲۰ چاه داده‌ی کافی در دسترس بود (شکل ۲).

برای پهنه‌بندی کردن تراز آب زیرزمینی با داده‌های چاه‌های نمونه از روش‌های گوناگون درون‌یابی جبری (تابع پایه‌ی شعاعی (RBF)، وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW))، و زمین‌آمار (کریجینگ، KRG) بهره‌گیری شد. به‌طور کلی در روش جبری یک یا چند رویه به مجموعه نقطه‌های مشاهده‌ی (Z) در مختصه‌های معلوم برازش داده می‌شود. درون‌یاب‌های جبری ممکن است دقیق یا تقریبی باشد، به‌طوری‌که اگر اندازه‌های مشاهده‌ی در محل‌های نمونه‌گیری دقیق (بی خطا یا بی قطعیت) گرفته شود، بهره‌گیری از روشی دقیق برای درون‌یابی توصیه می‌شود، ولی اگر اندازه‌ی از بی‌قطعیتی برای متغیر در نظر گرفته شود، ممکن است روشی هموار انتخاب شود. از این‌رو، در این دسته می‌توان از تابع‌های ریاضی گوناگونی برای برازش دادن سطح‌های درون‌یابی به نقطه‌های معلوم بهره‌گرفت (اسفندیاری و همکاران ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰). در روش IDW وزن نقطه‌های نمونه روی نقطه‌ی مجهول بر پایه‌ی فاصله‌ی میان نقطه‌های مجهول محاسبه می‌شود. این وزن‌ها را توان وزن‌دهی تنظیم می‌کند، به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر، نقطه‌های دورتر از نقطه‌ی تخمین‌زده را کاهش می‌دهند، و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری میان نقطه‌های همسایه توزیع می‌کنند (ثقفیان و همکاران ۲۰۱۲). روش RBF نیز توانایی ایجاد سطح‌هایی را می‌دهد که هم روندهای عام در آن‌ها در نظر گرفته شده، و هم تغییرهای محلی در آن‌ها به کار برده شده‌باشد. این روش در نمونه‌هایی کمک‌کننده خواهد بود که رویه‌ی برازش‌شده بر حسب اندازه‌های نمونه‌برداری شده سطح را به‌دقت نمایش نمی‌دهد. روش RBF در جستجوی تابعی است که مانند ورقه‌ی فلزی نازکی کار کند، و لازم است که همه‌ی داده‌ها در آن گذاشته شود (اسفندیاری و همکاران ۲۰۱۵؛ اسفندیاری و همکاران ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰).

آغاز ۲۶/۴ m بود و در سال پایان با ۱ m افزایش به ۲۷/۵ متر رسید. اندازه‌های میانه، معرف بهتری از این تفاوت است، و کاهش تراز آب زیرزمینی به اندازه‌ی ۶ m را در یک دهه نشان می‌دهد، که بسیار زیاد است. نمودار تغییرهای زمانی میانگین ژرفای آب زیرزمینی نیز نشان‌گر روند مشخص کاهش تراز آب زیرزمینی آبخوان با نگاه به ضریب تعیین زیاد خط وایازی زمانی است. دامنه‌ی تغییرهای ژرفای آب زیرزمینی در هر دو سال زیاد بود، و نشان‌دهنده‌ی تغییرهای مکانی زیاد تراز آب زیرزمینی در آبخوان منطقه بود. اندازه‌های پراش و انحراف معیار نیز گویای این ناهم‌خوانی است، اما اندازه‌های چولگی داده‌ها فاصله‌ی توزیع متغیر از توزیع بهنجار را نشان می‌دهد. چولگی مثبت توزیع داده‌ها در هر دو سال نشان‌گر فراوان‌تر بودن اندازه‌های کم از اندازه‌های زیاد متغیر است.

(سال‌های گوناگون) (متغیر مستقل)، و ایجاد خط برازش مناسب، که نشان‌گر شیوه‌ی افزایش و کاهش مجموعه‌ی زمانی داده‌ها است، مشخص شد. برای بررسی تغییرهای سالانه‌ی تراز آب زیرزمینی، و کشیدن خط روند از برازش تابع چندجمله‌یی (رابطه‌ی ۳) بهره‌گیری شد (مؤمنی و قیومی ۲۰۱۰).

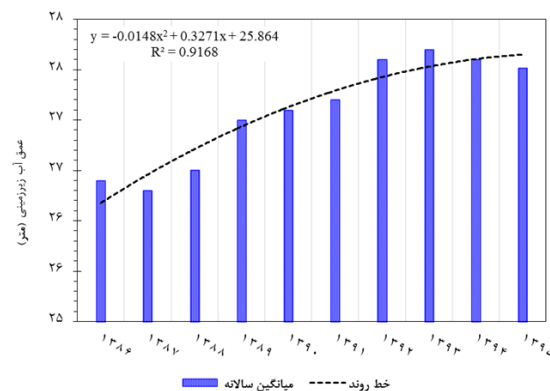
$$Y = a + b_1x + b_2x^2 \quad (3)$$

نتایج

آماره‌های توصیفی ژرفای آب زیرزمینی در کل آبخوان مشگین در دو سال آغاز (۱۳۸۶) و پایان (۱۳۹۵) در جدول ۱ آورده شده است. نمودار تغییرهای میانگین اندازه‌های ژرفای آب زیرزمینی در میان چاه‌های مشاهده‌ی در شکل ۳ به نمایش درآمد. نتایج محاسبه‌ها نشان می‌دهد که میانگین ژرفای آب زیرزمینی در سال

جدول ۱- آماره‌های ژرفای آب زیرزمینی (متر) در چاه‌های نمونه‌ی آبخوان مشگین.

سال	میانگین	میانه	کمینه	بیشینه	پراش	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
۱۳۸۶	۲۶/۴	۱۳/۴	۴/۳	۸۸/۷	۶۱۴	۲۴/۸	۱/۳۳	۰/۷۸
۱۳۹۵	۲۷/۵	۱۹/۵	۴/۴	۸۳/۶	۵۸۳	۲۴/۱	۱/۳۱	۰/۶۸



شکل ۳- نمودار تغییر سالانه‌ی ژرفای آب زیرزمینی در کل آبخوان مشگین (۱۳۸۶-۱۳۹۵).

کم‌تر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده‌ی ناهنجار بودن توزیع داده‌های ژرفای آب زیرزمینی در دو سال آغاز و پایان است.

اندازه‌های پراش و ضریب چولگی نشان داد که توزیع داده‌ها بهنجار نیست، اما برای اطمینان آزمون بهنجاری به روش کلموگروف-اسمیرنوف نیز انجام شد (جدول ۲). تراز معنی‌داری

جدول ۲- نتیجه‌ی آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های ژرفای آب زیرزمینی.

سال	اندازه‌ی آماره	درجه‌ی آزادی	تراز معنی‌داری
۱۳۸۶	۰/۲۴۳	۲۰	۰/۰۰۳
۱۳۹۵	۰/۲۱۳	۲۰	۰/۰۱۸

تغییر مکانی و زمانی تراز ایستابی زیرزمینی در آبخوان...

این روش نشان دهنده‌ی خطای کم‌تر RMSE در سال آغاز (۲۲/۸۵) نسبت به سال پایان (۲۷/۸۸) بود، اما اندازه‌های MBE نشان داد که انحراف یا اریب اندازه‌های پیش‌بینی شده نسبت به اندازه‌های واقعی در سال آغاز بیش‌تر از سال پایان است. به‌علاوه، در هر دو سال آماری مدل پیش‌بینی گرایش به کم‌برآورد کردن متغیر داشت.

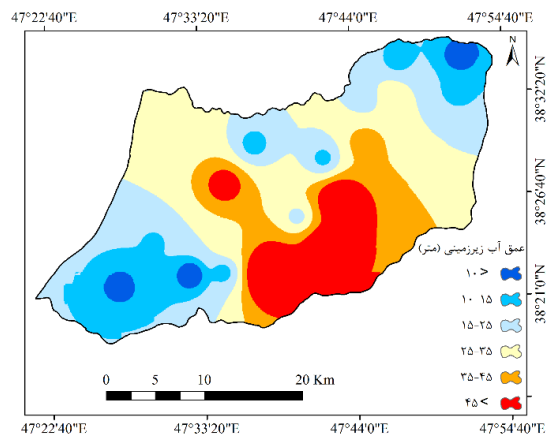
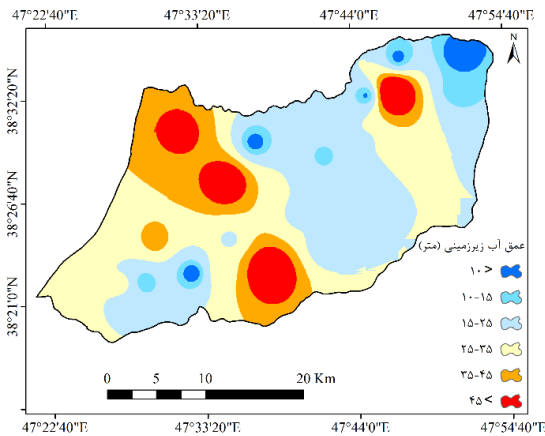
کاربرد روش‌های گوناگون درون‌یابی (جبری و زمین‌آماری) برای پهنه‌بندی کردن تراز آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت مشکین به نتایج متفاوت از هر دو دیدگاه آماره‌های اعتبارسنجی و نقشه‌های خروجی انجامید (جدول ۳). برای پهنه‌بندی ژرفای آب زیرزمینی به‌روش IDW از ۱۰ تا ۱۵ نقطه‌ی همسایگی، که خطای آن‌ها بر پایه‌ی اعتبارسنجی متقاطع کم‌ترین بود و در پوشش بیضی چهارقاچی بودند، بهره‌گیری شد. نتیجه‌های

جدول ۳- مقایسه‌ی نتیجه‌ی اعتبارسنجی متقاطع برای روش‌های گوناگون درون‌یابی.

سال	روش	RMSE	MBE
۱۳۸۶	RBF	۲۱/۹۸	-۰/۸۱
	IDW	۲۲/۸۵	-۰/۷۶
	KRG	۲۲/۵۷	۰/۵۳
۱۳۹۵	RBF	۲۳/۴۵	۰/۱۴
	IDW	۲۷/۸۸	-۰/۱۲
	KRG	۲۶/۲۵	۰/۳۵

در حالی‌که پهنه‌ی هم‌تای آن در شمال شرق آبخوان تغییر چندانی نکرد. در پهنه‌های با تراز پایین آب زیرزمینی، علاوه بر این‌که تا حدودی از مساحت کاسته شد، از جنوب به شمال آبخوان گسترش یافت، و به سمت شرق نیز کشیده شد. بالا آمدن تراز آب زیرزمینی در بخش میانی آبخوان و گسترش پهنه‌های با ژرفای میانگین آب زیرزمینی در این بخش زیاد بود.

نقشه‌های پهنه‌بندی ژرفای آب زیرزمینی بر پایه‌ی روش IDW (شکل ۴) گویای بودن تفاوت محسوس در آرایش مکانی اندازه‌های متغیر در دو سال آماری بود. در بالاترین تراز آب زیرزمینی در بخش‌های شمال شرق، جنوب شرق و موضعی در شمال آبخوان دیده شد، و تراز آب زیرزمینی در بخش میانی آبخوان به‌ویژه جنوب آن پایین بود. در یک دهه، مساحت پهنه‌ی با تراز بالای آب زیرزمینی در جنوب شرق آبخوان کاهش یافت،

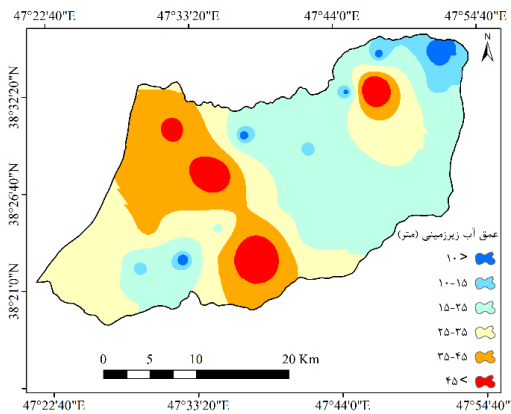


شکل ۴- نقشه‌ی پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشکین به روش IDW در ۱۳۸۶ (راست) و ۱۳۹۵ (چپ).

داشت. در کل، همه‌ی مدل‌های تابع‌های شعاعی در سال آغاز گرایش به کم‌برآورد کردن تراز آب زیرزمینی داشت، اما مقایسه‌ی مدل‌های گوناگون تابع‌های شعاعی در سال پایان نشان‌گر برتری دوباره‌ی مدل درجه‌ی دو به دلیل دقت زیاد و خطای پیش‌بینی کم‌تر (۲۳/۴۵) از دیگر مدل‌ها بود. روش

در کاربرد روش‌های گوناگون RBF برای پهنه‌بندی ژرفای آب زیرزمینی از تعداد کمینه‌ی ۱۰ و بیشینه‌ی ۱۵ نقطه‌ی همسایگی با پوشش بیضی چهارقاچی نقطه‌های همسایگی بهره گرفته شد. در سال آغاز مدل درجه‌ی دو (Multiquadric) با کم‌ترین خطای پیش‌بینی (۲۱/۹۸) بیش‌ترین دقت تخمین

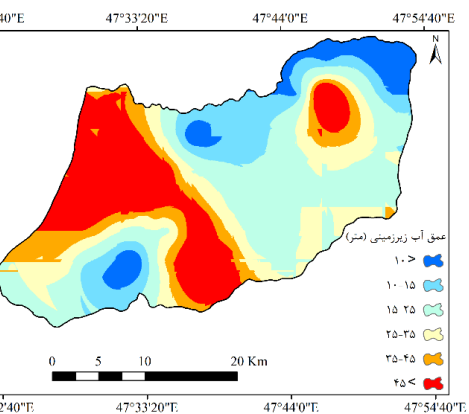
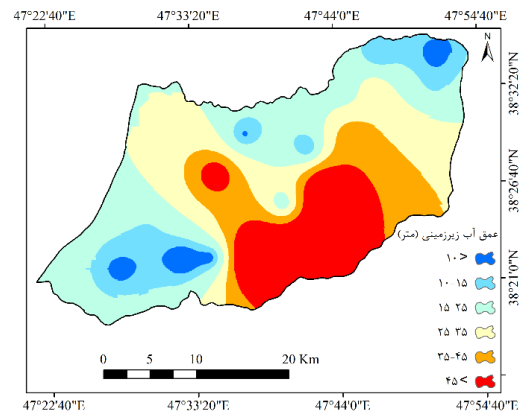
آب زیرزمینی (۱۵ تا ۲۵ متر) است. این پهنه‌ها در نقشه‌های ما در مقایسه با نقشه‌های پیشین مساحت بیش‌تری در نیمه‌ی شرقی آبخوان داشت.



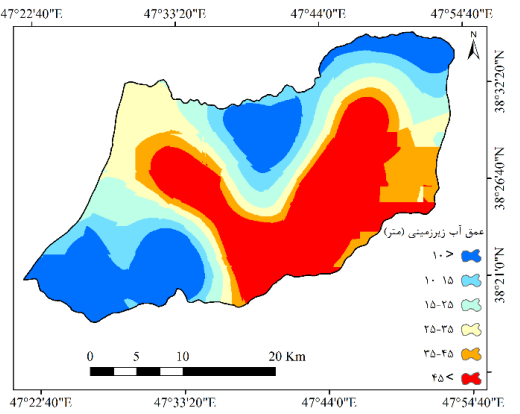
شکل ۵- نقشه‌ی پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشگین به روش RBF در ۱۳۸۶ (راست) و ۱۳۹۵ (چپ).

(۲۰۱۶) مدل‌های بهینه‌شد. احمدیان و همکاران (۲۰۱۵) و دلبری و همکاران (۲۰۱۶) مدل کروی، و اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۲۱) مدل گوسی را با بیش‌ترین دقت تخمین آب‌های زیرزمینی گزارش کردند. از پهنه‌بندی به‌دست‌آمده از کاربرد روش KRG (شکل ۶) بر می‌آید که توان‌مندی بیش‌تر این روش در نمایش‌دادن مشخص و جزئی‌تر تغییرهای تراز آب زیرزمینی است. خط‌های تیز مرز طبقه‌ها که شبیه به خط‌های ارتفاعی شده‌اند، گویای این واقعیت است. تعمیم‌دادن بیش‌تر داده‌های نقطه‌یی در این روش به شکل پهنه‌های متمایز و پیوسته، تفاوت آن را با روش‌های پیشین نشان می‌دهد. از تفاوت‌های دیگر نقشه‌ی خروجی این روش با نقشه‌های دو روش پیشین، بارزتر شدن گسترش پهنه‌های با تراز بالا و پایین در مقایسه با پهنه‌های با تراز میانگین آب زیرزمینی است.

RBF در سال پایان برخلاف سال آغاز بیش‌تر بیش‌برآورد کرد. نقشه‌های پهنه‌بندی ژرفای آب زیرزمینی بر پایه‌ی روش منتخب RBF در شکل ۵ آورده شده است. تفاوت زیاد میان این نقشه‌ها با نقشه‌های روش IDW بیش‌تر در پهنه‌های با ژرفای میانگین



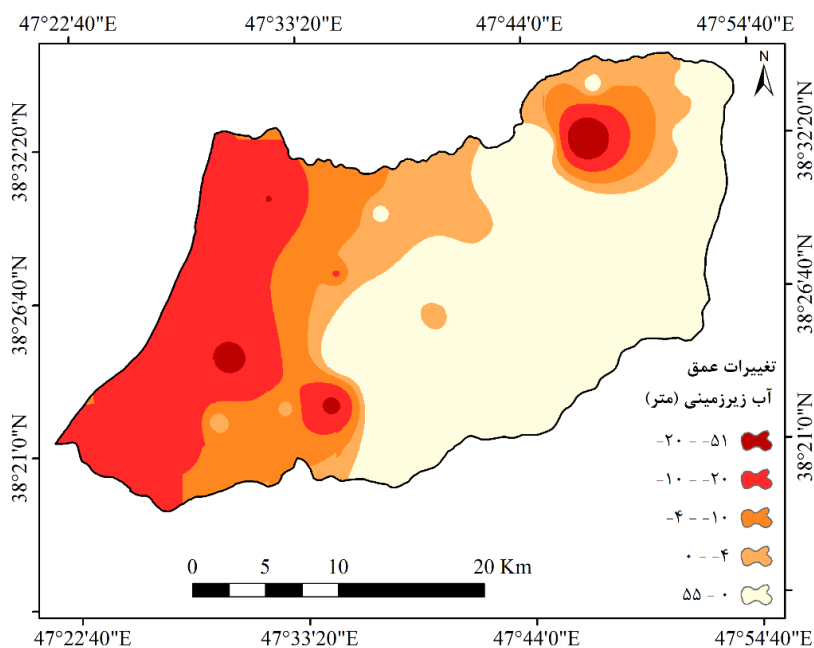
شکل ۶- نقشه‌ی پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشگین به روش KRG در ۱۳۸۶ (راست) و ۱۳۹۵ (چپ).



و افزایش ژرفای آب زیرزمینی است. در برابر، عددهای مثبت نشانگر بالا آمدن تراز آب زیرزمینی است. به دلیل اهمیت افت تراز آب‌های زیرزمینی، طبقه‌بندی مفصل‌تری از این افت در آبخوان انجام شد و پهنه‌های بی‌افت در مرکز، جنوب و شرق آبخوان با رنگ کرمی نمایش داده شد. بررسی نقشه‌ی هم‌افت تراز آب زیرزمینی نشان داد که اگر از پهنه‌ی شمال شرق آبخوان که با کاهش تراز آب زیرزمینی روبه‌رو است چشم‌پوشی شود، سطح آبخوان به دو بخش تقریباً مساوی با راستای شمال شرقی-جنوب غربی جدا می‌شود: بخش شرقی افزایش و بخش غربی افت تراز آب زیرزمینی دارد. بیشینه‌ی افزایش و افت تراز آب زیرزمینی به ترتیب +۵۵ متر و -۵۱ متر بود. میانگین وزنی اندازه‌ی افت تراز آب زیرزمینی ۹ m محاسبه شد. پهنه‌هایی با افت بیش از ۲۰ m محلی است و گسترش آن محدود است. در برابر، پهنه‌های دیگر به سوی شرق آبخوان گسترش بسیار دارد.

از آنجا که هدف روش‌های درون‌یابی تعمیم‌دادن منطقی داده‌های نقطه‌ی گسسته به داده‌های پیوسته‌ی فضایی است، روشی که در آن تابع ریاضی در مدل درون‌یابی بتواند دقیق‌تر رفتار پدیده را پیش‌بینی کند بهترین تعمیم را خواهد داد. مقایسه‌ی دقت و کارایی روش‌های گوناگون درون‌یابی بر پایه‌ی خطای ریشه‌ی میانگین مربع‌ها (RMSE) (جدول ۳) نشان می‌دهد که روش RBF بر دو روش دیگر برتری دارد. بنابراین مدل درجه‌ی دو در روش RBF مدل بهینه برای پیش‌بینی کردن تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین دانسته شد.

برای آشکارساختن و دانستن تغییر زمانی تراز آب زیرزمینی هم‌زمان دو روش تفاضل نقشه‌های درون‌یابی و تحلیل واپازی زمانی به کار برده شد. در این بخش از تفاضل نقشه‌ی درون‌یابی روش منتخب RBF در سال آغاز از همتای خود در سال پایان، نقشه‌ی هم‌افت تراز آب زیرزمینی به دست آمد (شکل ۷). در این نقشه، عددهای منفی نشانگر اندازه‌ی افت تراز آب زیرزمینی



شکل ۷- نقشه‌ی هم‌افت تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین در دوره‌ی ۱۳۹۵-۱۳۸۶.

سوی شمال تا کرانه‌های رود قره‌سو با کنگلومرای درشت‌بافت متشکل از مواد آذرآواری جای‌گزین می‌شود، شرایط مساعدی برای توسعه‌ی خاک‌های حاصل‌خیز فراهم نکرده است، و برای کشت آبی مناسب نیست. نقشه‌ی کاربری و پوشش زمین آبخوان مشگین (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور) این واقعیت را تا حدودی نشان می‌دهد (شکل ۸)، به طوری که غلبه‌ی زمین‌های کشاورزی دیم بر زراعت آبی و باغ در این بخش از آبخوان در نقشه دیده می‌شود. در برابر، در بخش‌های

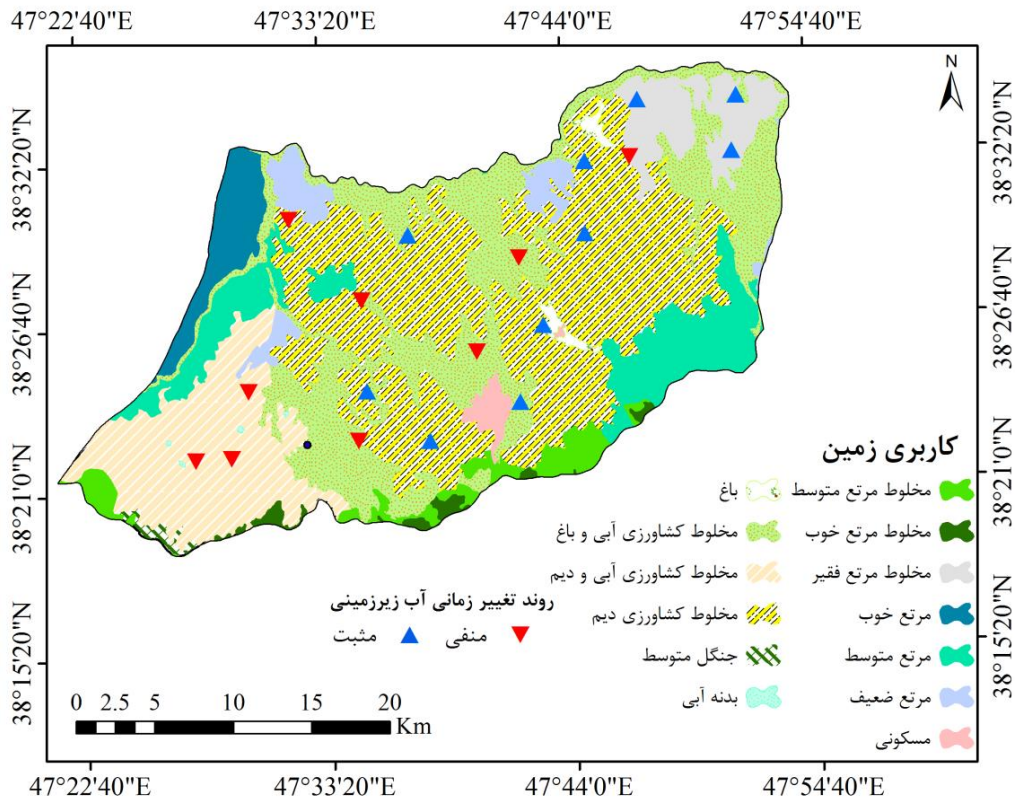
در آرایش فضایی تغییرهای مثبت و منفی تراز آب زیرزمینی در دشت مشگین ممکن است عامل‌های گوناگونی مؤثر باشد. نخست، تأثیر شرایط رطوبتی دامنه‌های شمالی سبلان در جنوب و جنوب شرق آبخوان در روند مثبت تراز آب زیرزمینی تأثیر‌گزار است. نوع سازندها و ضخامت رسوب‌ها که با تشکیل خاک و حاصل‌خیزی کشاورزی آن پیوند می‌خورد، یکی دیگر از عامل‌های مؤثر بر تغییرهای زمانی تراز آب زیرزمینی است. بودن سازندهای سخت آذرین در جنوب آبخوان که به تدریج به

۱۰ سال ۵۱/۲ متر بود که بسیار زیاد است. کاهش زیادی در اندازه‌ی افت تراز آب زیرزمینی در ۱۳۸۷ دیده می‌شود. داده‌های بارندگی نزدیک‌ترین ایستگاه هم‌دید کاهش اندازه‌ی بارندگی در این سال را نشان می‌دهد، اما به دلیل اثرگذاری دیگر عامل‌های محیطی و انسانی نمی‌توان علت آن را به طور کامل به آن نسبت داد، و دانستن آن نیازمند بررسی و پژوهش بیشتر است. نتیجه‌ها نشان داد که اولاً تعداد روندهای کاهش و افزایشی تقریباً برابر بود، و می‌توان در این آبخوان تعادل دید. دوم، ضریب تعیین بیش‌تر معادله‌های وایزای زمانی بیش از ۰/۹ بود، که توان پیش‌بینی زیاد آن‌ها و قطعیت روندها را نشان می‌دهد. هم‌پوشانی لایه‌ی کاربری زمین با لایه‌ی روندهای تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بیش‌تر چاه‌های با روند منفی در زمین‌های باغی و کشاورزی یا مخلوط کشت آبی و دیم است. در برابر، بیش‌تر چاه‌های با روند مثبت در زمین‌های دیم است و تعدادی نیز در پهنه‌های مرتعی است.

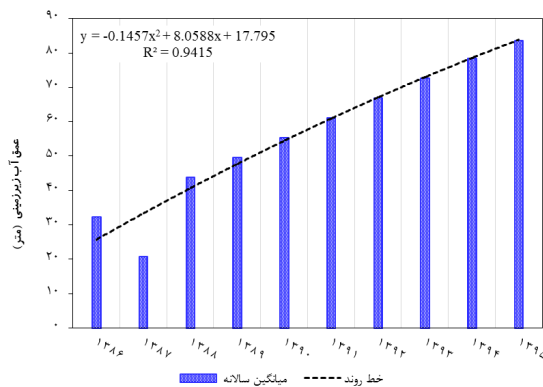
جنوب غربی و به‌ویژه شمال شرقی آبخوان که از رسوب‌های آب‌زفتی قدیمی است، کشاورزی آبی و باغ توسعه یافته است. دلیل رخداد پهنه‌ی متمایز هم‌افت در شمال شرق آبخوان که به زمین‌های پایاب سد سبلان پیوسته اند، متأثر از همین همراهی عامل‌های زمین‌شناسی با کاربری زمین است. نتیجه‌ی تحلیل آماری تغییر سالانه‌ی ژرفای آب زیرزمینی در چاه‌های منتخب در ۱۰ سال در قالب نمودارهای توالی زمانی با روندهای آن بررسی شد. تحلیل وایزای زمانی (جدول ۴) نشان‌دهنده‌ی تراز معنی‌داری کم‌تر از ۵٪ در همه‌ی رابطه‌ها است. روندهای زمانی چاه‌های مشاهده‌ی با کاربری زمین برای آشکارسازی ارتباط تغییرهای مثبت و منفی تراز آب زیرزمینی با نوع کاربری و پوشش زمین هم‌پوشانی داده شد (شکل ۸). شکل ۹ نمونه‌ی از شیوه‌ی برازش‌دادن وایزای چندجمله‌ی به مجموعه‌ی زمانی ژرفای آب زیرزمینی در چاه زمین‌های پایاب سد سبلان را نشان می‌دهد، که نشان‌گر روند کاهش آشکار تراز آب زیرزمینی از آغاز تا پایان دوره‌ی آماری است. این افت در

جدول ۴- نتیجه‌ی تحلیل وایزای زمانی و روند تغییر تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشگین.

نام چاه	روند	ضریب تعیین (R^2)	مدل وایزای زمانی
زمین‌های پایاب سد سبلان	منفی	۰/۹۴	$y = -0.1457x^2 + 8.0588x + 17.795$
زمین‌های لخت	مثبت	۰/۸۵	$y = -0.1413x^2 + 0.65x + 87.428$
آلنی	مثبت	۱/۰۰	$y = -0.0074x^2 - 5.9727x + 76.858$
آوراسین	منفی	۰/۹۱	$y = 0.0074x^2 - 0.0128x + 10.359$
بیجق	منفی	۰/۹۹	$y = -0.0086x^2 + 0.2694x + 11.152$
پمپ‌بنزین فخرآباد	مثبت	۰/۹۹	$y = -0.0043x^2 - 0.183x + 13.015$
جبدرق	مثبت	۰/۹۸	$y = -0.0143x^2 - 0.1484x + 10.235$
چپقان	مثبت	۰/۹۹	$y = -0.0062x^2 - 0.1959x + 6.986$
خراوان	نامشخص	۰/۳۷	$y = 0.0384x^2 - 0.3823x + 4.8313$
دوشانلو	منفی	۰/۹۹	$y = 0.0572x^2 + 1.3596x + 6.4737$
صاحب‌دیوان	منفی	۰/۹۹	$y = 0.0027x^2 + 2.1177x + 29.271$
قره‌باغلار	منفی	۰/۹۴	$y = -0.0455x^2 + 1.9728x + 52.864$
قره‌دوریش	مثبت	۱/۰۰	$y = -0.0247x^2 - 4.8479x + 67.722$
کارخانه‌ی آسفالت	مثبت	۰/۹۹	$y = -0.0083x^2 - 0.204x + 10.956$
گوزدرک	منفی	۰/۹۸	$y = -0.037x^2 + 3.3519x + 10.418$
گن‌درق	مثبت	۱/۰۰	$y = 0.0011x^2 - 1.8326x + 42.745$
لعل گنج	مثبت	۰/۹۸	$y = 0.0606x^2 - 1.9503x + 21.947$
مزرعه‌خلف	منفی	۰/۹۹	$y = -0.0324x^2 + 2.9168x + 7.6533$
میرکندی	مثبت	۱/۰۰	$y = 0.009x^2 - 1.381x + 35.746$
نصیرآباد	منفی	۰/۹۴	$y = 0.0119x^2 - 0.0168x + 21.46$



شکل ۸- پراکنش مکانی روند زمانی تراز آب زیرزمینی در کاربری‌های گوناگون آبخوان دشت مشگین.



شکل ۹- نمودار تغییر سالانه‌ی ژرفای آب زیرزمینی در چاه زمین‌های پایاب سد سبلان (۱۳۸۶-۱۳۹۵).

نسبی دارد. مدل درجه‌ی دوی روش RBF برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در این آبخوان بهینه دانسته شد. یافته‌های این پژوهش با نتایج آرکوح (۲۰۱۲) و اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۵) که کارآیی بهتر روش RBF را از روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) و کریجینگ (KRG) نشان دادند، هم‌خوانی دارد. پژوهش‌های دیگری نیز مانند سان و همکاران (۲۰۰۹)، رحب و همکاران (۲۰۱۱)، خزاز و همکاران (۲۰۱۵)، دلبری و همکاران (۲۰۱۶)، احمدیان و همکاران (۲۰۱۵)، و اصغری

بحث و نتیجه‌گیری

اولویت‌بندی حفاظت و مدیریت بهره‌برداری از اندوخته‌های آب زیرزمینی تنها از راه داشتن شناخت کافی از تغییر مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی امکان‌پذیر است. نتیجه این پژوهش نشان داد که تغییر مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی در پهنه‌ی آبخوان مشگین در خور توجه اساسی است. در تغییرهای مکانی، مقایسه‌ی دقت و کارآیی روش‌های گوناگون درون‌یابی نشان داد که روش تابع‌های شعاعی پایه (RBF) بر روش‌های دیگر برتری

نیز به اندازه‌ی خطایی حدود ۲ رسیدند. در کل، نتیجه‌های به‌دست‌آمده از پهنه‌بندی تغییر زمانی تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بخش شرقی آبخوان با افزایش، و بخش غربی آن با افت تراز آب زیرزمینی در یک دهه (۱۳۹۵-۱۳۸۶) روبه‌رو بود. تغییرهای مثبت و منفی تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشگین به عامل‌های طبیعی و انسانی پیوند دارد. هم‌خوانی میان موقعیت مکانی باغ‌ها و زمین‌های کشت آبی و پهنه‌های هم‌افت تراز آب زیرزمینی در منطقه بهره‌برداری نامناسب و بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. بررسی روند تغییرهای سالانه‌ی تراز آب زیرزمینی بر پایه‌ی وایزای نشان‌گر این است که تعداد روندهای کاهشی (۹ چاه) و افزایشی (۱۰ چاه) تقریباً برابر است، و می‌توان از این دیدگاه تعادلی در آبخوان مشگین دید. گذشته از این، پی‌گیری و هم‌خوانی اثرهای کاربری زمین در روندهای سالانه‌ی تراز آب زیرزمینی گویای این است که بیش‌تر چاه‌های با روند منفی در زمین‌های باغی و کشاورزی یا زمین‌های مخلوط کشت آبی و دیم است. در برابر، بیش‌تر چاه‌های با روند مثبت در زمین‌های دیم است و تعدادی نیز در پهنه‌های مرتعی است. بنابراین معلوم می‌شود که در جاهایی که نیاز به آب باران چندان محسوس نیست و به دیم‌زار داده شده است، یا کشاورزی محدودی می‌شود، سفره‌ی آب زیرزمینی دست کم از دید اندازه‌ی کم تخلیه در وضعیت خوبی است، اما در عرصه‌هایی که به زیر کشت آبی و باغی رفته است، وضعیت سفره‌ی آب زیرزمینی از دید اضافه برداشت، نامناسب و نگران‌کننده است. نوراللهی و همکاران (۲۰۲۰) توسعه‌ی بی‌رویه‌ی زمین‌های کشاورزی را در منطقه نشان داده‌اند، که منجر به نامناسب‌شدن کیفیت آب‌های زیرزمینی شده است. بیش‌تر محصول‌های کشاورزی در دشت آبخوان گندم، جو و یونجه و محصول‌های باغی نیز سیب، شلیل و هلو گزارش شده است (قابل‌نظام ۲۰۲۱). نیاز آبی این محصول‌های کشاورزی از 1060 تا $4023 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ، و نیاز آبی محصول‌های باغی از 7455 تا $8304 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ است، که نشان‌دهنده‌ی مصرف زیاد آب است (صالح‌نیا و باستانی ۲۰۱۷). ارتباط زمین‌های کشاورزی و بهره‌برداری فزاینده از اندوخته‌های آب با کاهش تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت مشگین با یافته‌های بسیاری از محققان در جاهای گوناگون جهان (سان و همکاران ۲۰۰۹، بیسواس و همکاران ۲۰۱۸، غفاری و همکاران ۲۰۱۸، مقامی‌مقیم و تقی‌پور ۲۰۱۹، چراغی و همکاران ۲۰۲۰، ییلماز و همکاران ۲۰۲۰، آرکوج ۲۰۲۱، اصغری سراسکانرود و همکاران ۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. با درنظر گرفتن اهمیت این موضوع، بر لزوم برقرارکردن توازن میان الگوی کشت و آبیاری کشاورزی و الگوی تغییر زمانی-مکانی در آبخوان دشت مشگین تأکید می‌شود، تا از این راه بتوان به تأمین‌شدن آب پایدار در این آبخوان امیدوار

سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۰) کارآیی بهتر روش KRG را در برابر دیگر روش‌های درون‌یابی در برآورد کردن تراز آب زیرزمینی نشان دادند. دلایل پرشماری برای این یافته هست. ویژگی‌های منطقه (پستی‌بلندی، زمین‌شناسی و خاک) بر دقت روش‌های درون‌یابی، و در نتیجه انتخاب روش بهینه‌ی درون‌یابی تأثیرگذار است، و نمی‌توان یک روش را بر دیگر روش‌ها در همه‌ی منطقه‌های گوناگون جغرافیایی برتر دانست (رحب و همکاران ۲۰۱۱، دلبری و همکاران ۲۰۱۶). توجه به این نکته ضروری است که پراکنش و آرایش فضایی نقطه‌ها تأثیر زیادی بر دقت و کارآیی روش زمین‌آمار دارد (دلبری و همکاران ۲۰۱۶، عبادی و همکاران ۲۰۱۹). کم بودن تعداد نقطه‌های اندازه‌گیری نمونه و فاصله‌ی زیاد آن‌ها (که در چاه‌های مشاهده‌ی آبخوان دشت مشگین همین گونه بود) از ارتباط فضایی داده‌ها می‌کاهد، و خودهمبستگی مکانی را تضعیف می‌کند. این عامل ممکن است تأثیر زیادی بر نتیجه‌ی روش KRG داشته باشد. ژی و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند که اگر همبستگی‌های فضایی زیاد باشد روش KRG ممکن است روشی مطمئن در درون‌یابی برای برآوردکردن ژرفای آب زیرزمینی باشد. افزون بر این، روش RBF این برتری را به روش‌های دیگر دارد که بر داده‌های پراش‌داری به‌کار برده می‌شود که نامنظمانه در منطقه پراکنده‌اند، و درون‌یابی چندمتغیری همواری بر داده‌ها انجام می‌دهد. از سوی دیگر، این روش می‌تواند سطح‌هایی با درستی کافی، حتی از نقطه‌های نمونه‌ی اندک و با حفظ عوارض کوچک، تولید کند (سلها ۲۰۱۰).

تأثیر ویژگی‌های داده‌های نمونه و منطقه بر نتیجه‌ی روش‌های درون‌یابی را می‌توان با مقایسه‌ی اندازه‌ی دقت درون‌یابی‌ها (اعتبارسنجی متقاطع) سنجید. اندازه‌ی خطای روش RBF برای دو سال ۲۱/۹۸ تا ۲۳/۴۵ به‌دست‌آمد. اندازه‌ی خطای به‌دست‌آمده از کاربرد همین مدل در پژوهش اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۵) کم‌تر (۸/۲۱) بود. اندازه‌ی خطای این مدل در پژوهش احمدیان و همکاران (۲۰۱۵) برای چهار سال ۱۳/۳۸ تا ۳۱/۲۶ متغیر بود. آرکوج (۲۰۲۱) کم‌ترین اندازه‌ی خطای روش RBF را ۶/۰۴ و ۶/۵۵ به‌ترتیب برای ماه‌های زمستان و تابستان به‌دست آورد. همین اختلاف‌ها در اندازه‌ی خطای روش KRG نیز دیده می‌شود. اندازه‌ی خطای به‌دست‌آمده از کاربرد این روش برای دو سال آغاز و پایان به‌ترتیب ۲۲/۵۷ و ۲۶/۲۵ بود، که بیش‌تر از خطای به‌دست‌آمده در پژوهش‌های پیشین است. سان و همکاران (۲۰۰۹) کم‌ترین دامنه‌ی خطا (۱/۸۶ تا ۴/۲۳) را به‌دست آوردند. خزاز و همکاران (۲۰۱۵) اندازه‌ی خطا را ۱۴/۶۸ به‌دست آوردند. اندازه‌ی خطای برآورد این روش در پژوهش آرکوج (۲۰۲۱) برای ماه‌های زمستان و تابستان به‌ترتیب ۸/۷۵ و ۹/۵۳ بود. عبادی و همکاران (۲۰۱۹)

با جامعیت بیش‌تری به کار مهم بررسی تغییر مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی پرداخت. دسترسی به پایگاه اطلاعاتی جامع نقشه‌های کاربری دقیق نیز یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش بود. با پیشرفته‌شدن سامانه‌های نرم‌افزاری مبتنی بر داده‌کاوی مکانی، سازمان‌های متولی می‌توانند با برعهده گرفتن مسئولیت تهیه و فراهم آوردن نقشه‌های مرجع برای یکسان‌سازی نتایج محققان، گام مؤثری بردارند.

شد. از طرفی توسعه‌ی شهری و صنعتی بیش‌تر در بخش غربی شهرستان مشگین‌ایجاب می‌کند که در طرح‌های عمرانی به حفظ تعادل اندوخته‌های آب زیرزمینی و صرفه‌جویی در مصرف آب توجه بیش‌تری شود. به‌دلیل محدودیت داده، به‌ویژه داده‌های دقیق چاه‌ها که انجام پژوهش کامل و جامع را دشوار می‌کند، پیشنهاد می‌شود که برخی از بخش‌های حساس دشت به سامانه‌های اندازه‌گیری و پایش خودکار تجهیز شوند، تا بتوان

فهرست منابع

- Ahadoghli M. 2020. Investigating the tourism potential of Mesghinshahr district using pralong method. M.Sc. Thesis in Geomorphology. Faculty of Social Sciences. University of Mohaghegh Ardabili, 111 p. (In Persian).
- Ahmadian M, Chavoshian MS, Darvish M. 2015. Determination of groundwater level fluctuations as an indicator of semi-arid land resources degradation using geostatistical methods (Case study: Kaboudrahang-Famenin Plain). Iranian Journal of Range and Desert Research, 22(1): 109–120. (In Persian).
- Arkoc O. 2021. 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, pp. 1–10.
- Asghari Sarasekanrood S, Ghale E, Ebadi E. 2021. Investigation of land use changes and its relationship with groundwater level (Case study: Ardabil Plain). Journal of Remote Sensing and GIS for Natural Resources, 12(1): 86–106. (In Persian).
- Biswas B, Jain S, Rawat S. 2018. Spatio-temporal analysis of groundwater levels and projection of future trend of Agra City, Uttar Pradesh, India. Arabian Journal of Geosciences, 11(11): 1–18.
- Carrard N, Foster T, Willetts J. 2019. Groundwater as a source of drinking water in Southeast Asia and the Pacific: A multi-country review of current reliance and resource concerns. Water, 11(8): 20 p.
- Cheraghi S, Najafi B, Shajari S, Javan M. 2020. The trend of changes in groundwater quantity and quality in the Sarvestan plain of Fars province. Watershed Management Researches (Pajouhesh-Va-Sazandegi), 33(2): 82–96. (In Persian).
- Chowdhury A. 2016. Assessment of spatial groundwater level variations using geostatistics and GIS in Haringhata Block, Nadia District, West Bengal. International Journal of Research in Engineering and Technology, 5(5): 276–280.
- Daneshvar Vousoughi F, Dinpashoh Y, Aalami M. 2012. Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil plain). Water and Soil Science (Agricultural Science), 21(4): 165–179. (In Persian).
- Dehghani R, Noorali A. 2016. Comparison of geo-statistical methods and artificial neural network in estimating groundwater level (Case study: Nourabad plain, Lorestan). Journal of Environmental Science and Technology, 18(1): 31–43. (In Persian).
- Delbari M, Boostanian M, Afrasiab P. 2016. Spatio-temporal variability analysis and mapping of groundwater level in Kuhpayeh-Sagzi aquifer (Esfahan Province) using geostatistical methods. Geographic Space, 15(52): 305–324. (In Persian).

- Development and planning assembly of Ardabil Province. 2012. Logistic plan studies of Ardabil Province. Management and Planning Organization. Ardebil, 63 p. (In Persian).
- Di Piazza F, Lo Conti LV, Noto F, Viola G. 2011. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3): 396–408.
- Ebadi Y, Javdan J, Rezaei Moghaddam M. 2019. Estimating accuracy of artificial neural networks (ANN) and geo statistical methods in interpolating groundwater levels (Case study: Shabestar-Sufian Plain. *Geographical Data*, 28(110): 133–145. (In Persian).
- Esfandiari F, Alijahan M, Rahimi M. 2015. Assessment of algebraic and geo-statistical models for estimation of groundwater table in Ardabil plain. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(2): 44–62. (In Persian).
- Esfandiari F, Gharachorlu M, Ebay E. 2018 Assessment and estimation the spatial variation of groundwater level by various interpolation methods in Sarab plain. *Geography and Development Iranian Journal*, 16(51): 65–80. (In Persian).
- Esfandiari F, Ghorbani Filabadi R, Nasiri Khiavi A, Mostafazadeh R. 2019. Assessing the accuracy of algebraic and geostatistical techniques to determine the spatial variations of groundwater quality in Boroojen Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20): 115–130. (In Persian).
- Esfandyari F, Mostafazadeh R, Ebadi E, Saadati R. 2020. Modelling the spatial distribution and depletion of groundwater level in Tabriz Plain. *Geographical Engineering of Territory*, 3(6): 1–16. (In Persian).
- Ghabelnezam E. 2021. Modelling and assessing the ecosystem services of Khiav Chay Watershed with an emphasis on erosion and runoff yield. M.Sc. Thesis, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, 124 p. (In Persian).
- Ghafari S, Moradi H, Modares R. 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. (In Persian).
- Ghaffari M, Chavoshbashi AA, Eslami A, Hatami MH, Pourakbar M, Hashemi M. 2021. Spatial and temporal variation of groundwater quality around a volcanic mountain in northwest of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 14: p.100627.
- Isaaks EH, Srivastava RM. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York. 561 p
- Jie C, Hanting Z, Hui Q, Jianhua W, Xuedi Z. 2013. Selecting proper method for groundwater interpolation based on spatial correlation. *Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*, Fourth International Conference on Qingdao, pp. 1192–1195.
- Khazaz L, Oulidi HJ, El Moutaki S, Ghafiri A. 2015. Comparing and evaluating probabilistic and deterministic spatial interpolation methods for groundwater level of Haouz in Morocco. *Geographic Information System*, 7(6): 631–642.
- Momeni M, Ghayoumi AF. 2010. Statistical Analysis with SPSS. Moalef, Tehran, 344 p. (In Persian).
- Maghami Moghim G, Taghipour A. 2019. Investigating the effective factors on changing groundwater levels of Safi Abad Plain of Esfarayneh. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 8(22): 27–42. (In Persian).
- Norollahi S, Asghari Moghaddam A, Elham F, Barzegar R. 2020. Assessing the effective factors on groundwater quality of Meshgin-

- Shahr plain aquifer (Ardebil province) with emphasis on possible origin of some heavy metals. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(114): 143–152.
- Rahab FKJ, Ghabayen SM, Salha AA. 2011. Effect of GIS techniques on the accuracy of the spatial representation of groundwater monitoring data in Gaza Strip. *Environmental Science and Technology*, 4(6): 579–589.
- Rahnama MB, Sohrabi N, Barani GhA. 2020. Investigation of groundwater level variations in Shahdad aquifer using groundwater modeling system (GMS) software. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(14): 1650–1663. (In Persian).
- Saghafian B, Daneshkar arasteh P, Rahimi Bandarabadi S, Fattahi E, Mohammadzadeh M. 2012. Guideline of spatial distribution of climatological factors using point data. Office of Deputy for Strategic Supervision, Ministry of Energy, Bulletin No. 585, 134 p. (In Persian).
- Salehnia N, Bastani M. 2017. Considering virtual water trade strategy of crops and horticultural products in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(5): 750–762. (In Persian).
- Salha AA. 2010. Assessment of spatial representation of groundwater monitoring and meteorological data in Gaza Strip. M.Sc. Thesis- Water Resources Engineering, Islamic University of Gaza, Palestine, 197 p.
- Shabani M, Hadi Ghanbari M, Atania H, Behyari A. 2019. Study the cold and mountainous climate (Case study Meshghinshahr District). *Current Researches in Sciences and Researches*, 1(6): 1–9. (In Persian).
- Sun YA, Shaozhongkang A, 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 Modeling & Software*, 24(10): 1163–1170.
- Torabi Azad M, Siaharaei S, Eftekhari R. 2010. Comprehensive training of Geo-statistic analysis in GIS. Geographic Organization of Armed Forces. Tehran, 488 p. (In Persian).
- Vahedi F. 2016. Prediction of groundwater level using artificial intelligence methods (Case study: Meshghinshahr Aquifer). Ms.c. Thesis. Faculty of Natural Sciences. Tabriz University, 161 p. (In Persian).
- Yilmaz AG, Shanableh A, Al-Ruzouq RI, Kayemah N. 2020. Spatio-temporal trend analysis of groundwater levels in Sharjah, UAE. *International Journal of Environmental Science and Development*, 11(1):9–14.
- Zareian MJ, Eslamian S. 2021. Groundwater withdrawal adjustment based on changes in groundwater balance components (a case study: an arid region in central Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(18):1–13.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.2, Ser. No: 135, Summer 2022, pp. 45 -59

DOI: 10.22092/WMRJ.2021.356299.1437

Research Paper



Spatio-Temporal Variations of Groundwater Level in Meshgin Plain Aquifer, Ardabil Province

Zeinab Hazbavi

(Corresponding Author)* Assistant Professor, Department of Watershed Management, Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Mortaza Gharachorlu

Ph.D., Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding Author Email: z.hazbavi@uma.ac.ir

Received: 14 October 2021

Accepted: 19 November 2021

Abstract

This study was conducted with the aim of understanding the temporal and spatial variations of groundwater levels in the Meshgin Plain Aquifer, located in Ardabil Province, with the application of spatial statistics and temporal regression and using groundwater depth data on an annual scale from 2007 to 2016. In order to achieve the optimal method of zoning spatial changes in groundwater level, a comparison of different interpolation methods including Radial Basis Functions (RBFs), Inverse Distance Weighted (IDW), and Kriging (KRG) based on cross-validation was used. In addition, regression relationships between groundwater level and the study years were fitted to determine how the data series ascended or descended. A comparison of interpolation methods based on cross-validation showed that the root mean square error (RMSE) of RBF, IDW, and KRG methods were 21.98, 22.85, 22.57 in 2007; and 23.45, 27.88, 26.25 in 2016, respectively. Therefore, the RBF method with the lowest estimation error due to the power applied to scattered data and low sampling points in both years was selected as the optimal method for estimation of groundwater level in the aquifer. The weighted average of groundwater table loss was calculated as equal to nine meters. Furthermore, the iso-decline map of groundwater level was indicative of a decrease in groundwater level in the western half and its increase in the eastern half of the aquifer which is related to anthropogenic factors (withdrawal of groundwater in agricultural lands). In general, it can be stated that the accuracy and efficiency of interpolation methods depend on the region and data characteristics. In the case of Meshgin Plain Aquifer, the discharge factor has been more effective than the recharge factor in annual fluctuations of groundwater level. Accordingly, it is necessary to establish a balance between the pattern of cultivation and irrigation and the pattern of spatio-temporal variations of groundwater level in managerial plans for Meshgin Plain Aquifer.

Keywords: Groundwater resources, interpolation methods, Meshgin Plain, regression, spatial distribution, variability