

ارزیابی مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با استفاده از GIS و خوشه‌بندی

سلسله مراتبی

چکیده

رشد جمعیت و محدودیت منابع آب شیرین، اهمیت ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک دوچندان کرده است. دشت بهار، در شمال غرب استان همدان و با اقلیم نیمه‌خشک سرد، منبع مهم تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه است. هدف این پژوهش، ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت همدان-بهار برای مصرف شرب است. در جهت ارزیابی کیفی، بررسی تغییرات مکانی و زمانی چهار شاخص pH، نیترات، بی‌کربنات (HCO_3^-) و هدایت الکتریکی (EC) طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳ انجام شده است. داده‌ها از ۲۰ حلقه چاه برداشت و با روش درونیابی معکوس فاصله وزنی (IDW) بر اساس قدرت همسایگی در محیط GIS پهنه‌بندی گردید. نتایج نشان داد که pH در محدوده ۶/۷ تا ۷/۹ تغییر کرده و در تمام سال‌ها در بازه مطلوب (۶/۵ تا ۸/۵) باقی‌مانده است. نیترات در برخی نقاط به بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده و روند افزایشی تدریجی در طی سال‌ها داشته است. EC در بخش‌هایی از دشت از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر فراتر رفته و بیانگر شروع شرایط شور است. مقادیر بی‌کربنات در هیچ نقطه‌ای از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز نکرده است و در حالت مطلوب قرار دارد. برای شناسایی الگوهای کیفی، از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی استفاده شد. چاه‌ها بر اساس همه شاخص‌ها به چهار خوشه اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند، خوشه‌بندی بر اساس فاصله اقلیدسی میان داده‌های نرمال شده و با استفاده از روش ward انجام شد. این یافته‌ها بر لزوم مدیریت متمرکز بر مناطق شرقی و جنوبی دشت و پایش مستمر تغییرات کیفی تأکید دارد.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، پهنه‌بندی، خوشه‌بندی، سلسله‌مراتبی، نیترات.

مقدمه

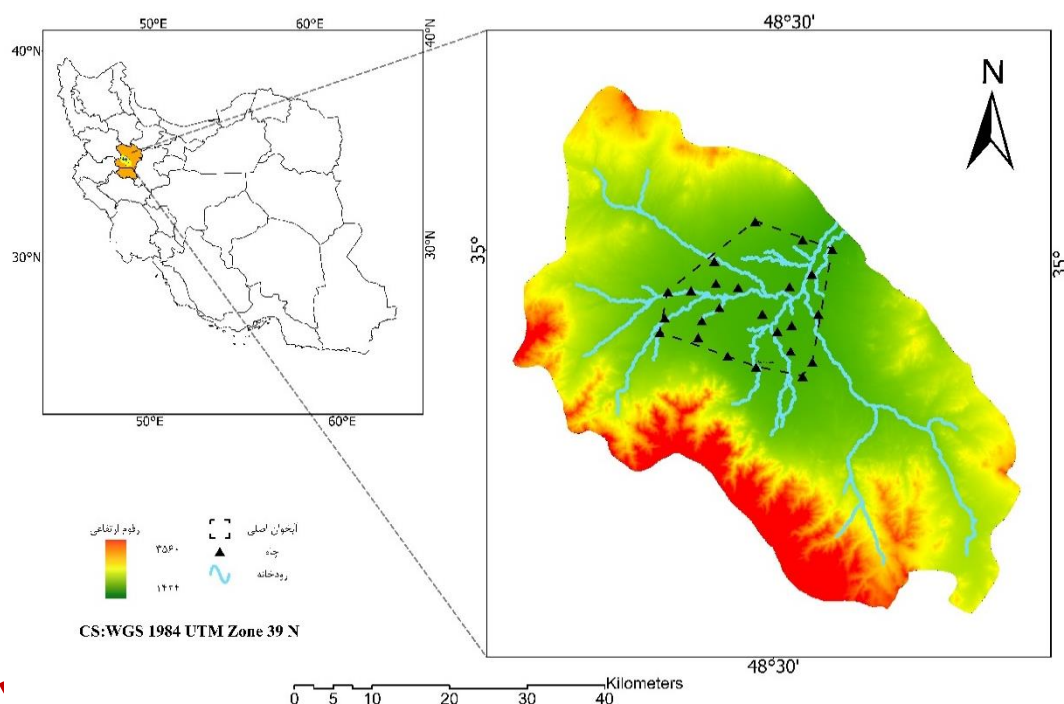
آب‌های زیرزمینی از منابع ارزشمند تهیه آب شرب، کشاورزی و صنعت در اکثر مناطق ایران هستند. تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی می‌تواند در اثر فعالیت‌های انسان و توسعه فعالیت‌های صنعتی صورت گیرد. بررسی و مطالعه این منابع به منظور حفظ و اصلاح کیفیت آن‌ها ضروری است (پورمقدس، ۱۳۸۱). با این حال، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعت و شهرنشینی می‌تواند کیفیت این منابع را تحت تأثیر قرار دهد. برداشت بیش‌ازحد آب، تخلیه فاضلاب صنعتی و شهری و نفوذ آب‌های سطحی آلوده به سفره‌های زیرزمینی از مهم‌ترین عوامل تشدید آلودگی کیفیت آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، رشد جمعیت و گسترش استفاده از کودها و سموم شیمیایی در کشاورزی نیز منجر به افزایش ترکیبات آلاینده‌ای همچون نیترات در آب‌های زیرزمینی شده است (Karim et al., 2024). با توجه به بروز خشکسالی‌های مکرر و تشدید تنش آبی در منطقه، که در سال‌های اخیر حتی منجر به وقوع بحران قطعی آب در شهر همدان گردید، اهمیت تأمین پایدار و تضمین کیفیت منابع آب شرب بیش‌ازپیش آشکار شده است. در این شرایط، بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی در دشت همدان-بهار نه تنها از منظر علمی بلکه از دیدگاه مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع آب نیز ضرورت دارد. این پژوهش با طرح این پرسش که کیفیت آب زیرزمینی منطقه طی سال‌های اخیر چه تغییراتی داشته و کدام نواحی بیشترین تهدید کیفی را تجربه می‌کنند، به پر کردن خلأ موجود در پایش بلندمدت کیفیت منابع آب شرب و کشاورزی منطقه کمک می‌کند. پارامترهای کیفی آب زیرزمینی مثل pH، نیترات (NO_3^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-) و هدایت الکتریکی (EC) برای ارزیابی وضعیت کیفیت آب اهمیت زیادی دارند. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزاری توانمند برای تحلیل داده‌های مکانی امکان شناسایی پراکندگی آلودگی‌ها و نواحی بحرانی را فراهم می‌کند و کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی کیفیت منابع آبی دارد. با استفاده از تکنیک‌های درونیابی مکانی نظیر

وزن دهی معکوس فاصله (IDW) که با وزن دهی بر اساس فاصله، دقت بالایی در برآورد مقادیر کیفی و پیوسته سازی پهنه‌بندی ارائه می‌کند، می‌توان الگوهای پراکندگی پارامترهای کیفی آب را در سطح منطقه شناسایی و نقشه‌برداری کرد. به‌کارگیری این روش‌ها امکان ارزیابی و پایش مستمر منابع آب را فراهم می‌کند. روش‌های آماری مانند تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در دهه‌های اخیر به‌عنوان روش‌هایی برای تفسیر الگوهای مکانی و زمانی کیفیت آب مطرح شده‌اند. مطالعات متعددی در سطح جهان برای پایش کیفیت آب از رویکردهای HCA و PCA و شاخص‌های کیفیت آب (WQI) استفاده کرده‌اند (Cloutier et al., 2008). در این پژوهش، تمرکز اصلی بر تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای گروه‌بندی و تفسیر تغییرات کیفی آب زیرزمینی است. Ghobadi et al., 2020 باهدف ارزیابی آب زیرزمینی دشت همدان-بهار تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی را برای ۲۳ متغیر انجام دادند. طبق تحلیل ایشان چاه‌ها به چهار دسته آلودگی کم، متوسط، نسبتاً آلوده و آلوده طبقه‌بندی شدند و یافتند که ۴۵ درصد چاه‌ها (۹ چاه) در فصل بهار در وضعیت آلوده قرار دارند. شایگان و مکرم (۱۴۰۰) با به‌کارگیری تلفیق روش‌های GIS منطق فازی و ANP، کیفیت منابع آب شیراز را تحلیل نمودند. Ababakr et al. 2020 با پهنه‌بندی دشت اربیل عراق و درون‌یابی به روش IDW به این نتیجه رسیدند که کیفیت آب طی سال‌های منتهی به تحقیق، روند رو به بهبودی داشته است. Karim et al. 2024 نیز با استفاده از آزمون‌های روندگرایی و نقشه‌برداری GIS، تغییرات مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی را در منطقه داکا بررسی کردند. اقبالیان و بهمنی (۱۳۹۹) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در GIS به بررسی پارامترهای کیفی آب دشت همدان-بهار پرداختند و نشان دادند که درون‌یابی IDW برای پارامتر هدایت الکتریکی (EC) و pH بهترین دقت را داشته است. زارع‌ابیان (۱۳۹۲) نیز با مدل‌سازی کریجینگ، روش معکوس فاصله وزنی و روش شبکه توابع پایه شعاعی تغییرات مکانی EC، SAR، TDS و pH در دشت همدان-بهار را پهنه‌بندی کرد و کاهش تدریجی EC و TDS از جنوب شرق به شمال غرب را نشان داد. علیایی و همکاران (۱۳۹۶) با مطالعه رون کیفیت دشت همدان-بهار یافتند که روند تغییرات نامطلوب بوده و در حدود ۲۷ درصد از نمونه‌ها دارای میانگین غلظت نیترات ۴۳ میلی‌گرم بر لیتر در مرز هشدار قرار دارند. فاضل توسل و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی تغییرات هیدروژئوشیمیایی دشت یافتند که از لحاظ هدایت الکتریکی بخش مرکزی دشت بهترین کیفیت را دارد و کمترین مقدار (HCO_3^-) در بخش مرکزی دشت اتفاق می‌افتد. استواری و همکاران (۱۳۹۵) نیز کیفیت آب دشت لردگان را با تهیه نقشه‌های کیفی به روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) در GIS ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که کیفیت آب شرب از جنوب غرب به شمال دشت لردگان کاهش می‌یابد. همچنین، اروچی و همکاران (۱۳۹۰) پراکندگی پارامترهای ژئوشیمیایی آب دشت همدان-بهار را با GIS بررسی کردند و اثر نفوذ فاضلاب شهری و صنعتی بر افزایش شوری (EC) این آب‌ها را مستندسازی نمودند. Bahrami et al. 2020 هم نقشه‌های مکانی غلظت نیترات را در دشت فسا تهیه و نشان دادند که تمرکز بالای نیترات (بیش از حد مجاز) در نواحی کشاورزی پس از فصل آبیاری اتفاق می‌افتد. Kurunc et al. 2016 با بررسی برخی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی در مناطق ساحلی مدیترانه در ترکیه دریافتند که در مناطقی که فعالیت‌های کشاورزی صورت می‌گیرد غلظت نیترات و مقدار هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. در این پژوهش تحلیل هم‌زمان روندهای مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی طی یک دوره‌ی پنج‌ساله با تمرکز بر چهار پارامتر کلیدی (pH، نیترات، بی‌کربنات، و هدایت الکتریکی) در دشت همدان-بهار نهفته انجام شده است. استفاده‌ی ترکیبی از تکنیک درون‌یابی مکانی (IDW) در محیط GIS و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (دندروگرام) در این مطالعه، امکان شناسایی مناطق باکیفیت بحرانی و طبقه‌بندی چاه‌ها بر اساس ویژگی‌های هیدرو شیمیایی را فراهم ساخته است. این رویکرد، در مقایسه با مطالعات مقطعی پیشین، با ارائه‌ی دیدی تلفیقی از روندهای زمانی و توزیع فضایی آلودگی، چارچوبی جامع برای پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند.

مواد و روش

مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت همدان-بهار موسوم به سیمینه رود با وسعت ۲۴۵۹ کیلومترمربع بین طول شرقی $17^{\circ}48''$ تا $48^{\circ}33''$ و عرض شمالی $39^{\circ}34''$ تا $35^{\circ}02''$ در دامنه شمالی ارتفاعات الوند قرار دارد. وسعت دشت ۸۸۰ کیلومترمربع و گستره آبخوان اصلی ۶۴۸ کیلومترمربع است (شکل ۱). این حوضه از طریق یک معبر باریک در ناحیه شمالی، با دشت‌های کبودرآهنگ و فامنین دارای ارتباط هیدروژئولوژیکی است. تأمین منابع آب در منطقه به شدت به بارش‌های فصلی و رواناب‌های حاصل از ذوب برف ارتفاعات الوند وابسته است. نبود منابع سطحی پایدار، کمبود بارش و ناهماهنگی زمانی بارندگی‌ها موجب شده تا فشار بیش‌ازحدی به منابع آب زیرزمینی وارد شود؛ به طوری که بیش از ۸۰ درصد از آب مصرفی کشاورزی و حدود ۵ درصد از آب شرب شهری از طریق منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. این امر منجر به بیلان منفی آبخوان و افت مداوم سطح ایستابی شده است (بلالی و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت همدان-بهار

در کنار برداشت بی‌رویه، استفاده گسترده از کودهای شیمیایی برای افزایش عملکرد محصولات کشاورزی نیز باعث افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی، از داده‌های برداشت شده از ۲۰ حلقه چاه نمونه‌برداری در طی ۵ سال پیاپی استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین نقاط نمونه‌برداری در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۱. نقاط نمونه برداری و مقادیر میانگین پنج ساله

چاه‌ها	نوع منبع	UTM X	UTM Y	EC (μs/cm)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	pH
جورقان	نیمه عمیق	۲۷۵۵۶۲	۳۸۶۲۴۵۵	۱۱۵۷/۴	۳۹/۷۲	۴۷۲/۲۷	۶/۹۶۶
آبرومند	نیمه عمیق	۲۵۵۸۷۵	۳۸۶۶۲۹۱	۱۰۴۲/۸	۳۶/۴۲	۳۶۰/۰۰	۷/۰۶۲
پلیس راه	عمیق	۲۶۰۸۳۵	۳۸۶۵۶۵۶	۱۰۳۶/۶	۴۳/۲۱	۳۸۱/۹۷	۷/۴۱۴
هارون آباد	عمیق	۲۶۲۹۱۳	۳۸۷۵۵۷۶	۹۰۵/۶	۳۰/۶۲	۳۳۳/۱۵	۷/۲۸۲
یکن آباد	عمیق	۲۷۱۰۵۲	۳۸۶۴۴۴۵	۸۵۰/۸	۴۲/۷۰	۳۲۳/۳۹	۷/۴۴۰
گراچقا	عمیق	۲۷۴۳۰۲	۳۸۶۰۶۰۶	۱۴۸۷/۸	۴۱/۸۶	۳۴۲/۹۱	۶/۸۹۸
بند ۳ بهار	عمیق	۲۶۳۵۸۴	۳۸۶۹۵۳۶	۵۰۴/۸	۳۲/۸۸	۲۰۳/۸۰	۷/۶۳۲
بهرام آباد	عمیق	۲۷۲۸۹۷	۳۸۶۷۲۳۸	۱۱۱۲/۸	۳۴/۰۰	۴۱۹/۸۰	۷/۳۴۸
کارخانه قند	نیمه عمیق	۲۷۸۱۲۰	۳۸۷۷۱۲۴	۲۰۰۷/۶	۴۵/۹۶	۳۹۵/۳۹	۷/۲۰۶
کارخانه شیشه	عمیق	۲۷۶۳۲۸	۳۸۶۸۶۹۳	۱۷۵۰/۰	۴۶/۲۶	۳۸۴/۴۱	۷/۰۰۵
حسام آباد	عمیق	۲۶۵۹۹۸	۳۸۷۲۱۷۳	۸۵۱/۶	۳۲/۲۶	۲۳۳/۰۸	۷/۳۸۴
ده پیاز	عمیق	۲۷۲۷۴۹	۳۸۶۳۸۷۷	۱۵۴۶/۸	۳۷/۶۰	۳۴۶/۵۸	۷/۱۴۰
دهنجر	عمیق	۲۷۲۶۳۹	۳۸۷۲۲۶۶	۱۲۰۶/۰	۳۸/۴۶	۴۰۸/۸۱	۷/۲۷۶
جمشیدآباد	نیمه عمیق	۲۶۸۱۸۹	۳۸۸۰۷۶۹	۸۸۳/۸	۳۷/۲۰	۳۱۹/۷۳	۷/۵۵۸
دستجرد	عمیق	۲۷۴۲۹۹	۳۸۷۸۲۷۱	۶۸۰/۴	۳۷/۶۹	۲۲۸/۲۰	۷/۳۲۵
صالح آباد	نیمه عمیق	۲۵۶۵۲۹	۳۸۶۸۱۹۹	۹۳۱/۴	۳۷/۵۲	۳۵۶/۳۴	۷/۲۷۶
کریم آباد	عمیق	۲۵۹۹۲۱	۳۸۷۱۷۶۱	۶۵۲/۴	۳۲/۳۱	۲۵۷/۴۹	۷/۳۷۶
گنج تپه	عمیق	۲۶۹۱۱۷	۳۸۶۸۷۱۹	۴۷۷/۴	۳۸/۷۰	۲۴۸/۹۵	۷/۴۹۰
لنگاه	نیمه عمیق	۲۷۵۴۸۸	۳۸۷۳۹۰۱	۱۹۶۷/۲	۳۸/۸۴	۵۰۷/۶۶	۷/۰۴۲
حسین آباد	عمیق	۲۶۳۱۲۷	۳۸۷۲۶۹۳	۹۰۰/۸	۳۰/۸۰	۳۱۴/۸۵	۷/۵۰۰

روش نمونه گیری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به صورت سالانه توسط شرکت آب منطقه‌ای همدان در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است، ترکیب نهایی این داده‌ها برای پهنه‌بندی به صورت سری پنج ساله برای بررسی روند تغییرات انجام شده است. به منظور رسم دیاگرام خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نیز از میانگین پنج ساله هر نقطه استفاده شد. نمونه‌برداری‌ها از ۲۰ حلقه چاه بهره‌برداری در نقاط مختلف دشت انجام گرفته که به عنوان ایستگاه‌های مرجع پایش کیفی آب در منطقه تعیین شده‌اند. ایستگاه‌های نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نماینده شرایط مختلف کاربری اراضی و ویژگی‌های هیدروژئولوژیک دشت باشند. بخشی از چاه‌ها در نواحی کشاورزی با مصرف بالای کود و سموم قرار دارند تا اثر احتمالی فعالیت‌های کشاورزی بر غلظت نیترات و هدایت الکتریکی بررسی شود. تعدادی از چاه‌ها در محدوده‌های مسکونی و صنعتی واقع شده‌اند تا نقش فاضلاب‌های خانگی و صنعتی بر کیفیت آب آشامیدنی ارزیابی گردد. همچنین ایستگاه‌هایی در حاشیه و مناطق کمتر تحت تأثیر فعالیت انسانی انتخاب شدند تا شرایط زمینه‌ای دشت مشخص گردد. این چینش مکانی به گونه‌ای طراحی شد که با نقشه‌های کاربری اراضی و خاک‌شناسی منطقه در محیط GIS همپوشانی داشته باشد و امکان تحلیل تغییرات مکانی-زمانی و شناسایی نواحی بحرانی با دقت بیشتری فراهم شود. طبق استاندارد ۲۳۴۷ به منظور به دست آوردن نمونه‌ای که نمایانگر خصوصیات اصلی منبع آب چاه باشد، پمپاژ به مدت پنج دقیقه آب را تخلیه کرده تا آب راکد تخلیه شود. (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۶۲ و ۱۳۷۲) برای

آزمون دو لیتر نمونه برداشت شد. نمونه‌برداری‌ها با ظروف پلی‌اتیلنی تمیز انجام‌شده و بلافاصله پس از برداشت، برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مانند pH و EC در محل با استفاده از دستگاه‌های پرتابل کالیبره شده اندازه‌گیری شدند. سپس برای اندازه‌گیری سایر پارامترها (مانند نیتрат و بی‌کربنات) نیز نمونه در دمای کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و در اسرع وقت به آزمایشگاه منتقل شدند تا تحت شرایط استاندارد تحلیل شوند. معیارهای انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی، عمق چاه، نوع بهره‌برداری و داده‌های پیشین کیفی صورت گرفته و تلاش شده است پوشش مناسبی از بخش‌های شمالی، جنوبی، شرقی و غربی دشت فراهم گردد.

روش‌های گردآوری اطلاعات

پژوهش حاضر از نوع بررسی مقطعی است. مدت‌زمان انجام پژوهش به مدت پنج سال از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳ به طول انجامیده است. در این مطالعه به بررسی pH، هدایت الکتریکی، بی‌کربنات و نیترات آب چاه‌ها پرداخته‌شده و درنهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Pro نقشه پهنه‌بندی شده این متغیرها بر روی دشت ترسیم‌شده است. برای درون‌یابی نقاط دشت از روش عکس فاصله وزنی (IDW) استفاده‌شده است. روش (Inverse Distance Weighting) IDW یا وزن معکوس فاصله، یک روش درون‌یابی است که در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تخمین مقادیر در نقاطی که داده‌ای در دسترس نیست، بر اساس نقاط همسایه‌ای که داده‌های آن‌ها در دسترس است، استفاده می‌شود. این روش بر این اصل استوار است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه موردنظر، تأثیر بیشتری بر مقدار تخمین‌زده شده دارند. همچنین نحوه عملکرد آن به این صورت است که ابتدا نقاطی که مقادیر آن‌ها مشخص است (نقاط مرجع) و یک نقطه هدف (نقطه نامعلوم) که مطلوب مقدار تخمین آن است، مشخص می‌شوند و فاصله بین نقاط مرجع و نقطه هدف محاسبه می‌شود. برای هر نقطه مرجع، یک وزن بر اساس معکوس فاصله آن از نقطه هدف محاسبه می‌شود. به این معنی که نقاط نزدیک‌تر، وزن بیشتری دریافت می‌کنند. سپس مقدار تخمینی برای نقطه هدف با استفاده از میانگین وزنی مقادیر نقاط مرجع محاسبه می‌شود. به این ترتیب که هر مقدار با وزن مربوط به آن ضرب شده و سپس با هم جمع می‌شوند و درنهایت بر مجموع وزن‌ها تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه پژوهش حاضر توسط نرم‌افزار GIS پهنه‌بندی گردیده است لذا یکی از عناصر اصلی این مطالعه وجود نقشه‌های دشت همدان-بهار و نقشه‌های زمین مرجع شده می‌باشد. نقشه دشت همدان-بهار با هماهنگی‌های لازمه از شرکت آب منطقه‌ای همدان تحویل گرفته و نقاط ایستگاه‌های اندازه‌گیری روی آن پیاده گردید و UTM ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده روی این نقشه‌ها پیاده گردید. نمونه‌برداری میدانی در ایستگاه‌های تعیین‌شده ابزار گردآوری داده‌ها در این پژوهش بوده است. پس از ۵ سال عملیات نمونه‌برداری و اندازه‌گیری در ایستگاه‌ها، کلیه داده‌های به‌دست‌آمده در چک‌لیست‌های طراحی‌شده که شامل کد ایستگاه، موقعیت جغرافیایی، غلظت بی‌کربنات، غلظت نیترات، pH و مقدار هدایت الکتریکی جمع‌آوری گردیده است. همچنین به‌منظور تحلیل دندروگرام، مرحله اولیه پردازش داده‌ها شامل مرتب‌سازی داده‌های خام برای هر چاه بود. پس از آن، میانگین پنج‌ساله هر پارامتر برای هر چاه محاسبه گردید. این مرحله میانگین‌گیری برای کاهش اثرات نوسانات کوتاه‌مدت و ثبت رفتار مشخصه و بلندمدت هر چاه بسیار حائز اهمیت بود. سپس، پارامترهای میانگین‌گیری شده به‌عنوان ورودی برای تحلیل خوشه‌بندی بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

تحلیل آماری داده‌ها:

تحلیل آماری داده‌ها برای بررسی الگوهای پنهان در کیفیت آب زیرزمینی و طبقه‌بندی چاه‌های نمونه‌برداری بر اساس شباهت پارامترهای کیفی، از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (Hierarchical Clustering Analysis) استفاده شد (Cloutier et al., 2008). در این روش،

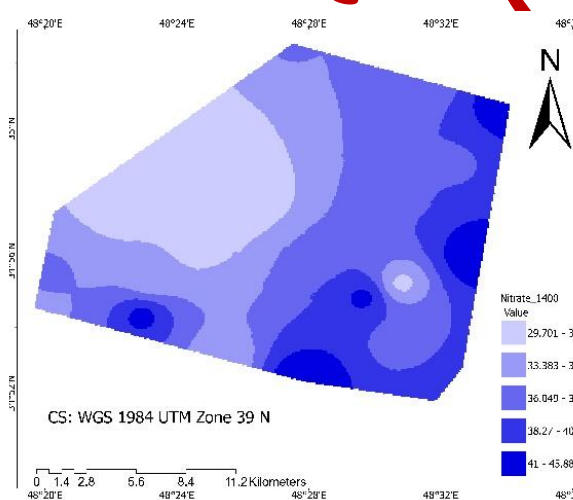
میانگین پنج ساله داده‌های مربوط به چهار پارامتر کلیدی شامل pH، نیتрат، هدایت الکتریکی (EC) و بی‌کربنات برای هر چاه محاسبه گردید. سپس به منظور حذف اثر تفاوت در مقیاس پارامترها، داده‌ها نرمال سازی شدند. (Z-score normalization) فرآیند خوشه‌بندی با استفاده از روش اتصال (Ward's Linkage) و فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) انجام شد، چراکه این ترکیب، قابلیت تفکیک خوشه‌ها با بیشترین همگنی درون خوشه‌ای را فراهم می‌سازد. فاصله اقلیدسی بین دو نمونه i و j مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

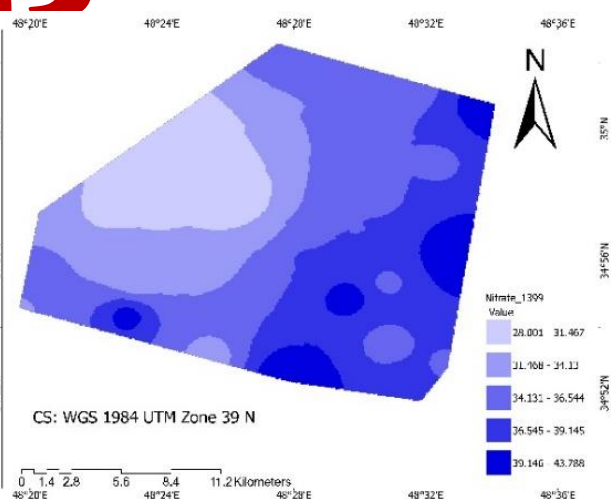
که در آن x_{ik} و x_{jk} به ترتیب مقادیر نرمال سازی شده پارامتر k برای نمونه‌های i و j هستند و n تعداد پارامترهای مورد بررسی است. استفاده از روش اتصال (Ward's linkage) به دلیل توانایی آن در ایجاد خوشه‌هایی با بیشترین همگنی درون خوشه‌ای و کمترین واریانس بین خوشه‌ها انتخاب شد. نتایج این تحلیل به صورت نمودار دندروگرام و نقشه خوشه‌بندی ارائه گردید که امکان شناسایی گروه‌های مشابه از نظر ویژگی‌های کیفی آب را فراهم ساخت.

بحث

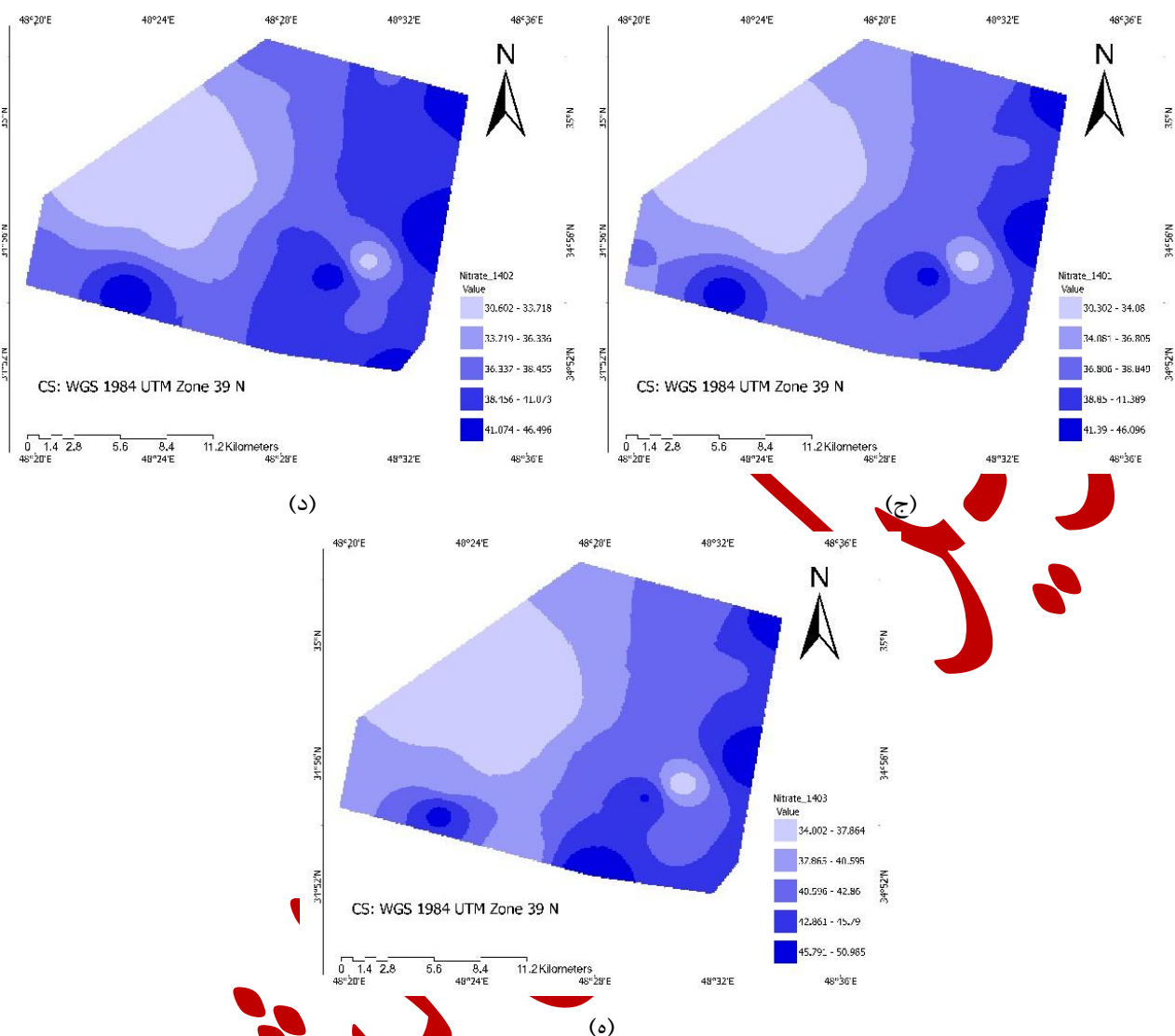
نتایج حاصل از این پژوهش در خصوص غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت همدان-بهار بر روی ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری برای سال‌های مختلف در شکل ۲ آمده است. طبق استاندارد ۱۰۵۳ ایران میزان غلظت نیترات آب شرب در حد مطلوب تا حداکثر ۵۰ میلی گرم در لیتر است، بنابراین مقادیر بالاتر از این محدوده به عنوان نقاط با مقدار نیترات بحرانی تلقی می‌گردد. همان طور که از روی شکل ۲ پیداست، نتایج حاصل، تغییرات مکانی و زمانی غلظت نیترات در طول دوره مورد بررسی را به وضوح نمایش می‌دهند.



(ب)



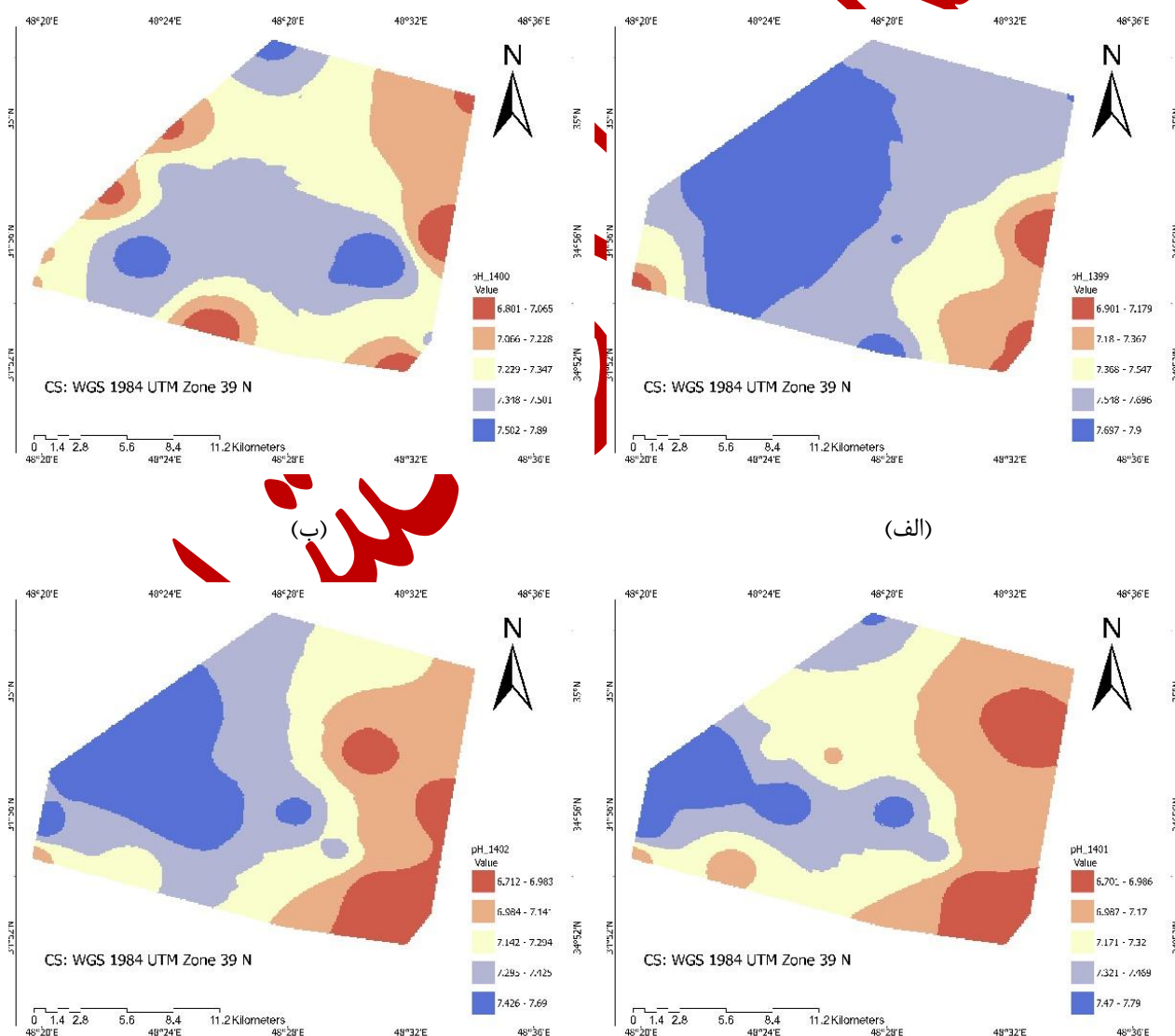
(الف)



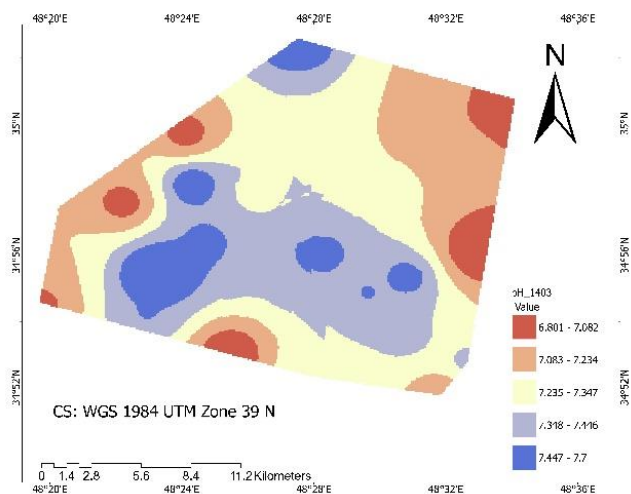
شکل ۲- پهنه‌بندی غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت همدان-بهار از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳

نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از درون‌یابی مکانی به روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) برای پارامتر نیترات در بازه زمانی پنج‌ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳) نشان‌دهنده تغییرات مکانی و زمانی قابل‌توجه در کیفیت آب زیرزمینی دشت بهار هستند. این تحلیل بر پایه داده‌های حاصل از ۲۰ حلقه چاه نمونه‌برداری انجام‌شده است. در سال ۱۳۹۹ (شکل ۲-الف)، غلظت نیترات در محدوده‌ای بین ۲۸ تا ۴۳/۸ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد. مقادیر بالاتر عمدتاً در بخش‌های جنوب شرقی و شرقی دشت متمرکز بودند. در مقابل، بخش‌های غربی و شمال غربی دارای غلظت‌های پایین‌تری بودند. در سال ۱۴۰۰ (شکل ۲-ب)، دامنه غلظت به ۲۹/۷ تا ۴۵/۹ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت. تمرکز مقادیر بالای نیترات به نواحی جنوبی‌تر متمایل شد و الگوی توزیع غلظت نیترات در نواحی جنوب شرقی حالت متفاوتی نسبت به سال قبل داشت. در سال ۱۴۰۱ (شکل ۲-ج)، غلظت نیترات همچنان در بازه حدود ۳۰ تا ۴۶ میلی‌گرم بر لیتر باقی ماند، اما گسترش نواحی با غلظت بالا نسبت به سال‌های قبل کاهش یافت، به‌ویژه در بخش‌های جنوبی دشت. در سال ۱۴۰۲ (شکل ۲-د)، میزان نیترات در محدوده ۳۰/۶ تا ۴۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. نقشه پهنه‌بندی این سال، مشابه سال ۱۴۰۱ است و تغییرات گسترده‌ای را نسبت به سال‌های گذشته نشان نمی‌دهد. در نهایت، در سال ۱۴۰۳ (شکل ۲-ه)، بیشترین مقادیر نیترات طی کل دوره بررسی به ثبت رسید. غلظت نیترات در

این سال از ۳۴ تا ۵۱ میلی گرم بر لیتر متغیر بود و ۳۰ درصد چاه‌ها (شش چاه)، به‌ویژه در جنوب شرق و شرق، دارای غلظت‌هایی بالاتر از حد مجاز استاندارد ملی ایران برای آب آشامیدنی (۵۰ میلی گرم بر لیتر) بودند (علیایی و همکاران، ۱۳۹۶). مرور کلی نتایج نشان می‌دهد که روند غلظت نیتрат در طی دوره مورد بررسی، به‌ویژه از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳، به‌طور نسبی افزایشی بوده است. حداقل غلظت از ۲۸ میلی گرم بر لیتر در سال ۱۳۹۹ به ۳۴ میلی گرم بر لیتر در سال ۱۴۰۳ و حداکثر آن از ۴۴ به ۵۱ میلی گرم بر لیتر افزایش یافته است. این روند افزایشی، به همراه گسترش مکانی نواحی با غلظت‌های بالا، حاکی از فشارهای فزاینده بر منابع آب زیرزمینی منطقه و فعالیت‌های کشاورزی و ورود آلاینده‌ها است. (جلالی و کلاهچی، ۱۳۸۴) به همین دلیل ضرورت پایش مستمر کیفیت آب، مدیریت بهینه مصرف کودهای شیمیایی، و کنترل بهره‌برداری از چاه‌های آب را دوچندان است. پارامتر pH یکی از شاخص‌های مهم کیفی در بررسی وضعیت اسیدی یا بازی بودن منابع آب زیرزمینی است که می‌تواند تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی، فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای شیمیایی در سفره‌های آب قرار گیرد. در این مطالعه، با استفاده از روش درونیابی وزن دهی معکوس فاصله (IDW) در محیط GIS، نقشه‌های پهنه‌بندی سالانه pH برای دشت همدان - بهار (شکل ۳) در طی دوره پنج‌ساله ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳ تهیه شد.



(د)



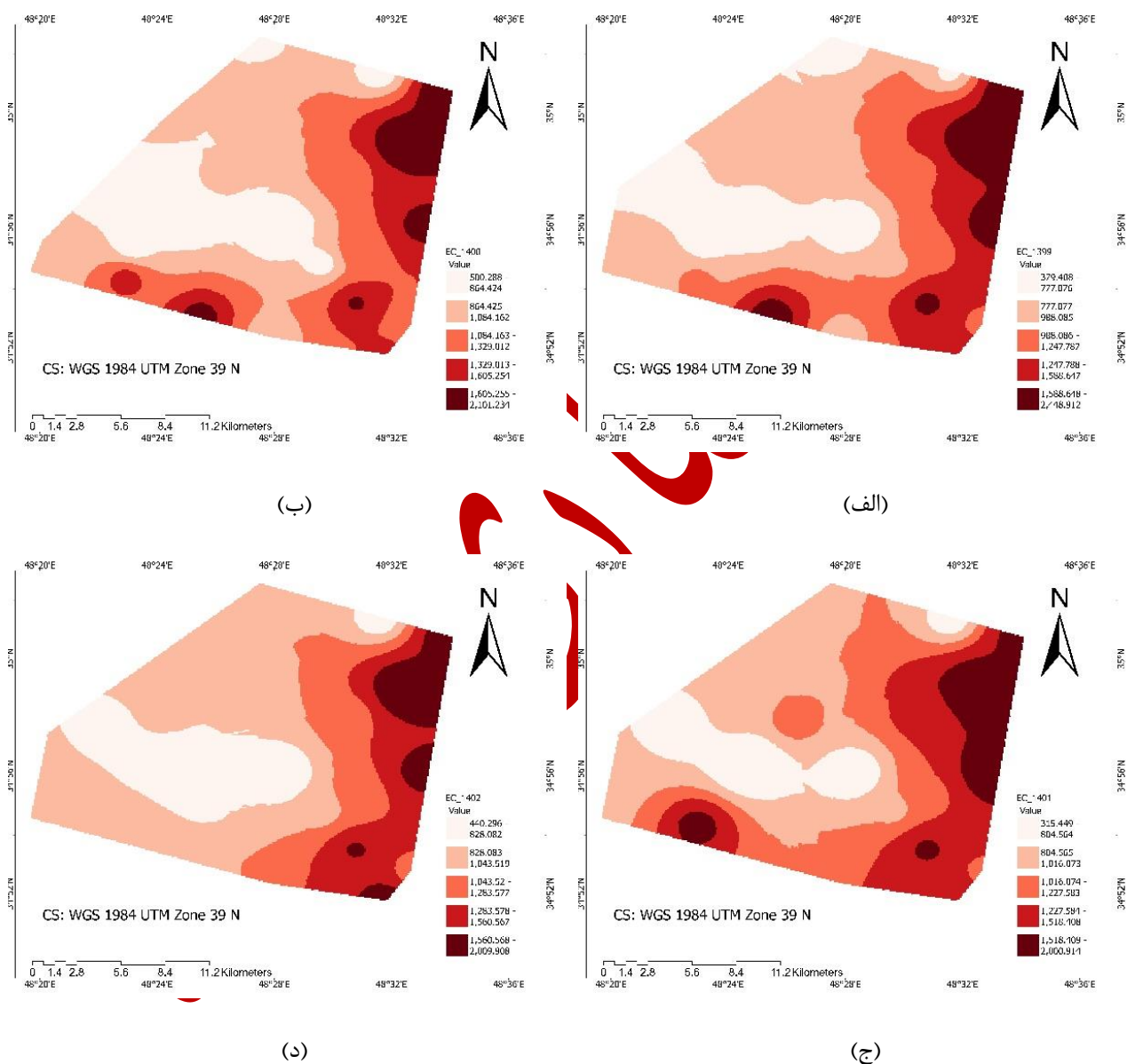
(ج)

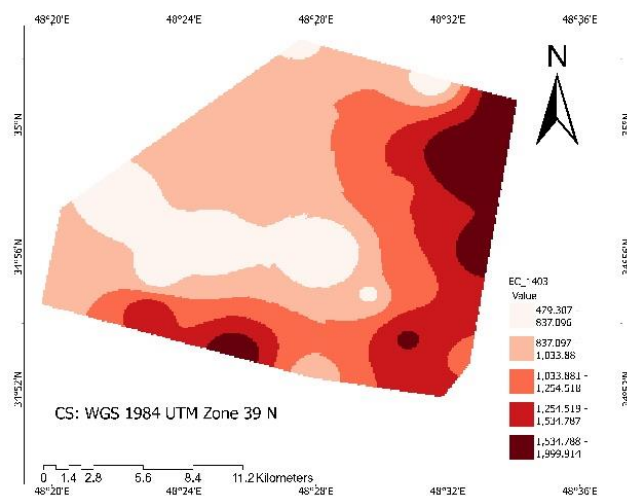
(ه)

شکل ۳- پهنه‌بندی میزان pH آب زیرزمینی دشت همدان-بهار از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳

در سال ۱۳۹۹ (شکل ۳-الف)، مقدار pH بین ۶/۹ تا ۷/۹ متغیر بود. بیشترین مقادیر pH در نواحی شرقی و جنوب شرقی دشت متمرکز بودند و در بخش‌های غربی، pH به مقادیر پایین‌تر نزدیک می‌شد. در این سال، بیشتر گستره دشت در محدوده خنثی (۷) تا کمی بازی قرار داشت که نشان‌دهنده شرایط نسبتاً متعادل شیمیایی آب بود. در سال ۱۴۰۰ (شکل ۳-ب)، دامنه تغییرات pH به ۶/۸ تا ۷/۸۹ رسید. نواحی با pH بالاتر در بخش‌های جنوبی و مرکزی ظاهر شدند و بخش‌های با pH پایین‌تر عمدتاً در شمال شرقی مشاهده شدند. به‌طور کلی، الگوی توزیع pH در این سال نسبت به سال قبل دارای پراکندگی یکنواخت‌تری بود. سال ۱۴۰۱ (شکل ۳-ج) دارای پایین‌ترین مقدار حداقل pH در کل دوره بررسی شده بود، به‌طوری‌که دامنه مقادیر از ۶/۷ تا ۷/۷۹ بود. بخش‌های شرقی دشت دارای پایین‌ترین pH بودند. نواحی با pH بالاتر در مرکز و غرب دشت تمرکز یافتند. در سال ۱۴۰۲ (شکل ۳-د)، محدوده pH از ۶/۷۱ تا ۷/۶۹ بود. گرچه حداکثر pH کمی کاهش یافت، اما الگوی توزیع نسبتاً مشابه سال ۱۴۰۱ باقی ماند. مقادیر پایین pH در بخش‌های شرقی و شمال شرقی دشت مشاهده شد، درحالی‌که بخش غربی همچنان مقادیر بالاتر را حفظ کرد (زارع ابیانه، حمید، ۱۳۹۲). در نهایت، در سال ۱۴۰۳ (شکل ۳-ه)، مقدار pH در بازه ۶/۸ تا ۷/۷ قرار داشت. مقایسه این سال با سال ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که هرچند مقدار حداکثر pH اندکی کاهش یافته است، اما پراکندگی مناطق با pH پایین‌تر گسترش یافته است، به‌خصوص در بخش‌های جنوبی و غربی. به‌طور کلی، تحلیل روند تغییرات pH طی بازه پنج‌ساله مورد مطالعه نشان می‌دهد که باوجود نوسانات نسبی سالانه، مقادیر pH در بیشتر نقاط دشت در محدوده قابل قبول برای مصارف شرب مطابق استاندارد ۱۰۵۳ ملی ایران (۶/۵ تا ۸/۵) داشته‌اند (نورکی و هوشمند، ۱۳۹۸). در حالت کلی pH دارای تغییرات جزئی و بیشتر وابسته به زمین‌شناسی منطقه بوده است (Ghobadi et al., 2020). بااین‌حال، کاهش تدریجی حداکثر pH و تمرکز نواحی با pH پایین در برخی نقاط شرقی می‌تواند نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر هیدروژئوشیمیایی و منابع احتمالی ورود ترکیبات اسیدی به آب زیرزمینی باشد. به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی، پهنه‌بندی هدایت الکتریکی (EC) آبخوان دشت همدان-بهار طی یک دوره پنج‌ساله از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳ با استفاده از ۲۰ نقطه نمونه‌برداری در هر سال انجام شد. هدایت الکتریکی یکی از شاخص‌های

مهم در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی به شمار می‌رود، چراکه بیانگر غلظت کل املاح محلول در آب بوده و افزایش آن می‌تواند نشان‌دهنده ورود منابع آلاینده یا تغلیظ املاح بر اثر برداشت بی‌رویه باشد. نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی نشان‌دهنده روند نسبتاً مشخصی در توزیع و تغییرات EC در طول زمان است (شکل ۴).



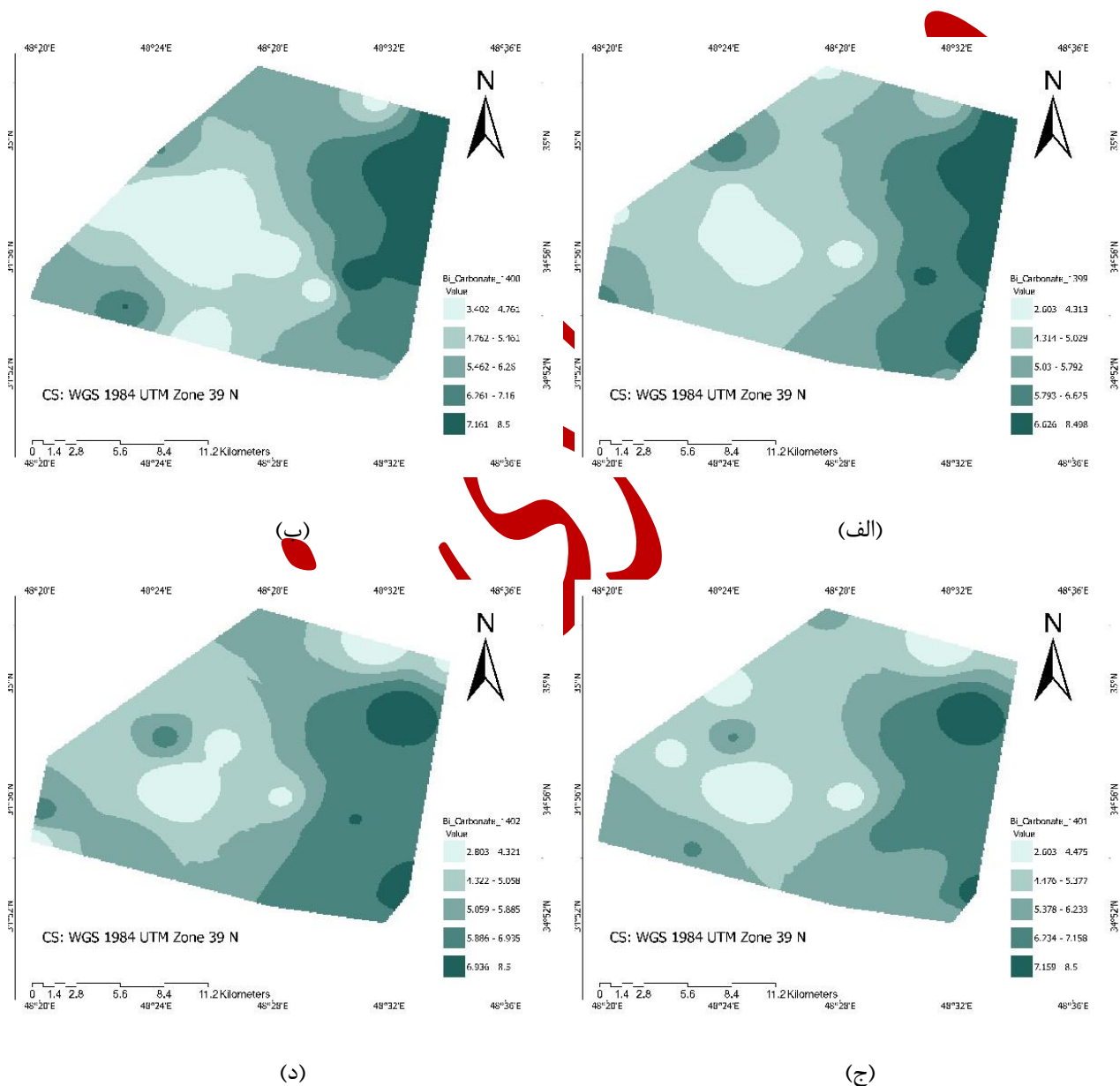


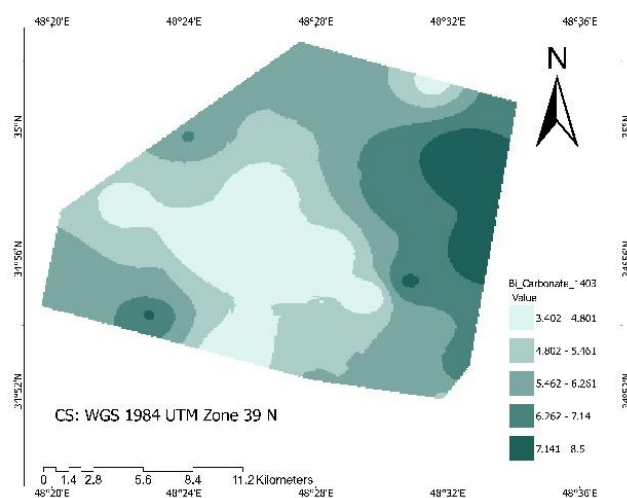
(ه)

شکل ۴- پهنه‌بندی میزان EC در آب زیرزمینی دشت همدان-بهار از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳

در سال ۱۳۹۹ (شکل ۴-الف)، دامنه EC در محدوده ۳۷۹/۴ تا ۲۴۴۸/۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر قرار داشت که بیشترین میزان ثبت شده در کل دوره مورد بررسی است. در این سال، بخش‌های شرقی و شمال شرقی دشت دارای بیشترین غلظت هدایت الکتریکی بودند، در حالی که نواحی غربی و جنوبی مقادیر پایین‌تری را نشان دادند. در سال ۱۴۰۰ (شکل ۴-ب)، ضمن کاهش حداکثر مقدار EC به ۲۱۰۱/۲، توزیع مکانی مناطق با EC بالا همچنان مشابه سال پیش بود، اما گسترش آن‌ها محدودتر گردید. سال ۱۴۰۱ (شکل ۴-ج) کمترین مقدار EC یعنی ۳۱۵/۵ را به خود اختصاص داد و با کاهش محسوس غلظت در نواحی شرقی همراه بود؛ به گونه‌ای که توزیع آلودگی یکنواخت‌تر شده و شدت مقادیر بالا کاهش یافته بود. در سال ۱۴۰۲ (شکل ۴-د)، مقادیر EC با حد بالا معادل ۲۰۰۹/۹ مجدداً افزایشی اندک داشتند و بخش‌های شرقی و جنوب شرقی بار دیگر با غلظت‌های بالاتری نمایان شدند. نقشه سال ۱۴۰۳ (شکل ۴-ه) نیز با تداوم این الگو، حداکثر EC را در حدود ۱۹۹۹/۹ نشان داد، اما نکته قابل توجه، افزایش مقادیر هدایت الکتریکی در بخش‌های جنوب غربی دشت بود که پیش‌تر کیفیت مناسب‌تری داشتند. در مجموع، بررسی روند زمانی این پنج سال نشان می‌دهد که حداکثر مقدار EC در طول زمان کاهش نسبی یافته و از ۲۴۴۸/۹ در سال ۱۳۹۹ به حدود ۲۰۰۰ در سال ۱۴۰۳ رسیده است. همچنین، نواحی با EC بالا عمدتاً در بخش شرقی دشت متمرکز باقی‌مانده‌اند که ناشی از پایداری منابع آلاینده در این مناطق است (زارع ابیانه، حمید، ۱۳۹۲). کاهش تدریجی در گستره نواحی با EC بالا و یکنواخت‌تر شدن توزیع مکانی آلودگی نشان‌دهنده تغییراتی در الگوی بهره‌برداری یا تغذیه آبخوان است. با این حال، استمرار وجود مقادیر بالا در برخی نقاط تأکیدی بر ضرورت برنامه‌ریزی دقیق مدیریتی و کنترل منابع آلاینده در دشت همدان-بهار است. بر اساس مقادیر هدایت الکتریکی ثبت شده در دشت همدان-بهار طی دوره پنج‌ساله مطالعه شده، آب در بخش‌هایی از منطقه به‌ویژه نواحی شرقی و جنوب شرقی دچار افت کیفیت شده و در وضعیت "نامناسب برای شرب" قرار دارد (فاضل توسل و همکاران، ۱۳۹۸). این شرایط به‌خصوص در سال ۱۳۹۹ شدید بوده و روند آن در سال‌های بعد ادامه داشته است. با این حال، استمرار مقادیر بالای EC در نقاط خاص نشان‌دهنده وجود منابع آلاینده ثابت و یا فرآیندهایی مانند تغلیظ ناشی از برداشت بیش‌ازحد است. بنابراین، استفاده از آب این مناطق برای مصارف شرب بدون انجام تصفیه مناسب غیربهداشتی خواهد بود. پیشنهاد می‌شود اقدامات کنترلی از جمله پایش منظم EC، شناسایی منابع آلاینده (اعم از کشاورزی، فاضلاب یا صنعتی) و اجرای برنامه‌های مدیریت تقاضای آب تقاضای آب به‌طور جدی دنبال شوند. بی‌کربنات (HCO_3^-)

یکی از مؤلفه‌های اصلی ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی است و نقش کلیدی در تنظیم pH، تعادل اسید-باز، ظرفیت بافری (Health Canada, 2015) و سختی موقت آب دارد. پایش غلظت این یون به دلیل تأثیر مستقیم بر کیفیت آب و عملکرد فنی سامانه‌های انتقال، ضروری است. در این پژوهش، غلظت بی‌کربنات آب زیرزمینی دشت همدان-بهار طی یک بازه زمانی پنج‌ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳) با استفاده از ۲۰ نقطه نمونه‌برداری در هرسال موردبررسی و پهنه‌بندی قرار گرفت (شکل ۵). مقدار بی‌کربنات در تمامی سال‌ها در بازه‌ای بین ۲/۶ تا ۸/۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) اندازه‌گیری شد که معادل تقریبی ۱۵۹ تا ۵۱۹ میلی‌گرم بر لیتر (mg/L) است.

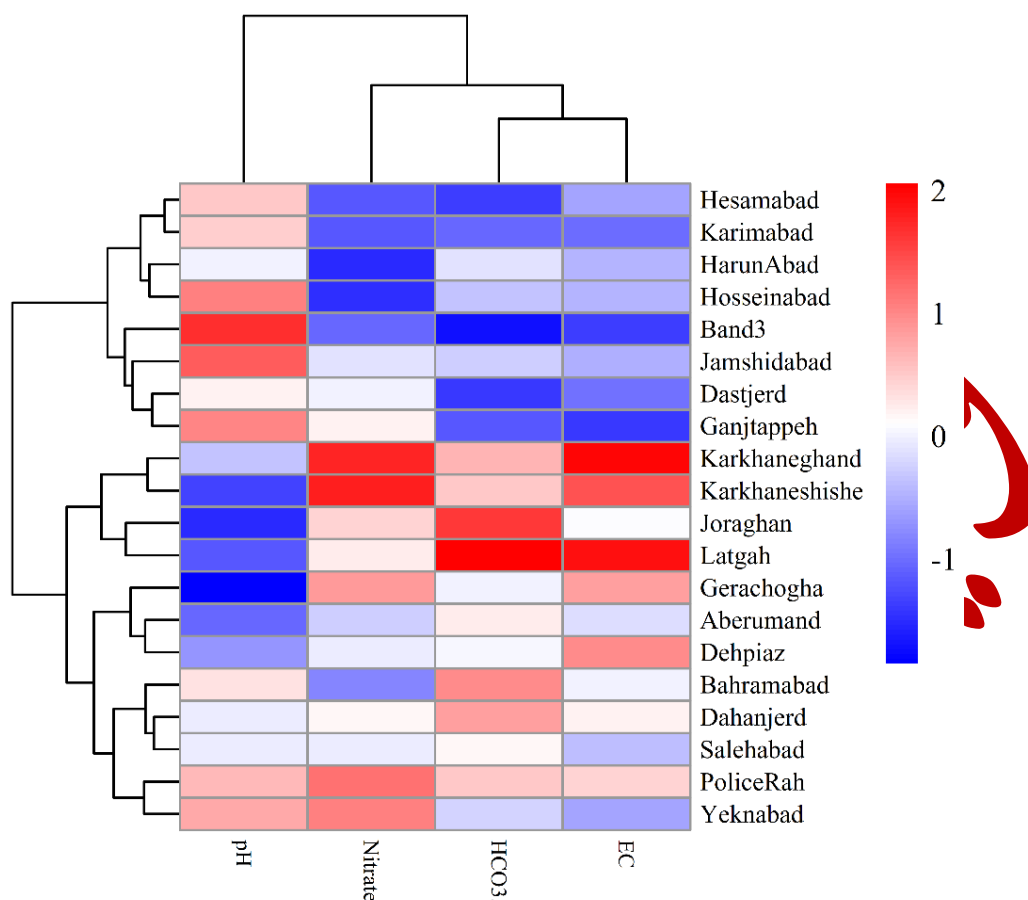




(ه)

شکل ۵- پهنه‌بندی غلظت بی‌کربنات آب زیرزمینی دشت همدان-بهار از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳

در سال ۱۳۹۹ (شکل ۵-الف)، غلظت بی‌کربنات بین ۱۵۹ تا ۵۱۹ میلی‌گرم بر لیتر بود. بیشترین مقادیر در نواحی شرقی و جنوب‌شرقی و دشت ثبت شد و نواحی غربی دارای غلظت‌های پایین‌تری بودند (فاضل‌توسل و همکاران، ۱۳۹۸). در سال ۱۴۰۰ (شکل ۵-ب)، حداقل مقدار به ۲۰۷ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت، درحالی‌که حداکثر غلظت در همان سطح سال قبل باقی ماند. در این سال، بخش‌هایی از جنوب و مرکز دشت نیز دارای غلظت‌های بالا بودند. در سال ۱۴۰۱ (شکل ۵-ج)، مجدداً مقادیر از ۱۵۹ تا ۵۱۹ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بود و توزیع مکانی غلظت به‌صورت متعادل‌تر در سطح دشت مشاهده شد. سال ۱۴۰۲ (شکل ۵-د) با حداقل غلظت ۱۷۱ میلی‌گرم بر لیتر همراه بود و حداکثر مقدار همچنان در سطح ۵۱۹ میلی‌گرم بر لیتر باقی ماند. در نهایت در سال ۱۴۰۳ (شکل ۵-ه)، دامنه مقادیر مشابه سال ۱۴۰۰، یعنی بین ۲۰۷ تا ۵۱۹ میلی‌گرم بر لیتر ثبت گردید. بررسی روند تغییرات طی این دوره، ثبات قابل‌توجهی در حداکثر غلظت بی‌کربنات و پایداری نسبی الگوی توزیع مکانی را نشان می‌دهد. باوجود نوسانات جزئی در مقادیر حداقلی، تغییرات کلی محدود بوده و دامنه مقادیر در سطح آبخوان تقریباً ثابت باقی‌مانده است. این وضعیت در محدوده تغییرات ژئوشیمیایی طبیعی آب‌های زیرزمینی قرار دارد. بر اساس یافته‌های حاصل از این مطالعه، کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان-بهار از نظر پارامتر بی‌کربنات در شرایط پایدار و طبیعی قرار داشته و نشانگر هیچ‌گونه آلودگی غیرعادی نیست.



شکل ۶- نتایج تحلیل آماری داده‌ها

مجموعه داده‌های چند پارامتری و میانگین‌گیری شده برای تمام چاه‌ها تحت آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی قرار گرفت تا دندروگرام تولید شود. به دلیل عدم تشابه واحد میزان پارامترها داده نرمال‌سازی شده‌اند تا بتوان آن‌ها را مقایسه کرد. این تکنیک به صورت بصری روابط بین چاه‌ها را نشان می‌دهد و آن‌ها را بر اساس شباهت پارامترهای میانگین‌گیری شده پنج‌ساله خوشه‌بندی می‌کند. دندروگرام حاصل، یک نمایش گرافیکی واضح از خوشه‌ها و زیر خوشه‌های چاه‌ها و پارامترها ارائه می‌دهد که میزان شباهت آن‌ها را نشان می‌دهد. با استفاده از HCA، پارامترهای نمونه‌های آب زیرزمینی به سه خوشه اصلی تقسیم شدند. پارامترهای EC و HCO_3^- همبستگی خوبی داشته و معمولاً باهم افزایش یا کاهش دارند. نیترات و pH در خوشه‌های جداگانه هستند. خوشه‌بندی کمک کرده است تا گروه‌های پارامتری که معمولاً به صورت هم‌افزا عمل می‌کنند، شناسایی شوند. این موضوع برای تحلیل منابع آلودگی مفید است. خوشه‌بندی مکانی نیز چاه‌ها را به چهار گروه اصلی تقسیم کرده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که چاه‌های شرق و جنوب شرقی دشت در یک خوشه بوده و دارای غلظت زیاد نیترات و مقدار بالای هدایت الکتریکی هستند. بر اساس HCA، چاه‌ها به سه خوشه اصلی تقسیم شدند: گروه کم آلوده ۴۰ درصد (۸ چاه شامل چاه‌های حسام آباد، کریم آباد، هارون آباد، حسین آباد، بند ۳ بهار، جمشیدآباد، دستجرد و گنج تپه)، گروه نسبتاً آلوده ۴۰ درصد (۸ چاه شامل چاه‌های گراچقا، آبرومند، ده‌پیز، بهرام آباد، دهنجرد، صالح آباد، پلیس‌راه و یکن آباد)، گروه آلوده ۲۰ درصد (۴ چاه شامل چاه‌های کارخانه قند، کارخانه شیشه، جورقان و لنگاه).

نتیجه گیری

این مطالعه روند تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت همدان-بهار را طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۳ با تمرکز بر شاخص‌های pH، نیتрат و هدایت الکتریکی (EC) مورد تحلیل قرار داد. یافته‌ها نشان داد که اگرچه پارامترهای pH و بی‌کربنات در بیشتر نقاط در محدوده قابل قبول برای مصارف شرب قرار دارند، اما تغییرات قابل توجهی در غلظت نیترات و EC مشاهده شد. غلظت نیترات در طی دوره پنج‌ساله روند افزایشی نسبی داشته و در سال ۱۴۰۳ به حداکثر ۵۱ میلی‌گرم بر لیتر در برخی نواحی (به‌ویژه جنوب شرقی و شرق) رسید که فراتر از حد مجاز استاندارد ملی ایران برای آب شرب است. این افزایش حاکی از فشارهای فزاینده بر آبخوان، احتمالاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و ورود آلاینده‌ها است. در مورد هدایت الکتریکی (EC)، سال ۱۳۹۹ بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داد که مناطق شرقی و شمال شرقی دشت دارای بالاترین غلظت‌ها بودند. باوجود کاهش نسبی حداکثر EC از حدود ۲۴۴۸ در سال ۱۳۹۹ به حدود ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در سال ۱۴۰۳، نواحی با EC بالا همچنان در بخش شرقی متمرکز باقی ماندند. همچنین، افزایش مقادیر EC در بخش‌های جنوب غربی دشت در سال ۱۴۰۳، نشان‌دهنده گسترش مناطق متأثر از افت کیفیت است. در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که کیفیت آب زیرزمینی در بخش‌هایی از دشت همدان-بهار، به‌ویژه در نواحی شرقی و جنوب شرقی، به دلیل غلظت بالای نیترات و EC، برای مصارف شرب نامناسب است. این وضعیت ضرورت برنامه‌ریزی دقیق مدیریتی، شامل پایش منظم کیفیت آب، شناسایی و کنترل منابع آلاینده (کشاورزی، فاضلاب، صنعتی) و اجرای برنامه‌های مدیریت تقاضای آب در منطقه را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی شامل تغذیه مصنوعی و تجهیز اراضی منطقه به سیستم‌های آبیاری تحت فشار برای حفظ و بهبود کیفیت این منبع حیاتی، برای پایداری منطقه ضروری است. نقشه‌ی حرارتی کیفیت نرمال‌شده‌ی آب، ناهمگنی مکانی قابل توجهی را در شیمی آب‌های زیرزمینی در ۲۰ چاه تحت پایش نشان می‌دهد، به‌طوری‌که تغییرات بارزی در پارامترهای بی‌کربنات (HCO_3^-)، pH، نیترات و هدایت الکتریکی (EC) مشاهده می‌شود. داده‌ها که بر اساس انحراف معیار از میانگین (از -۱ تا +۲) نرمال‌سازی شده‌اند، نشان می‌دهند که چاه‌ها دارای مشخصات هیدروشیمیایی متمایزی هستند. غلظت نیترات بیشترین تغییرپذیری را در بین پارامترهای اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، به‌طوری‌که چندین چاه (به‌ویژه چاه‌های کارخانه قند و کارخانه شیشه) مقادیری بیش از دو انحراف معیار بالاتر از میانگین را نشان می‌دهند که به‌طور بالقوه نشان‌دهنده‌ی منابع آلودگی انسانی مانند رواناب کشاورزی یا شیرابه است. الگوهای هدایت الکتریکی عموماً با توزیع بی‌کربنات همبستگی دارند که نشان‌دهنده‌ی عوامل زمینه‌ای مشترک مؤثر بر قدرت یونی است. در مقابل، مقادیر pH در سراسر شبکه‌ی چاه‌ها نسبتاً پایدار باقی می‌ماند که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بافر ثابت در سیستم آبخوان است. این تغییرپذیری مکانی در پارامترهای کیفیت آب، بر اهمیت استراتژی‌های پایش مختص محل تأکید می‌کند و نشان‌دهنده‌ی وجود منابع آلودگی محلی یا شرایط هیدروژئولوژیکی متغیر مؤثر بر شیمی آب‌های زیرزمینی است (شکل ۶). در مطالعه حاضر چند محدودیت وجود داشت که می‌تواند دامنه‌ی گیری و تعمیم نتایج را محدود کند. اول، توزیع نمونه‌های کیفی در بازه‌ی زمانی مذکور یکنواخت نبوده و در برخی سال‌ها تعداد چاه‌های نمونه‌برداری کمتر از حد ایده‌آل بود؛ این موضوع ممکن است دقت نقشه‌های پهنه‌بندی و نتایج روندی را کاهش دهد. دوم، بعضی پارامترهای تکمیلی (مثلاً عمق سطح آب، دبی چاه‌ها و برخی متغیرهای هیدرولوژیکی و سایر متغیرهای شیمیایی آب) در دسترس نبودند؛ نبود این متغیرها تفسیر تغییرات کیفیت و طبقه‌بندی آب را محدود می‌کند. داده‌هایی به‌منظور تحلیل نقشه‌های همپوشانی نیز در اختیار پژوهشگران قرار نگرفت. سوم، پیشنهاد می‌شود برای اعتبارسنجی از چند روش درون‌یابی و تحلیل عدم قطعیت استفاده شود. نهایتاً، تغییرات مدیریتی و بهره‌برداری محلی که پس از دوره مطالعه رخ دهد یا ثبت نشده باشد می‌تواند بر روندهای بلندمدت اثر بگذارد؛ پایش مستمر و دفعات نمونه‌برداری بالاتر برای بهبود اطمینان پیشنهاد می‌گردد.

- پورمقدس، حسین. (۱۳۸۲). بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه لتجانان اصفهان. *مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی*، ۱ (۴): ۳۱-۴۰.
- شایگان، مه‌رمان و مکرم، مرضیه. (۱۴۰۰). بررسی کیفیت آب در محیط GIS با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP). *نشریه سنجش‌ازدور و GIS/ایران*، ۱۳(۳)، ۱۱۳-۱۲۶.
- اقبالیان، سحر و بهمنی، امید. (۱۳۹۹). بررسی تغییرات مکانی و زمانی معیارهای کیفی آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با استفاده از (GIS) طی بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۲(۳)، ۸۳-۹۸.
- زارع ابیانه، حمید. (۱۳۹۲). تحلیل مکانی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی دشت همدان-بهار. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲(۴)، ۸۷-۱۱۲.
- استواری، یاسر، بیگی هرچگانی، حبیب‌الله و حشمتی، سیده سمیرا. (۱۳۹۴). ارزیابی کیفیت شرب آب زیرزمینی دشت لردگان با استفاده از شاخص GWQI در محیط GIS. *نشریه سنجش‌ازدور و GIS/ایران*، ۷(۲)، ۱۲۰-۱۰۷.
- اروجی، بلال؛ اروجی، عباس و فلاح کریمی، زینب. (۱۳۹۰). بررسی و مدل‌سازی پراکنش پارامترهای ژئوشیمیایی آب زیرزمینی با استفاده از GIS مطالعه موردی: دشت همدان - بهار، *چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب/ایران/بهار*.
- بالایی، حمید؛ خلیلیان، صادق و احمدیان، مجید. (۱۳۸۹). بررسی نقش قیمت‌گذاری آب در بخش کشاورزی بر تعادل منابع آب زیرزمینی. *مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۱۹(۲)، ۱۸۵-۱۹۴.
- رحمانی، علی‌رضا و سدهی، مرتضی. (۱۳۸۴). پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با مدل سری‌های زمانی. *مجله آب و فاضلاب*، ۱۵(۳)، ۴۲-۴۹.
- نورکی، عاطفه و هوشمند، عبدالرحیم. (۱۳۹۹). بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب (مطالعه موردی: دشت همدان-بهار). *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۲(۷)، ۴۱۵-۴۲۸.
- جلالی، محسن و کلاهچی، زهرا. (۱۳۸۴). غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی منطقه بهار همدان. *علوم خاک و آب*، ۱۹(۲)، ۲۰۲-۱۹۴.
- علیایی، محمدصادق؛ فصیحی رامندی، جواد؛ سپهریان، حمید و الماسی، ضیال‌الدین. (۱۳۹۶). توسعه شهری و آلودگی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت همدان - بهار). *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۵(۴)، ۱۱۲-۱۰۱.
- فاضل توسل، سجاد؛ احمدی، علی؛ صفری کمیل، مصطفی و دهقانی، رضا. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی مطالعه موردی: دشت همدان-بهار، *نشریه زمین شناسی محیط زیست*، ۱۳(۴۶)، ۳۳-۴۷.

References

- Karim, M. R., Arham, M. A., Shorif, M. J. U., Ahsan, A., and Al-Ansari, N. (2024). GIS based geostatistical modelling and trends analysis of groundwater quality for suitable uses in Dhaka division. *Scientific Reports*, 14(1).
- Bahrami, M., Zarei, A. R., and Rostami, F. (2020). Temporal and spatial assessment of groundwater contamination with nitrate by nitrate pollution index (NPI) and GIS (case study: Fasarud Plain, southern Iran). *Environmental Geochemistry and Health*, 42(10), 3119–3130.
- Ababakr, F. A., Ahmad, K. O., Amini, A., Karami-Moghadam, M., and Gokcekus, H. (2023). Spatio-temporal variations of groundwater quality index using geostatistical methods and GIS. *Applied Water Science*, 13(10). <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02010-4>

- Kurunc, A., Erashin, S., Somez, N. K., Kaman, H., Uz, I., Uz, B. Y., and Aslan, G. E. (2016). Seasonal changes of spatial variation of some groundwater quality variables in a large irrigated coastal Mediterranean region of Turkey. *Science of The Total Environment*, 554–555, 53–63.
- Pourmoghadas, H. (2003). A study on groundwater quality in Lenjanat region, Isfahan. *Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 1(1). (In Persian)
- Shaygan, M., and Mokarrem, M. (2021). Groundwater quality assessment using fuzzy methods and ANP in GIS environment. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 13(3), 113–126. (In Persian)
- Eghbalian, S., and Bahmani, O. (2020). Spatial and temporal changes of groundwater quality standards in Hamedan-Bahar plain using GIS during a 10-year period. *Environmental Science and Technology*, 22. (In Persian)
- Zare Abianeh, H. (2013). Analysis of groundwater quality parameters in Hamedan-Bahar plain. *Geography and Environmental Hazards*, 8, 65–86. (In Persian)
- Ostovari, Y., Beigi Harchegani, H., and Hashemati, S. S. (2016). Evaluation of drinking water quality in Lordegan plain using GWQI index in GIS. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 7, 107–120. (In Persian)
- Orooji, A., Orooji, B., and F. Karimi, Z. (2011). Modeling and analysis of spatial distribution of groundwater geochemical parameters using GIS: Case study of Hamedan-Bahar plain. Conference paper, Civilica. <https://civilica.com/doc/117041>. (In Persian)
- Balali, H., Khalilian, S., and Ahmadian, M. (2010). Investigating the role of water pricing in agriculture on groundwater balance. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 24, 185–194. (In Persian)
- Rahmani, A. R., and Sedehi, M. (2005). Prediction of groundwater level changes in the Hamedan-Bahar plain using time series models. *Journal of Water and Wastewater*, 15, 42–49. (In Persian)
- Nouraki, A., and Hooshmand, A. R. (2020). Evaluation of trend and spatial distribution pattern of groundwater quality using water quality indices (Case study: Hamedan–Bahar plain). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 1. (In Persian)
- Jalali, M., and Kolahchi, Z. (2005). Nitrate concentration in groundwater of Bahar region, Hamedan. *Journal of Soil and Water Sciences*, 19(2). (In Persian)
- Health Canada. (2015). Guidelines for Canadian drinking water quality: Guideline technical document—pH (Catalogue No. H144-28/2016E-PDF). Ottawa, Ontario: Author.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (1983, 1994). Water sampling – Guidance on sampling techniques (National Standard of Iran No. 2347). Tehran: ISIRI. [In Persian]
- Oliaei, M. S., Pesihi Ramandi, J., Sepehrian, H., and Almasi, Z. (2018). Urban development and groundwater pollution (Case study: Hamedan–Bahar plain). *Environmental Sciences Quarterly*, 15(4), 101–112. (In Persian)
- Fazel Tavassol S., Ahmadi A., Safari Komeil M., Dehghani R. (2019). Investigation of changes in groundwater hydrogeochemistry: A case study of Hamedan-Bahar plain. *Quarterly Scientific Research Journal Of Environmental Geology* (46). [In Persian]
- Ghobadi, A., Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B., Merrikhpour H. Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, West of Iran. *Environ Earth Sci* 79, 428 (2020).

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., and Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3–4), 294–313.

Introduction

Groundwater resources play a vital role as the main source of drinking water, agriculture, and industry in many arid and semi-arid regions of Iran. Limited surface water availability, population growth, agricultural and industrial expansion, and frequent droughts have significantly increased reliance on groundwater in recent decades. However, groundwater quality is under serious threat due to the overuse of chemical fertilizers and pesticides, discharge of municipal and industrial effluents, and excessive abstraction. The Hamedan–Bahar plain, located in the northwest of Hamedan Province with a cold semi-arid climate, covers about 880 km² and supplies over 80% of agricultural and nearly half of urban drinking water needs. Assessing its spatiotemporal variations in groundwater quality is therefore of critical importance. This study focuses on monitoring four key parameters—pH, nitrate, electrical conductivity (EC), and bicarbonate—during the period 2020–2024. The use of Geographic Information System (GIS) for spatial mapping of critical zones and Hierarchical Cluster Analysis (HCA) for classifying wells constitutes the main innovation of this research, providing a practical framework for groundwater management and strategic planning.

Methodology

Data from 20 production wells in the Hamedan–Bahar plain were collected over a five-year period (2020–2024). The dataset included annual measurements of pH, nitrate (NO₃⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), and electrical conductivity (EC), recorded by the Regional Water Authority of Hamedan Province. Sampling wells were selected from different land-use zones—agricultural, industrial, urban, and peripheral areas—to ensure adequate representation. All procedures followed national and international standards, and samples were analyzed in the laboratory. For spatial analysis, the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method was applied in ArcGIS Pro to generate continuous maps of groundwater quality. For statistical analysis, five-year averages of each parameter were calculated and normalized, followed by Hierarchical Cluster Analysis (HCA) using Ward's linkage and Euclidean distance to classify wells into groups with similar quality characteristics.

Results

The five-year analysis revealed significant spatiotemporal variations in groundwater quality. The pH values ranged from 6.7 to 7.9 and remained within the national drinking water standard (6.5–8.5). Slightly lower values occurred in the eastern and southern

regions, while higher values were found in the west and north. Nitrate concentrations showed a clear increasing trend, rising from 28 mg/L in 2020 to 51 mg/L in 2024. By the end of the monitoring period, about 30% of wells exceeded the permissible limit of 50 mg/L, with the highest concentrations in the southern and eastern zones where fertilizer use is more intensive. Electrical conductivity values in some wells surpassed 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicating the onset of salinity. Although the maximum occurred in 2020 and the minimum in 2022, the overall trend showed gradual increases, especially in the eastern and northeastern sectors. In contrast, bicarbonate remained relatively stable, always below 10 mg/L across the plain. HCA grouped the wells into four categories: wells with good quality, wells with moderate pollution, wells with elevated nitrate and EC, and critically polluted wells concentrated in the south and east.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that groundwater quality in the Hamedan–Bahar plain is facing increasing pressure. Rising nitrate levels and gradual salinization, particularly in the southern and eastern parts of the plain, are mainly linked to excessive fertilizer application, infiltration of agricultural and industrial effluents, and over-abstraction. These trends pose significant risks to public health, agricultural productivity, and ecosystem sustainability. HCA proved effective in identifying critical zones and prioritizing management interventions. The results highlight the urgent need for continuous monitoring, reduced use of nitrogen fertilizers, improved wastewater management, and adoption of modern irrigation technologies in vulnerable areas. Integrating GIS-based spatial mapping with temporal monitoring provides a comprehensive and transferable framework for groundwater management that can also be applied to other aquifers. To ensure long-term sustainability, regular monitoring programs, stricter regulation of illegal withdrawals, better agricultural input management, development of wastewater treatment facilities, and the application of predictive models are recommended. When combined with community participation and stronger policy enforcement, these measures can safeguard the Hamedan–Bahar aquifer and serve as a model for sustainable groundwater management in similar regions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

پذیرش شد