

Article Type

Case Study

مطالعه موردی

نوع مقاله

Zoning of Denitrification with Emphasis on Hydrochemistry in the Urban Aquifer of Izeh, Northeast Khuzestan

A. Mehrabinejad¹, N. Kalantari^{2*}, F. Alijani³, H. Mohammadi¹

1, 2- Ph.D. Candidate and Professor in Hydrogeology, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3-Assistant Professor in Hydrogeology, Department of Mineral and Ground Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Corresponding Author Email: n.kalantari@scu.ac.ir

Received 28-01-2025
Revised 17-04-2025
Accepted 21-04-2025
Available Online 21-06-2025

Abstract

The drinking water of Izeh city in northeastern Khuzestan province is supplied from limestone wells in the Nal-e-asbi Karst aquifer south of the plain, which is in direct hydrogeological communication with the alluvial aquifer. Due to nitrate pollution infiltration from the alluvial aquifer to the Karst aquifer, determining the nitrate status in the aquifer and the effect of the natural denitrification process on reducing nitrate concentration is very important. In this research, temporal changes in nitrate, ammonium, and nitrite, and spatial changes in nitrate in the urban aquifer of Izeh were investigated to determine the denitrification mechanism. Over a one-year period (December 2023 - November 2024), samples were taken from 9 wells over 6 periods. Then, nitrate isoconcentration maps were prepared, and along with temporal changes of nitrogenous species, the nitrate chemograph was interpreted. Finally, spatial zoning of denitrification and the relationship between denitrification and other hydrogeochemical parameters was analyzed using composite diagrams. The results showed that with the leaching of pollutants from the surface and chemical fertilizers applied to agricultural lands, which are mainly applied in January and February in the Izeh region, the nitrate concentration in the urban aquifer of Izeh had a sharp increasing trend from December 2023 to April 2024, but decreased throughout the aquifer from April to June 2024. Groundwater in the north of Izeh city and adjacent to Miangaran wetland, due to severe contamination with Izeh city sewage, is under reducing and severe denitrification conditions and has the lowest nitrate concentration among the water wells. Based on the denitrification zoning map, the highest and lowest constant rate of denitrification are related to the northeast and southwest of Izeh city, respectively.

Keywords: Nitrate, Pollution, Denitrification, Urban Aquifer, Izeh.

پهنه‌بندی نیترات‌زدایی با تاکید بر هیدروشیمی در آبخوان شهری ایزه، شمال شرق خوزستان

علی محرابی‌نژاد^۱، نصراله کلانتری^{۲*}، فرشاد علی‌جانی^۳، هادی محمدی^۱

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی و استاد هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۳- استادیار هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: n.kalantari@scu.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۱/۰۹
تاریخ بازنگری ۱۴۰۳/۰۱/۲۸
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۲/۰۱
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

چکیده

آب شرب شهر ایزه در شمال شرق خوزستان، از چاه‌های آهکی در آبخوان کارستی نعل اسبی جنوب دشت که در ارتباط هیدروژئولوژیکی مستقیم با آبخوان آبرفتی است، تأمین می‌شود. به دلیل نفوذ آلودگی نیترات از آبخوان آبرفتی به آبخوان کارستی، تعیین وضعیت نیترات در آبخوان و تأثیر فرایند نیترات‌زدایی طبیعی بر روی کاهش غلظت نیترات در آن بسیار اهمیت دارد. در این پژوهش تغییرات زمانی نیترات، آمونیوم و نیتريت و تغییرات مکانی نیترات در آبخوان شهری ایزه برای تعیین سازوکار نیترات‌زدایی بررسی شد. در یک دوره یکساله (آذر ۱۴۰۲-آبان ۱۴۰۳) از ۹ حلقه چاه در ۶ دوره، نمونه‌برداری صورت گرفت. سپس نقشه‌های هم غلظت نیترات تهیه و همراه با تغییرات زمانی گونه‌های نیتروژن‌دار، کموگراف نیترات تفسیر شده و در نهایت پهنه‌بندی مکانی نیترات‌زدایی و ارتباط نیترات‌زدایی با سایر پارامترهای هیدروژئوشیمی با استفاده از نمودارهای ترکیبی تحلیل شدند. نتایج نشان داد با فروشویی آلاینده‌ها از سطح و کودهای شیمیایی اعمالی به زمین‌های زراعی که عمدتاً در دی و بهمن ماه در منطقه ایزه انجام می‌شود، غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزه از آذر ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ روند افزایشی شدید داشته، ولی از فروردین تا خرداد ۱۴۰۳ کل آبخوان کاهش یافته است. آب زیرزمینی در شمال شهر ایزه و در مجاورت تالاب میانگران، به دلیل آلودگی شدید با فاضلاب شهر ایزه، تحت شرایط احیایی و نیترات‌زدایی شدید قرار دارند و حداقل غلظت نیترات را در بین چاه‌های آب معرف دارند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی نیترات‌زدایی، بیشترین و کمترین مقدار ثابت نرخ نیترات‌زدایی به ترتیب مربوط به شمال شرق و جنوب غرب شهر ایزه می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** نیترات، آلودگی، نیترات‌زدایی، آبخوان شهری، ایزه.

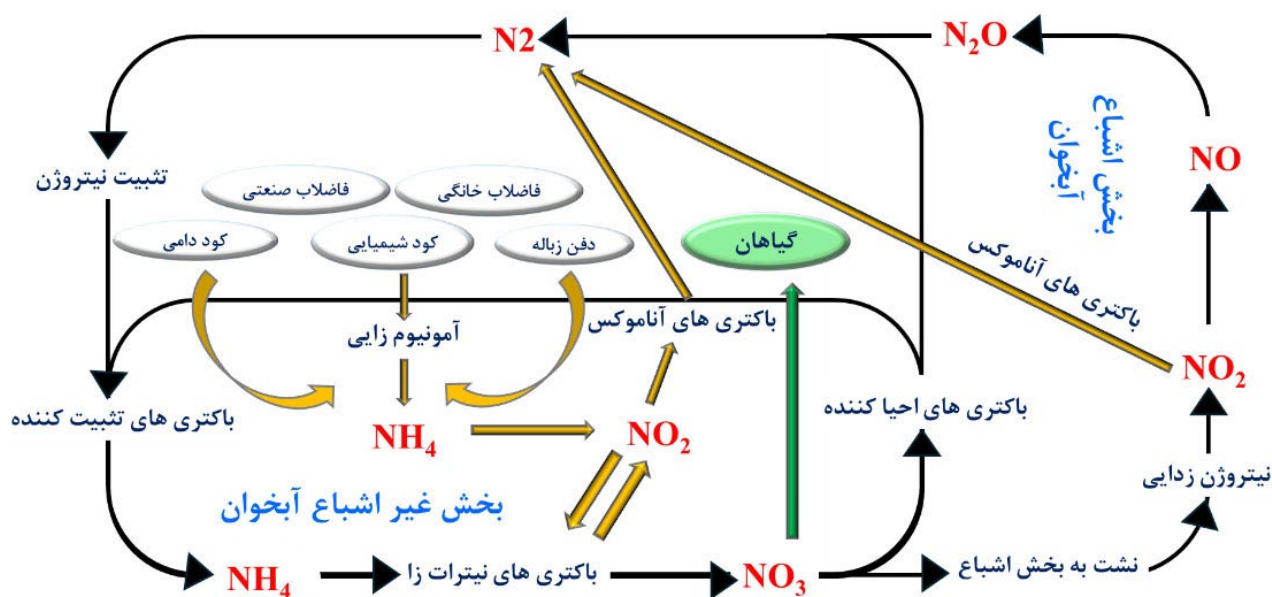
HomePage: <https://jwsd.um.ac.ir>

How to cite this article: Mehrabinejad, A., Kalantari, N., Alijani, F., & Mohammadi, H. (2025). Zoning of Denitrification with Emphasis on Hydrochemistry in the Urban Aquifer of Izeh, Northeast Khuzestan. Journal of Water and Sustainable Development, 12(1), 46-63. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i1.2401-1401>

نیتрат در نقاط مختلف ایران و جهان انجام شده است ولی در این میان کمتر به بحث نیترات‌زدایی، عوامل موثر بر آن و نرخ نیترات‌زدایی پرداخته شده است. نیترات‌زدایی یک فرآیند بیوشیمیایی است که منجر به کاهش نیترات و نیتريت به نیتروژن مولکولی یا اکسید نیتروس^۳ می‌شود. این فرآیند به‌طور طبیعی در آب‌های زیرزمینی و در شرایط بدون اکسیژن^۴ رخ می‌دهد و از فعالیت میکروارگانیسم‌های خاصی نظیر باکتری‌ها ناشی می‌شود. محصول نهایی این فرآیند گاز نیتروژن است که به جو آزاد می‌شود. نرخ نیترات‌زدایی^۵ تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌باشد و ممکن است بین چند روز تا چند سال متغیر باشد. این نرخ به pH، درجه حرارت، غلظت مواد آلی، حضور اکسیژن و غلظت نیترات وابسته است. دامنه pH مناسب برای فعالیت باکتری‌های نیترات‌زدا^۶ معمولاً بین ۶ تا ۸ است. pH‌های پایین یا بالا می‌توانند فعالیت این باکتری‌ها را مختل کنند. دما نیز بر فعالیت میکروبی تأثیر دارد. دماهای معتدل (بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) بهترین شرایط را برای نیترات‌زدایی فراهم می‌آورند. میکروارگانیسم‌ها به منبع کربن مانند قندها یا ترکیبات آلی نیاز دارند تا بتوانند نیترات را به نیتروژن تبدیل کنند. غنی‌سازی آبخوان‌ها با مواد آلی می‌تواند به افزایش نرخ نیترات‌زدایی کمک کند. شرایط آنوکسیک برای انجام فرآیند نیترات‌زدایی ضروری است. هرگونه حضور اکسیژن ریسک کاهش فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد در برخی شرایط، نرخ نیترات‌زدایی ممکن است به‌صورت معکوس با غلظت نیترات رابطه داشته

به منظور حصول اطمینان از کیفیت بالای آب‌های زیرزمینی برای مصرف شرب، باید مطالعات شناخت رفتار آلاینده‌ها در آبخوان انجام شود (Lapworth و همکاران، ۲۰۲۲). نیترات به‌عنوان آلاینده متداول آب زیرزمینی از فعالیت‌های انسانی و شهری منشأ می‌گیرد. غلظت بیش از حد مجاز نیترات در آب شرب می‌تواند باعث سرطان معده و فشار خون در بزرگسالان و متهموگلوبینمیا (سندروم کودک آبی) و اختلال تیروئید در نوزادان و کودکان شود. سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO، ۲۰۱۷) غلظت مجاز یون نیترات در آب آشامیدنی را ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بر حسب نیترات و یا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بر حسب نیتروژن تعیین کرده است.

نیترات جزء ترکیبات معدنی نیتروژن است و آخرین مرحله اکسیداسیون آمونیاک و نیتروژن حاصل از مواد آلی به شمار می‌رود که ممکن است هنگام عبور آب از زمین طبیعی و یا از منشأ انسانی از طریق نفوذ فاضلاب شهری، فروشویی کودهای آلی و شیمیایی، دامداری‌ها، و زباله دانی‌ها وارد منابع آب زیرزمینی شود. نیترات‌زدایی^۲ فرآیندی از چرخه نیتروژن (شکل ۱) است که در آن نیترات موجود در آب زیرزمینی در اثر شرایط احیایی به گاز نیتروژن تبدیل می‌شود. این فرآیند به‌عنوان یک مرحله کلیدی در چرخه نیتروژن شناخته می‌شود و در مدیریت کیفیت آب‌های زیرزمینی به ویژه در آبخوان‌های شهری بسیار اهمیت دارد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی به



شکل ۱- چرخه نیتروژن و فرایند نیترات‌زدایی در آبخوان

باشد. به عبارت دیگر، با افزایش غلظت نیترات، نرخ تبدیل آن به نیتروژن ممکن است کاهش یابد. در شرایط احیایی، باکتری‌های دنیتریفیکان می‌توانند به طور موثری نیترات را در نزدیکی سطح آب زیرزمینی و حتی در نواحی با غلظت بالای آلودگی تجزیه کنند. این فرآیند به حفظ کیفیت آب‌های زیرزمینی و همچنین به تجزیه ترکیبات آلاینده کمک می‌کند. آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت ایزه به نیترات از حدود ۲۰ سال پیش گزارش شده است (Nassery و همکاران، ۲۰۰۹)؛ به طوری که باتوجه به تأمین آب شرب شهر ایزه از آبخوان کارستی مجاور دشت و ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌های آبرفتی و کارستی اهمیت بررسی توزیع و پراکندگی نیترات در آبخوان و عوامل و سازوکارهای موثر بر آن بیش از پیش افزایش می‌یابد. از آنجا که تاکنون تعیین نرخ نیترات‌زدایی و عوامل موثر بر آن، در آبخوان شهری ایزه بررسی نشده است، پرداختن به این موضوع به علت تنش شدید آلودگی از فاضلاب و کودهای شیمیایی در این آبخوان، ضرورت زیادی دارد. در آبخوان شهری دشت ایزه، عمق کم آب زیرزمینی، وجود رسوبات ریزدانه، و نفوذ مستقیم فاضلاب شهری به آبخوان شرایط مناسبی برای تشدید فرآیند نیترات‌زدایی ایجاد کرده است. بر این اساس در این پژوهش تلاش شده است تا با بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت نیترات، آمونیوم، و نیتريت در این آبخوان، عوامل موثر هیدروژئوشیمی بر رخداد نیترات‌زدایی با نمودارهای ترکیبی تعیین و پهنه‌بندی نرخ نیترات‌زدایی انجام شود.

پیشینه پژوهش

طی دو دهه اخیر در دنیا، نیترات به یک آلاینده رایج در آبخوان‌ها و یک معضل اساسی در رابطه با آب‌های زیرزمینی تبدیل شده که توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است (Qian و همکاران، ۲۰۱۴؛ He و همکاران، ۲۰۱۶؛ Li و همکاران، ۲۰۱۹؛ Chander و همکاران، ۲۰۲۳؛ Mahlknecht و همکاران، ۲۰۲۳؛ Aleku و همکاران، ۲۰۲۴؛ Murphy و همکاران، ۲۰۲۴). Abascal و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه جهانی با بررسی ۲۹۲ منطقه در سراسر جهان، بیان نمودند که در بیش از ۲۰ درصد مناطق، آب‌های زیرزمینی دارای غلظت‌های نیترات میانگین بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر هستند، که برخی از این کشورها از جمله اسپانیا، مالت، کنگو، و فلسطین غلظت‌های بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز گزارش شده است. توزیع آبخوان‌های آلوده به نیترات در دنیا به ترتیب آفریقا، آسیا، اروپا، و آمریکا است. فرآیند نیترات‌زدایی، اهمیت آن در آبخوان‌ها، عوامل مؤثر بر

آن، نرخ و سرعت انجام این فرآیند، شرایط احیایی و تأثیرات آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی، توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است (Bailey و همکاران، ۲۰۱۲؛ Green و همکاران، ۲۰۱۶؛ Hinkle و Tesoriero، ۲۰۱۴؛ Li و همکاران، ۲۰۱۶؛ Jahangir و همکاران، ۲۰۱۷؛ Hinshaw و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ke و همکاران، ۲۰۲۱؛ Chakraborty و همکاران، ۲۰۲۲؛ Benekos و همکاران، ۲۰۲۳؛ Ortega-Martinez و همکاران، ۲۰۲۴؛ Pan و همکاران، ۲۰۲۴). در ایران Mohseni Bandpi و Elliott (۱۹۹۸)، Mirbagheri و همکاران (۲۰۱۴) و Sotoodehnia و همکاران (۲۰۲۴) پژوهش‌هایی بر روی نیترات‌زدایی انجام دادند.

آلودگی نیترات در آبخوان‌های شهری به ویژه در نواحی با تراکم بالای جمعیت در نتیجه استفاده از کودهای شیمیایی، فاضلاب‌های خانگی و زباله‌دانی‌ها به وقوع می‌پیوندد. در ایران پژوهش‌های مختلفی بر روی نیترات در آب‌های زیرزمینی انجام شده است (Amiri و همکاران، ۲۰۱۵؛ Nejatijahromi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zendeabad و همکاران، ۲۰۱۹؛ Amiri و همکاران، ۲۰۲۳؛ Zaryab و همکاران، ۲۰۲۴). نیترات‌زدایی، به عنوان یک فرآیند بیوشیمیایی مهم، تأثیر به‌سزایی در کنترل آلودگی نیترات و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی دارد. با شناخت بهتر از عوامل مؤثر بر این فرآیند و توسعه روش‌های مدیریتی مناسب می‌توان به‌طور مؤثری مشکلات ناشی از آلودگی نیترات را کاهش داد.

روش‌شناسی پژوهش

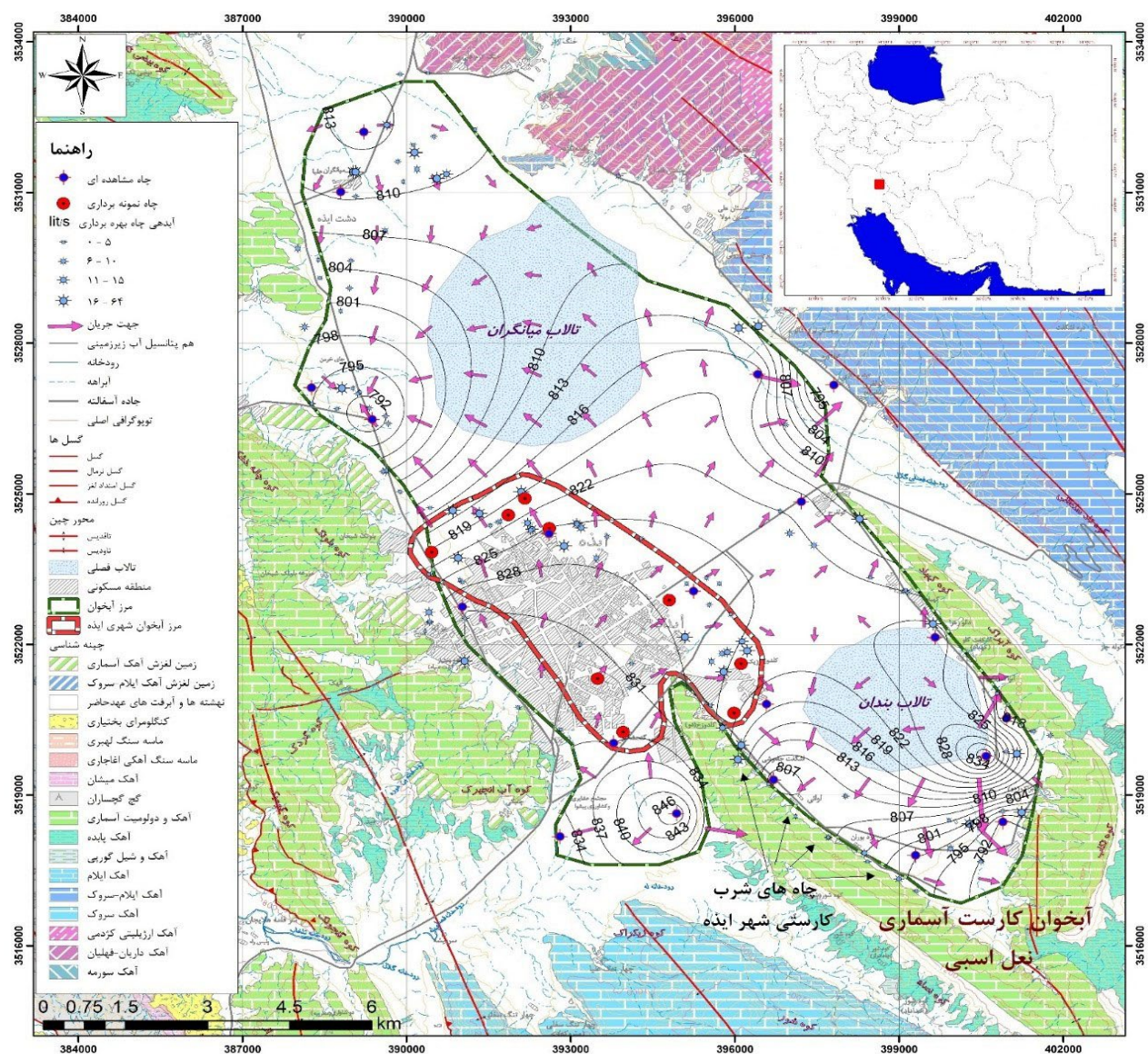
زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، آبخوان ایزه در شمال شرق استان خوزستان می‌باشند. آبخوان ایزه با مساحت ۱۱۰ کیلومترمربع، بین طول جغرافیایی ۴۹° ۵۰' تا ۴۹° ۵۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۴۷' تا ۳۱° ۵۲' شمالی واقع است. اقلیم منطقه ایزه معتدل و نیمه مرطوب می‌باشد. میانگین بارش ایزه در دوره آماری ۴۰ ساله از سال آبی ۱۳۶۳-۱۳۶۲ تا سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ برابر ۵۹۹ میلی‌متر می‌باشد. حدود ۵۰ درصد بارش در فصل زمستان، ۳۱/۷ درصد در پاییز، ۱۷/۸ درصد در بهار و کمتر از یک درصد در تابستان رخ می‌دهد. دشت ایزه دارای دو تالاب میانگران در شمال و بندان در جنوب شرق دشت می‌باشد که به دلیل رخداد خشکسالی مداوم و برداشت شدید از آبخوان‌های آبرفتی و آهکی مجاور، تالاب بندان خشک شده و تالاب میانگران نیز فقط در سال‌های پرآب و فصول مرطوب دارای آب می‌باشد. ارتفاع از سطح دریا

در دشت ایزده از حدود ۸۱۵ متر در دریاچه میانگران در شمال دشت، تا ۱۹۰۰ متر در ارتفاعات شرق دشت متغیر است. ارتفاع آبخوان شهری ایزده که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است از ۸۸۰ متر در جنوب غرب شهر تا ۸۲۵ متر در شمال شهر و مجاورت تالاب میانگران متغیر است.

منطقه مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی در ناحیه زاگرس چین‌خورده یا زاگرس خارجی قرار می‌گیرد. دشت ایزده یک پولیه کارستی می‌باشد و عوارض و پدیده‌های ژئومورفولوژیک کارست در آن گسترش قابل ملاحظه‌ای دارند. دشت مذکور در داخل ناودیس بسته‌ای با محور شمال‌غربی-جنوب‌شرقی قرار دارد. دماغه جنوب شرقی ناودیس به صورت نعل اسبی است که تالاب بندان را محصور کرده است. سازندهای زمین‌شناسی

که در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند مربوط به کرتاسه زیرین تا عهد حاضر می‌باشند (شکل ۲). آهک‌های ضخیم لایه خاکستری رنگ سازند داریان - فهلپان قدیمی‌ترین سنگ‌های بیرون زده در منطقه هستند که بر روی آن سازند شیلی کژدمی، سازندهای آهکی ایلام-سروک، سازند شیلی گورپی، سازند مارنی پابده، سازند آهکی آسماری، سازند گچساران، کنگلومرای توکک، و آبرفت‌های عهد حاضر به ترتیب قدمت قرار گرفته‌اند. رسوبات آبرفتی دشت ایزده بر اساس لوگ چاه‌ها، پیزومترها، و نتایج عملیات ژئوفیزیکی در حاشیه دشت عمدتاً شامل رسوبات درشت دانه خرده سنگی و کمی رسوبات ریزدانه ریز می‌باشد که سریعاً به سمت تالاب‌ها و بخش‌های میانی دشت به رس و سیلت تغییر می‌نماید. عمق رسوبات



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری دشت ایزده

آبرفتی از ۳۰ متر در حاشیه دشت تا بیش از ۱۵۰ متر در شمال دشت متغیر است.

نقشه هم تراز آب زیرزمینی دشت ایزه در تیر ماه ۱۴۰۳ در شکل (۲) نشان داده شده است. به طور کلی جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایزه با توجه به ماهیت دشت، وجود سازندهای آهکی در اطراف دشت، و بهره‌برداری زیاد از آبخوان کارستی سازند آسماری در ناودیس نعل اسبی بسیار پیچیده است. تراز آب زیرزمینی از حدود ۸۴۹ متر در مناطق تغذیه‌ای حواشی جنوبی و غربی دشت تا کمتر از ۷۸۵ متر در منطقه تخلیه‌ای شرقی دشت تغییر می‌نماید. جهت عمومی جریان از جنوب شهر ایزه به سمت تالاب میانگران در شمال و غرب دشت است. در جنوب شرق دشت جریان آب زیرزمینی که در دهه ۷۰ از آهک آسماری به سمت تالاب بندان بوده است، اما در حال حاضر به دلیل برداشت از ۱۰ حلقه چاه آب آهکی جهت تأمین آب شرب شهر ایزه محفوره در ناودیس نعل اسبی معکوس شده و جریان از تالاب به سمت آبخوان آهکی آسماری عوض شده است.

جمع‌آوری داده

به منظور بررسی توزیع غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزه و هیدروژئوشیمی فرآیند نیترات‌زدایی از ۹ حلقه چاه آب در طی شش دوره دوماهه از آذر ماه ۱۴۰۲ تا آبان ماه ۱۴۰۳ نمونه‌برداری صورت گرفته است. چاه‌های نمونه‌برداری با توجه به توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری در اطراف ناحیه شهری ایزه، به نحوی انتخاب شدند (شکل ۲) که نشان دهنده ترکیب هیدروشیمی آب تغذیه‌ای ورودی به زیر شهر ایزه (چاه‌های W۱ و W۶)، در زیر آبخوان شهری (چاه W۲)، خروجی از زیر شهر به سمت تالاب بندان (نمونه W۴)، آب خروجی از زیر تالاب به آبخوان کارستی آسماری نعل اسبی (نمونه W۳)، و آب خروجی از زیر شهر به تالاب میانگران (نمونه‌های W۷ تا W۹) باشند. سنجش نمونه‌های آب از طریق سنجش‌های صحرائی (اندازه‌گیری پارامترهای دما، هدایت الکتریکی و pH)، نیترات، نیتريت، آمونیوم، کلراید، سولفات، BOD و COD در آزمایشگاه البرزآما انجام شده است (جدول ۱).

روش‌شناسی

مطالعه حاضر در ۷ مرحله و بر مبنای شکل (۳) تهیه شده است. در مرحله اول مطالعات تمام اطلاعات زمین شناسی، هیدروژئولوژی و کاربری اراضی و مطالعات ارزشمند و معتبر پیشین از محدوده آبخوان شهری ایزه جمع‌آوری شده و بر

اساس آمار و نقشه‌های موجود مناسب ترین چاه‌ها از نظر موقعیت، نوع کاربری، تمرکز چاه‌های اطراف و غیره برای نمونه‌برداری انتخاب شدند. نمونه‌برداری در ۶ دوره با فواصل دو تا سه ماهه از آذر ۱۴۰۲ تا آبان ۱۴۰۳ انجام شد. همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، علاوه بر اندازه‌گیری صحرائی پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی، نیترات، نیتريت، آمونیوم، کلراید، سولفات، BOD و COD به‌طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند. به منظور بررسی تغییرات نیترات به عنوان یون هدف در این مطالعه، نقشه‌های هم غلظت نیترات در ۴ بازه زمانی مهم، شامل ماه ابتدای دور (آذر ۱۴۰۲)، ماه حداکثر غلظت (فروردین ۱۴۰۳)، ماه حداقل غلظت (خرداد ۱۴۰۳)، و ماه انتهای دوره (آبان ۱۴۰۳) تهیه و تفسیر شد. بر اساس میزان بارش در بازه زمانی آذر ۱۴۰۲ تا آبان ۱۴۰۳، فروردین ماه به عنوان شاخص فصل مرطوب و آبان ۱۴۰۳ به عنوان معرف فصل خشک انتخاب شد. پس از بررسی تغییرات مکانی نیترات، نمودار تغییرات زمانی آن برای چاه‌های نمونه‌برداری شده و کموگراف معرف نیترات برای کل آبخوان شهری تهیه و تفسیر شد.

پس از بررسی‌های زمانی و مکانی نیترات، نمودارهای ترکیبی هدایت الکتریکی، کلراید، سولفات و BOD+COD با نیترات به منظور تعیین ارتباط پارامترهای مختلف هیدروژئوشیمی با غلظت گونه‌های نیترات تهیه و تحلیل شده است. همچنین باتوجه به لزوم بررسی توزیع نیترات در آب‌های زیرزمینی، باید پژوهشگر شناخت دقیقی نسبت به فرایندهای شیمیایی حاکم بر تبدیلات نیتروژن وجود داشته باشد که به این منظور نمودارهای ترکیبی غلظت نیترات، نیتريت، آمونیوم به طور جداگانه با BOD و COD بررسی شد تا عوامل هیدروژئوشیمی موثر بر نیترات‌زدایی تحلیل شود.

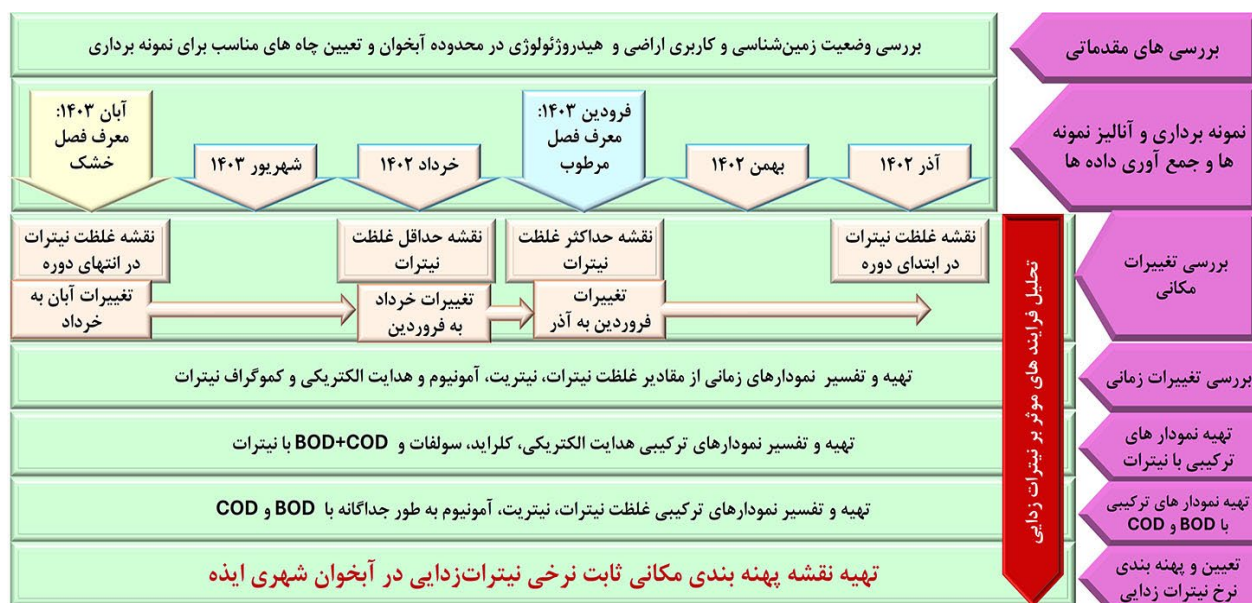
در نهایت با تجمیع نتایج حاصل از بررسی و تحلیل نقشه‌های تهیه شده، سری‌های زمانی تغییرات نیترات و کموگراف‌ها و نمودارهای ترکیبی، نقشه پهنه بندی مکانی ثابت نرخی نیترات‌زدایی در آبخوان شهری ایزه ارائه شد.

یافته‌های پژوهش

بر اساس خلاصه آماری نتایج سنجش‌های هیدروشیمی آبخوان شهری ایزه در ۶ دوره نمونه‌برداری (جدول ۲)، حداکثر و حداقل غلظت هدایت الکتریکی به ترتیب برابر ۱۶۸۵ و ۴۳۰ با میانگین ۱۰۱۱ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. میانگین غلظت کلراید و سولفات نمونه‌ها برابر ۱۱۲ و ۸۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. حداکثر و حداقل مقادیر نیتريت در نمونه‌های آب برابر ۱/۹۵ و ۰/۱۲ میلی‌گرم بر لیتر با میانگین ۰/۴۶۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

جدول ۱- نتایج سنجش هیدروشیمی کلراید، سولفات، گونه‌های نیتروژن دار و نیاز اکسیژن شیمیایی و بیوشیمیایی (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) نمونه‌های آب آبخوان شهری ایزه در بهمن ۱۴۰۲ و شهریور ۱۴۰۳

ID	Date	T(°C)	EC (μmohs/cm)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NH4 (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)
w1	بهمن ۱۴۰۲	۱۸٫۱	۷۵۹	۳۹٫۱	۸۶٫۴	۷۶٫۲	۰٫۴۴۱	۰٫۰۱۲	۴٫۵	۳٫۱
w2	بهمن ۱۴۰۲	۲۲	۱۲۹۵	۹۴٫۱	۱۱۵٫۲	۱۴۷٫۳	۰٫۱۸۵	۰٫۱۰۴	۴٫۶	۱٫۳
w3	بهمن ۱۴۰۲	۲۲٫۲	۱۳۴۹	۱۹۶٫۷	۱۰۰٫۸	۱۱۸٫۳	۰٫۲۴۵	۰٫۰۳۰	۴٫۵	۱٫۵
w4	بهمن ۱۴۰۲	۲۲٫۱	۱۲۴۵	۲۸۰٫۵	۱۶۳٫۲	۷۵٫۹	۱٫۱۳۰	۰٫۰۱۶	۵٫۲	۵٫۹
w5	بهمن ۱۴۰۲	۲۲	۱۰۶۳	۶۵	۷۶٫۸	۵۵٫۳	۰٫۲۵۹	۰٫۰۲۶	۴٫۵	۲٫۸
w6	بهمن ۱۴۰۲	۲۰٫۹	۶۰۷	۳۰٫۸	۲۸٫۸	۳۳٫۱	۰٫۳۵۶	۰٫۰۷۴	۴٫۴	۳٫۹
w7	بهمن ۱۴۰۲	۱۶٫۶	۱۵۸۲	۱۱۹٫۶	۶٫۷	۵۶٫۷	۰٫۵۱۲	۰٫۲۵۴	۱۸	۳۸٫۵
w8	بهمن ۱۴۰۲	۲۱٫۵	۱۲۴۰	۶۳٫۲	۶۲	۳۶	۰٫۲۴۱	۰٫۱۶۲	۴٫۵	۲۲٫۱
w9	بهمن ۱۴۰۲	۲۰٫۷	۱۳۶۵	۱۳۱٫۴	۶۷٫۲	۲٫۶	۰٫۹۵۹	۰٫۰۷۲	۶٫۸	۲۸٫۱
w1	شهریور ۱۴۰۳	۲۵٫۵	۵۲۲	۱۵٫۲	۶۴٫۳	۲۷٫۵	۰٫۱۴۵	۰٫۰۱۴	۳٫۶	۲٫۶
w2	شهریور ۱۴۰۳	۲۶٫۷	۸۴۹	۶۲٫۵	۹۶	۷۷٫۲	۱٫۳۵۰	۰٫۲۱۰	۳٫۷	۵٫۱
w3	شهریور ۱۴۰۳	۲۴٫۹	۱۰۹۶	۱۸۵٫۷	۱۰۰٫۸	۸۱٫۶	۰٫۱۹۵	۰٫۰۸۴	۳٫۷	۳٫۶
w4	شهریور ۱۴۰۳	۲۵	۱۵۱۷	۵۰۸٫۷	۲۳۵٫۲	۳۰٫۱	۱٫۰۱۶	۰٫۰۴۴	۲۲	۱۸٫۴
w5	شهریور ۱۴۰۳	۳۰٫۴	۹۴۶	۵۸٫۹	۱۰۵٫۶	۳۸٫۸	۱٫۲۲۳	۰٫۰۲۴	۳٫۷	۴٫۶
w6	شهریور ۱۴۰۳	۲۶٫۹	۴۴۸	۲۵٫۳	۳۳٫۶	۲۶	۰٫۱۴۲	۰٫۱۱۴	۴٫۱	۵٫۱
w7	شهریور ۱۴۰۳	۳۰٫۴	۱۱۲۱	۷۹٫۲	۱۰۰٫۸	۱۸٫۶	۰٫۰۱۲	۰٫۳۵۶	۸٫۷	۲۵٫۱
w8	شهریور ۱۴۰۳	۲۳٫۶	۷۳۷	۵۸٫۹	۹٫۶	۳۰٫۱	۰٫۰۳۵	۰٫۱۶۶	۷٫۲	۲۶٫۲
w9	شهریور ۱۴۰۳	۲۸٫۲	۹۳۱	۱۲۷٫۸	۷۲	۳٫۶	۰٫۰۳۹	۰٫۴۲۸	۸٫۱	۱۹٫۶



شکل ۳- نمودار روش تحقیق

جدول ۲- خلاصه آماری داده‌های هیدروشیمی آبخوان شهری ایزه در شش دوره نمونه‌برداری در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲

پارامتر آماری	T (°C)	EC (μmohs/cm)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NH4 (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)
حداکثر	۳۰٫۴	۱۶۸۵	۵۰۸٫۷	۲۳۵٫۲	۲۰۶٫۷	۱٫۹۵	۰٫۵۷	۴۵٫۲	۴۶٫۲
حداقل	۱۶٫۶	۴۳۰	۱۳٫۷	۶٫۷	۲٫۱	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۲	۰٫۱	۰٫۵
میانگین	۲۳٫۲	۱۰۱۱	۱۱۱٫۵	۸۳٫۱	۵۳٫۳	۰٫۴۶۲	۰٫۱۱۵	۸	۱۲٫۴
انحراف معیار	۲٫۹	۳۱۸	۱۰۰٫۳	۴۷٫۷	۴۲٫۲	۰٫۴۴۵	۰٫۱۲۱	۷٫۳	۱۲٫۵

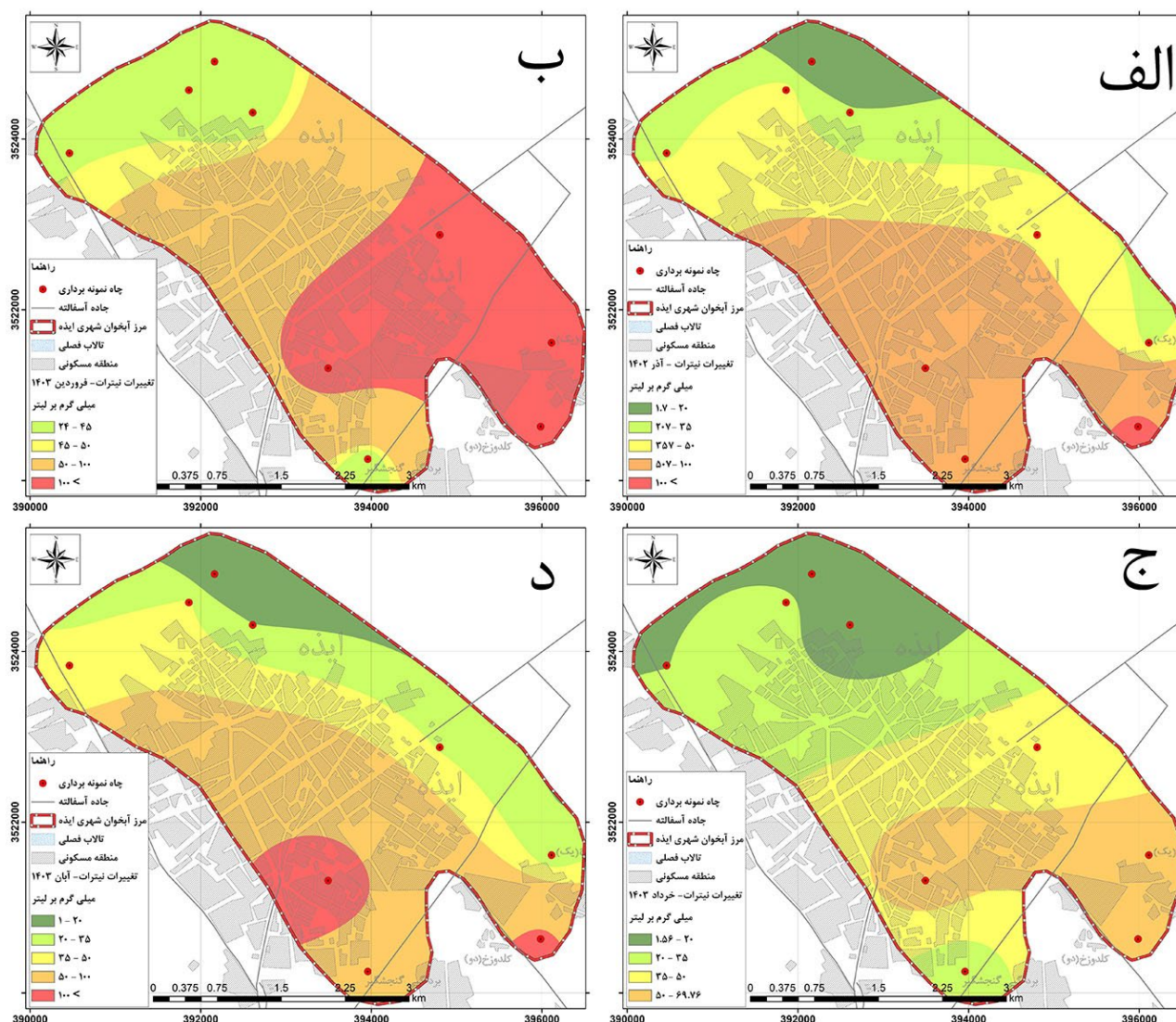
*** تعداد نمونه‌ها (n) برابر ۵۴ در ۶ دوره می‌باشد.

فروشویی نیترات به آبخوان همراه شده و در نتیجه غلظت نیترات افزایش شدیدی را در کوتاه مدت نشان می‌دهد. باین حال، نرخ شدید نیترات‌زدایی در شمال شهر باعث شده که غلظت نیترات در آب زیرزمینی به شدت آلوده به فاضلاب در اطراف چاه‌های W۷ تا W۹ به مقدار بیش از حد مجاز ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر نرسد. در خرداد ماه ۱۴۰۳ دامنه غلظت نیترات در آبخوان بین ۱ تا ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر با حداکثر غلظت در جنوب شرق و حداقل مقدار نیترات در شمال شهر رسیده است. در آبان ماه ۱۴۰۳ علاوه بر نمونه W۳، غلظت نیترات بالا در چاه W۲ در زیر شهر ایزه نیز به بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. نوار شرقی و شمالی آبخوان شهری ایزه مطابق انتظار به دلیل رخداد نیترات‌زدایی افزایش غلظت نیترات نشان نمی‌دهد. در آبان ماه ۱۴۰۳ غلظت نیترات بین ۱ تا ۱۲۲ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است که با ابتدای دوره مطالعاتی در آذر ماه ۱۴۰۲ شبیه می‌باشد.

نقشه‌های هم تغییرات نیترات غلظت نیترات بین دوره‌های مختلف نمونه‌برداری در شکل (۵-الف) تا (۵-ج) ارائه شده است. با فروشویی آلاینده‌ها از سطح و کودهای شیمیایی اعمالی به سطح زمین‌های زراعی که بیشتر در دی و بهمن ماه در منطقه ایزه انجام می‌شود، بر حسب انتظار غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزه از آذرماه ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ روند افزایشی شدید به خود گرفته است (شکل ۵-الف) باین حال، نمونه آب زیرزمینی W۱ کاهش غلظت نیترات تا ۳۴ میلی‌گرم بر لیتر را به دلیل اختلاط با آب زیرزمینی غیرآلوده تغذیه‌ای از مسیل جنوبی دشت ایزه نشان می‌دهد. در شمال و شرق دشت، غلظت نیترات در دوره ۴ ماهه افزایش شدیدی را نشان می‌دهد به‌طوری که در نمونه W۴ در نزدیکی تالاب بندان با عمق آب زیرزمینی کمتر از ۲ متر، غلظت نیترات آب زیرزمینی بیش از ۱۷۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته است. از فروردین

میانگین غلظت آمونیوم در کل دوره‌ها برابر ۰/۱۱۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. حداکثر، حداقل، و میانگین COD آب‌ها به ترتیب برابر ۴۵/۲، ۰/۱، و ۸ میلی‌گرم بر لیتر با انحراف استاندارد ۷/۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. هرچند حداکثر و حداقل غلظت BOD در نمونه‌های آب تقریباً مشابه COD و به ترتیب برابر ۴۶/۲ و ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد ولی میانگین غلظت BOD بیشتر و برابر ۱۲/۴ میلی‌گرم بر لیتر است. در ۶ دوره نمونه‌برداری حداکثر و حداقل غلظت نیترات به ترتیب مربوط به چاه W۴ در فروردین ماه ۱۴۰۳ برابر با ۲۰۶/۷ میلی‌گرم بر لیتر و چاه W۹ در خرداد ماه ۱۴۰۳ برابر ۲/۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. میانگین غلظت نیترات در کل دوره‌های نمونه‌برداری برابر ۵۳/۳ با انحراف استاندارد ۴۲/۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

به منظور بررسی تغییرات مکانی نیترات و تعیین مناطق تحت تنش آلودگی، در شکل (۴) نقشه‌های هم نیترات آبخوان شهری ایزه در ۴ دوره آذر ۱۴۰۲ (ابتدای دوره)، فروردین ۱۴۰۳ (حداکثر غلظت نیترات)، خرداد ۱۴۰۳ (حداقل غلظت نیترات)، و آبان ۱۴۰۳ (انتهای دوره) تهیه شد. در آذرماه ۱۴۰۲، غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزه از ۱۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در چاه W۳ در جنوب شرق تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر در چاه W۹ در شمال شهر کاهش می‌یابد. باوجود جهت جریان آب زیرزمینی به سمت شمال شهر، کاهش عمق آب زیرزمینی از ۲۰ متر در جنوب و غرب شهر به کمتر از ۵ متر در شمال و شرق شهر (شکل ۵-د) و نفوذ مستقیم فاضلاب شهری از طریق چاهک‌های جذبی، غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی در زیر شهر و شمال شهر به سمت تالاب میانگران کاهش می‌یابد. در فروردین ماه ۱۴۰۳ بیشترین غلظت نیترات مربوط به چاه W۴ در مجاورت تالاب بندان برابر ۲۰۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد و کمترین مقدار نیترات تا ۲۵ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته است. نفوذ آب تازه از بارش با افزایش شرایط اکسیدان در محیط آبخوان و

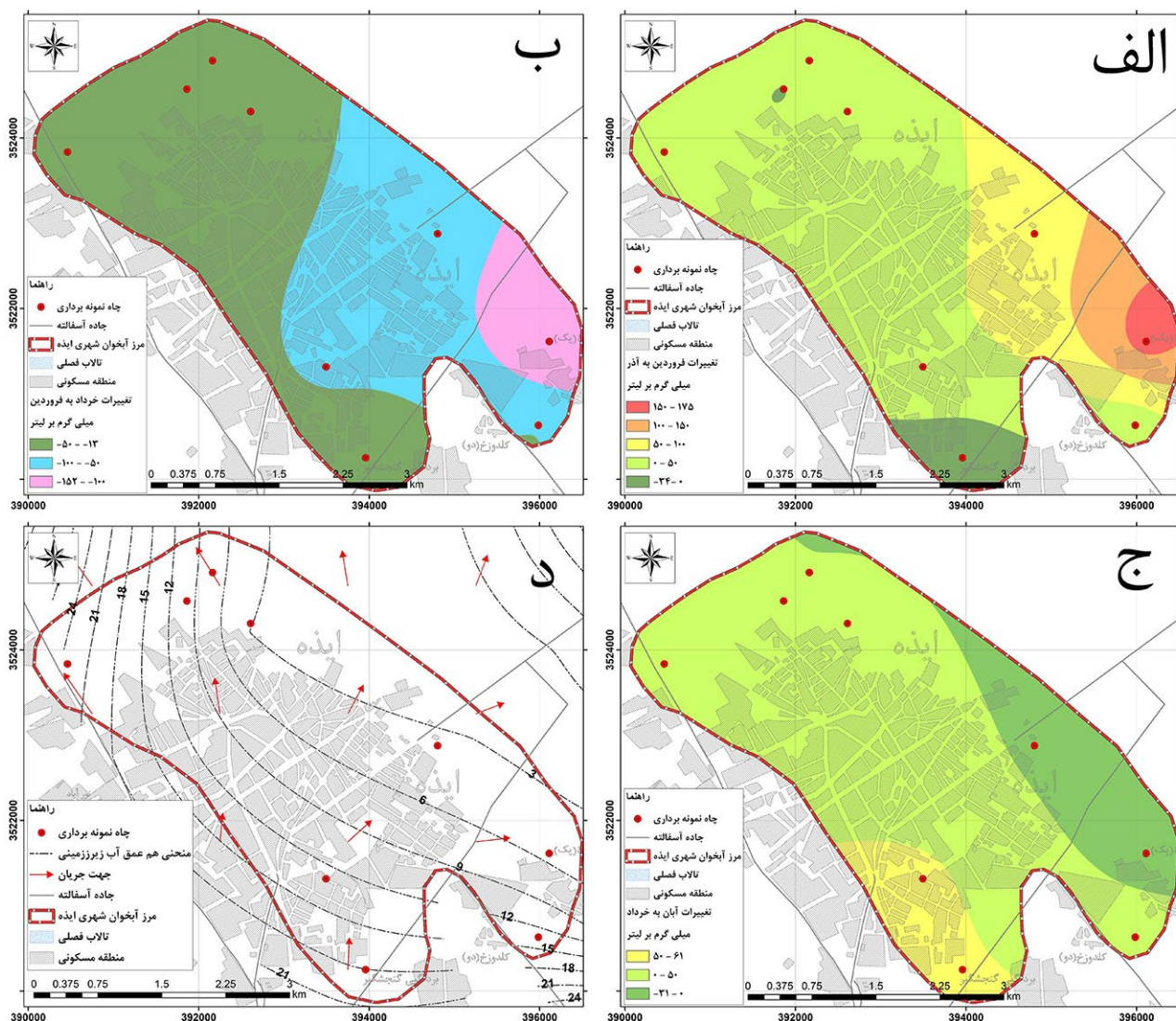


شکل ۴- (الف تا د) نقشه‌های هم نیترات آبخوان شهری ایزه در دوره‌های نمونه‌برداری مختلف

تا پایان دوره مورد مطالعه می‌باشد. نمونه‌های آب چاه‌های W۸ و W۹ که در شمال شهر ایزه و در مجاورت تالاب میانگران قرار دارند به دلیل آلودگی شدید با فاضلاب شهر ایزه، تحت شرایط احیایی و نیترات‌زدایی شدید قرار دارند و مقدار غلظت حداقل را در بین چاه‌های مورد مطالعه در آبخوان شهری ایزه را دارند. نمونه‌های W۲ و W۳ که در جنوب منطقه شهری ایزه قرار دارند، در طول سال، دارای غلظت نیترات بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند. در این میان نمونه W۴ تغییرات غلظت ناهنجار از ۷۵ میلی‌گرم در لیتر در بهمن ۱۴۰۲ تا ۲۰۷ میلی‌گرم بر لیتر در فروردین ماه ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد که بیانگر نفوذ شدید آلاینده‌ها از منشا فاضلاب شهر ایزه به این ناحیه در حاشیه جنوب شرقی شهر و در ادامه به سمت چاه W۳ و آبخوان کارستی سازند آسماری در ناودیس نعل اسبی می‌باشد.

تا خرداد ماه ۱۴۰۳ کاهش شدید نیترات به دلیل نرخ بالای نیترات‌زدایی در آبخوان شهر ایزه رخ داده است (شکل ۵-ب) و در کل منطقه مورد مطالعه کاهش غلظت نیترات از کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در لیتر در مناطق جنوبی، غربی، و شمالی تا بیش از ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در محل چاه W۴ رخ داده است. از خرداد ماه تا آبان ۱۴۰۳ (شکل ۵-ج) دامنه تغییرات غلظت نیترات از حدود ۳۰- میلی‌گرم در لیتر (وقوع نیترات‌زدایی) در شرق منطقه تا ۶۰+ میلی‌گرم در لیتر (نشت نیترات به آبخوان در جنوب شهر رخ می‌دهد).

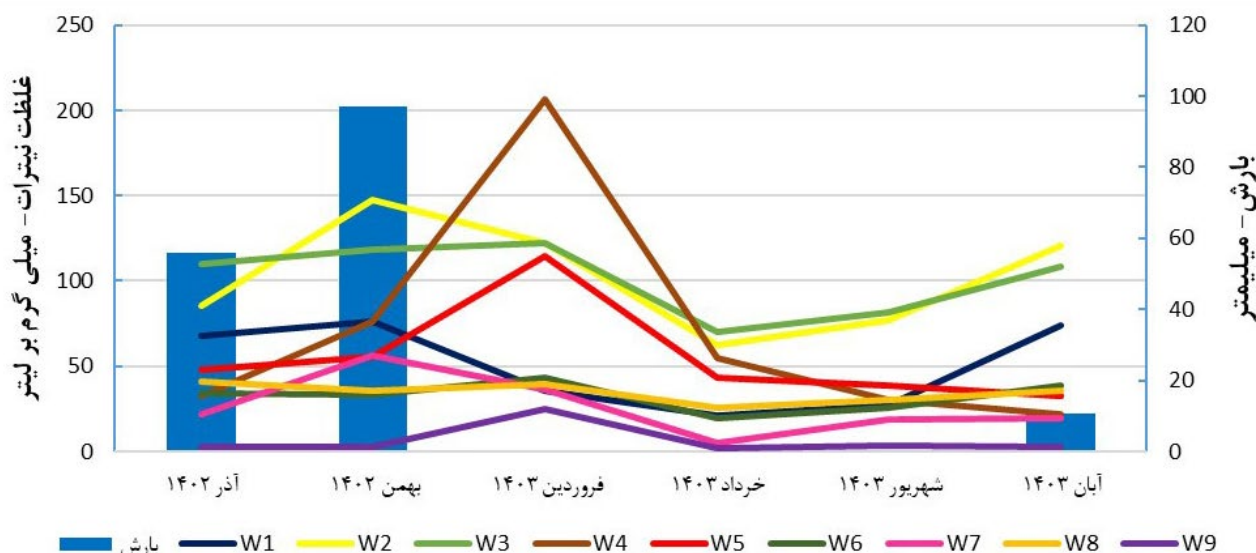
تغییرات زمانی غلظت نیترات چاه‌های آب در آبخوان شهری ایزه (شکل ۶) بیانگر روند افزایش غلظت نیترات آب زیرزمینی از آذر ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳، کاهش شدید غلظت نیترات از فروردین تا خرداد ۱۴۰۳، سپس افزایش مجدد تدریجی نیترات



شکل ۵- (الف تا ج) نقشه‌های هم تغییرات نیترات آبخوان شهری ایذه، (د) نقشه هم عمق آب زیرزمینی

عنوان کردند؛ باتوجه به گذشت حدود ۲۰ سال از مطالعات این پژوهشگران و معطوف شدن مطالعه حاضر بر بخش شهری آبخوان، ضمن تایید نظر آن‌ها، نفوذ از فاضلاب شهری و پس از آن فروشست کودهای شیمیایی به عنوان عامل اصلی افزایش نیترات در آبخوان شهری ایذه معرفی می‌شود. در بررسی همبستگی سری‌های زمانی، اصولاً اثر متغیر مستقل بر متغیر وابسته باید آنی و هم دوره باشد تا نتایج قابل استناد باشد. در محدوده مورد مطالعه، اثر بارش با تاخیر زمانی یک تا دو ماهه، با فروشویی آلاینده‌ها و افزایش شرایط اکسیدان، باعث افزایش غلظت نیترات در آبخوان شهری ایذه شده است. ضریب همبستگی مقادیر نیترات با بارش در چاه W۱ ۷۳ درصد، در چاه W۲ ۵۴ درصد، در چاه W۳ ۵۰ درصد، در چاه W۴ ۱۵ درصد، در چاه W۵ ۱۱ درصد، در چاه W۶ ۱۲ درصد،

بیشترین کاهش غلظت تحت تأثیر نیترات‌زدایی در چاه W۴ رخ می‌دهد که غلظت نیترات آن در طی دو ماه از ۲۰۷ میلی‌گرم بر لیتر در فروردین به ۵۵ میلی‌گرم در لیتر در خرداد ماه می‌رسد. نمونه آب چاه W۶ که در قسمت غربی دشت ایذه قرار دارد، حدود ۳۰ تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر (با مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب ۲۰ و ۴۴ میلی‌گرم بر لیتر) نوسان دارد که عدم تأثیر واضح رخداد نیترات‌زدایی را نشان می‌دهد. تغییرات زمانی و ناهنجاری‌های مکانی نیترات در این پژوهش با پژوهش ناصری و علیجانی (۱۳۸۶) مطابقت دارند. این پژوهشگران بیان کردند امکان جذب نیترات در بخش‌های ریزدانه آبخوان که به شدت آلوده به باکتری هستند وجود دارد. مطالعه حاضر این موضوع را در شمال آبخوان شهری ایذه تایید می‌کند. همچنین آن‌ها کودهای غیرآلی را عامل اصلی افزایش نیترات در آبخوان ایذه



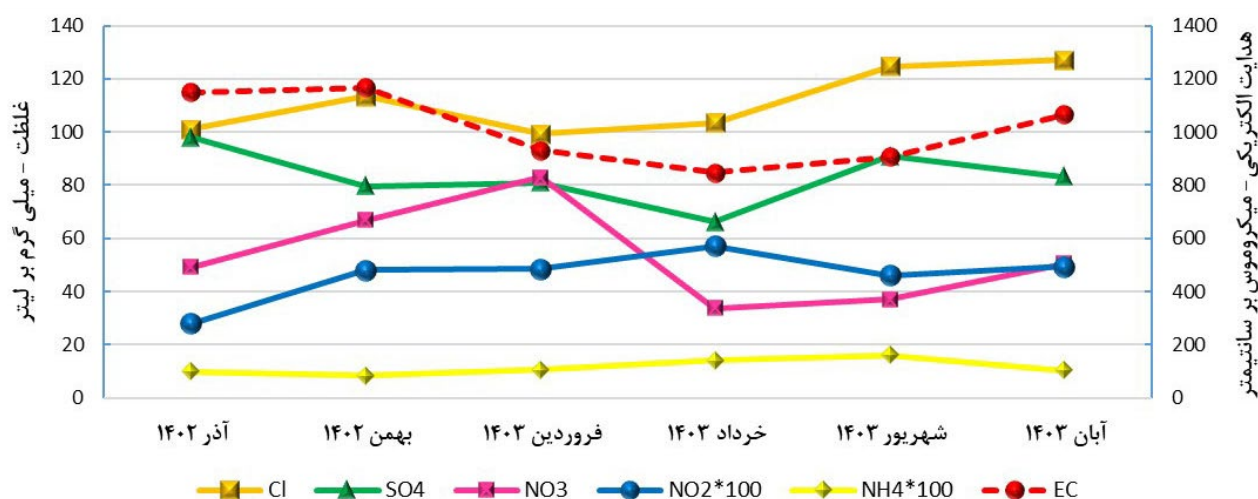
شکل ۶- نمودار تغییرات غلظت نیتрат چاه‌های نمونه‌برداری شده آبخوان شهری ایزه در دوره یک ساله ۱۴۰۲-۱۴۰۳

غلظت نیترات میانگین در آبخوان شهری ایزه از ۴۹ میلی‌گرم بر لیتر در آبان به ۶۷ میلی‌گرم در لیتر در بهمن ماه ۱۴۰۲ افزایش یافته است. این افزایش غلظت نیترات تا فروردین ادامه یافته و به میانگین ۸۳ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. نگاهی به وضعیت اقلیم و کاربری اراضی و الگوی کشت در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که دلیل افزایش غلظت نیترات در بازه آذر ۱۴۰۲- فروردین ۱۴۰۳، فروشویی آلاینده‌های فاضلاب شهری و کودهای شیمیایی (که معمولاً در منطقه ایزه در دی و بهمن ماه زمین‌های زراعی کوددهی نیترا ته می‌شوند) و افزایش شرایط اکسیدان با نفوذ آب‌های تازه از بارش می‌باشد. رخداد شدید نیترات‌زدایی از فروردین تا خرداد باعث کاهش غلظت میانگین نیترات تا ۳۴ میلی‌گرم بر لیتر شده است. غلظت میانگین نیترات در شهریور و آبان ماه ۱۴۰۳ به ۳۷ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده که معادل غلظت نیترات ابتدای دوره نمونه‌برداری در آذر ۱۴۰۲ می‌باشد.

غلظت نیتريت آب‌های زیرزمینی از ۰/۲۸ میلی‌گرم بر لیتر در آذر ۱۴۰۲ تا ۰/۴۹ میلی‌گرم بر لیتر و ۰/۵۷ میلی‌گرم بر لیتر در خرداد ماه افزایش یافته است. این به آن معنی است که افزایش غلظت نیترات در فروردین ۱۴۰۳ به واسطه فروشویی آلاینده‌های نیترا ته، هم‌زمان با نیترات‌زدایی ادامه دارد. در آبان ماه ۱۴۰۲ غلظت نیتريت میانگین برابر ۰/۴۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده که نسبت به ابتدای دوره نمونه‌برداری حدود ۰/۲۱ میلی‌گرم بر لیتر دارد. غلظت آمونیوم میانگین به جز دو دوره خرداد و شهریور ۱۴۰۳ که حدود ۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر رسیده، در حول ۰/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نوسان دارد.

در چاه W۷ ۷۲ درصد، در چاه W۸ ۴۲ درصد، در چاه W۹ ۳۴ درصد و ضریب همبستگی بین بارش و میانگین نیترات همه چاه‌ها ۲۷ درصد می‌باشد.

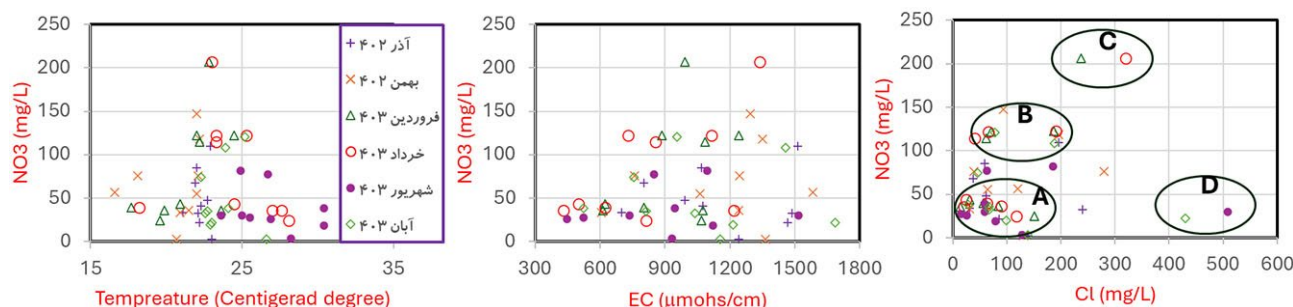
کموگراف یون‌های نیترات، نیتريت، آمونیوم، کلراید، سولفات، و هدایت الکتریکی (شکل ۷) روند تغییرات متفاوت زمانی هیدروشیمی کلی با گونه‌های نیتروژن‌دار را نشان می‌دهد. میانگین هدایت الکتریکی در آبخوان شهری ایزه از حدود ۱۱۵۰ میکروموهس بر سانتی‌متر در پاییز و زمستان ۱۴۰۲، به ۸۵۰ میکروموهس بر سانتی‌متر در خرداد ماه ۱۴۰۳ کاهش می‌یابد که اثر رقیق‌شدگی در اثر تغذیه زیرزمینی جدید و آب نفوذی از بارش را به خوبی نشان می‌دهد. سپس از خردادماه روند تدریجی افزایش املاح آب تا رسیدن به میانگین هدایت الکتریکی برابر ۱۰۷۰ میکروموهس بر سانتی‌متر در آبان ماه رخ می‌دهد. کلراید به عنوان یک یون پایستار^۹ در سیستم جریان آب زیرزمینی از میانگین ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در آذر ۱۴۰۲ تا ۱۱۳ میلی‌گرم بر لیتر در بهمن ماه افزایش می‌یابد و سپس با رخداد ترقیق در اثر تغذیه و نفوذ بارش، در فروردین و خرداد ماه ۱۴۰۳ غلظت آن به حدود ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. در شهریور و آبان ماه ۱۴۰۳ غلظت کلراید میانگین چاه‌های نمونه‌برداری شده به حدود ۱۲۵ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. تغییرات غلظت یون سولفات تا حدی با کلراید و هدایت الکتریکی متفاوت است به‌طوری که از غلظت میانگین ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در آذر ۱۴۰۲ به حدود ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر در بهمن ۱۴۰۲ می‌رسد و سپس تا خرداد ماه غلظت سولفات میانگین به حدود ۶۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد.



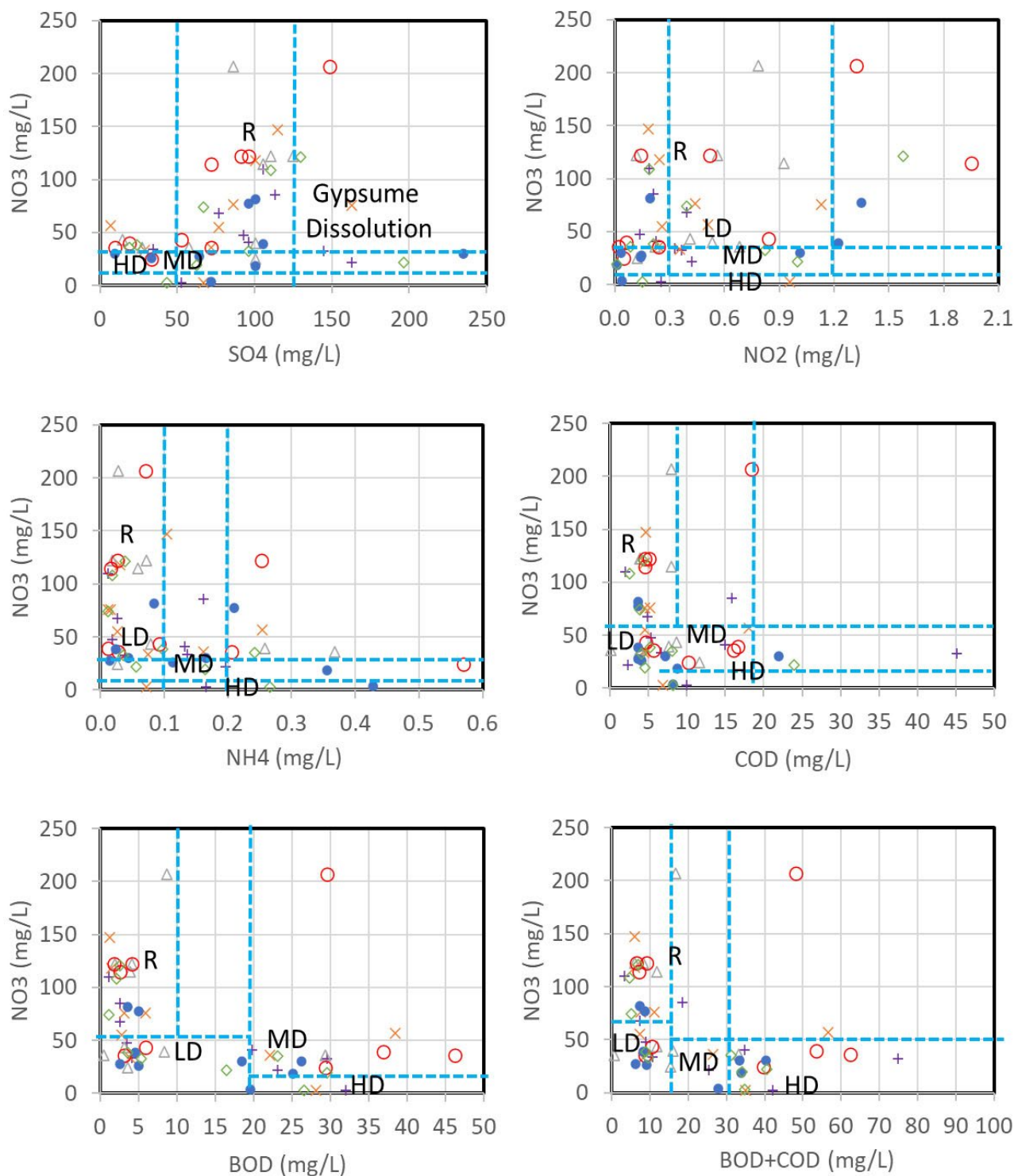
شکل ۷- نمودار تغییرات میانگین غلظت نیترات، نیتريت، آمونیوم، کلراید، سولفات، و هدایت الکتریکی در آبخوان شهری ایذه در دوره یک ساله ۱۴۰۲-۱۴۰۳

BOD و COD آب زیرزمینی در آبخوان شهری ایذه ارائه شده است. در نمودار سولفات در مقابل نیترات محدوده با سولفات بیش از ۱۲۵ میلی گرم بر لیتر رخداد انحلال غالب ژیبس در آبخوان را نشان می دهد، هرچند در عمل از محدوده ژیبس بیش از ۵۰ میلی گرم بر لیتر انحلال ژیبس آغاز شده است. از این رو در آبخوان شهری ایذه تأثیر هیدروشیمی از بقایای ژیبس در آبخوان با سنگ بستر سازند گچساران مشهود می باشد. نمونه های با نیترات کمتر از ۲۰ میلی گرم بر لیتر، رخداد شدید نیترات زدایی را نشان می دهند. نمونه های با غلظت نیترات بیش از ۴۰ میلی گرم بر لیتر و سولفات کم و متوسط بیانگر شرایط اکسیدان و آب تغذیه ای در بخش های جنوبی و غربی شهر می باشند. تفکیک شرایط مختلف در نمودارهای ترکیبی دو گونه احیایی نیتريت و آمونیوم با نیترات با غلظت نیترات خیلی کم، بیانگر شرایط نیترات زدایی شدید می باشد. در نمونه هایی که نیتريت و آمونیوم نیز کمتر از ۰/۱ میلی گرم بر لیتر می باشند، شرایط احیایی شدید حتی باعث اضمحلال

به منظور بررسی ارتباط پارامترهای هیدروشیمی با رخداد نیترات زدایی نمودارهای ترکیبی در شکل (۸) و (۹) ارائه شده است. نمودارهای ترکیبی دومتغیره غلظت نیترات در مقابل درجه حرارت و هدایت الکتریکی در شکل (۸)، ارتباط مشخصی بین رخداد نیترات زدایی با این دو پارامتر را نشان نمی دهد. در نمودار کلراید در مقابل نیترات در همین شکل، چهار محدوده مشخص شده است. بخش A با غلظت کلراید و نیترات کم بیانگر آب تغذیه ای از زیر شهر می باشد که نفوذ اولیه فاضلاب را با رخداد نیترات زدایی در پایین بخش A نشان می دهد. بخش B با کلراید کم و نیترات زیاد بیانگر نفوذ فاضلاب و فروشویی ترکیبات نیتروژن دار به آبخوان می باشد. بخش C با کلراید و نیترات زیاد بیانگر آلودگی شدید به فاضلاب و محیط اکسیدان می باشد و بخش D با کلراید بسیار زیاد و نیترات کم رخداد نیترات زدایی شدید با آب متاثر از انحلال هالیت را نشان می دهد. در شکل (۹) نیز نمودارهای ترکیبی دومتغیره غلظت نیترات در مقابل سولفات، نیتريت، آمونیوم، BOD، COD و مجموع



شکل ۸- نمودارهای ترکیبی دومتغیره غلظت نیترات در مقابل کلراید، هدایت الکتریکی و درجه حرارت (راست به چپ)



+	آذر ۱۴۰۲	×	بهمن ۱۴۰۲	△	فروردین ۱۴۰۳	LD: نیترات زدایی کم	R: آب تغذیه ای
○	خرداد ۱۴۰۳	●	شهریور ۱۴۰۳	◇	آبان ۱۴۰۳	HD: نیترات زدایی زیاد	MD: نیترات زدایی متوسط

شکل ۹- نمودارهای ترکیبی دومتغیره غلظت نیترات در مقابل سولفات، نیتريت، آمونیوم، BOD، COD، و مجموع BOD و COD آب زیرزمینی در آبخوان شهری ایذه

این دو یون نیز شده است. آب‌های تغذیه‌ای با غلظت نیترات زیاد و آمونیوم و نیتريت کم، و آب‌های با نیترات زیاد و نیتريت و آمونیوم متوسط بیانگر مراحل توسعه میانی نیترات‌زدایی می‌باشند. نمودار تغییرات نیترات با BOD و COD با هدف تفکیک رخداد آلودگی در آب‌ها با منشا آلودگی آلی و صنعتی مبین تأثیر بیشتر BOD بر رخداد نیترات‌زدایی می‌باشد. مراحل توسعه نیترات‌زدایی از کم به زیاد با مرز مجموع BOD+COD برابر ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم تفکیک شده است.

نتایج و بحث

در حال حاضر نقشه معتبری از نفوذپذیری سطحی برای آبخوان ایذه تهیه نشده است. با این حال به علت اینکه محدوده مطالعات یک آبخوان شهری کوچک است (۱۸ کیلومتر مربع)، نفوذ مستقیم بارش از سطح شهر چندان قابل توجه نمی‌باشد و نفوذ اصلی از فاضلاب شهری است. باتوجه به دبی مصرفی روزانه در شهر ایذه که بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ لیتر در ثانیه (حدود ۲۰ میلیون متر مکعب در سال بر اساس آمار آبفا) و با اعمال ضریب نفوذ ۶۰ درصدی از فاضلاب که بر مبنای بازدید از منطقه و تجربه کارشناسی حاصل شده است؛ نفوذ از فاضلاب حدود ۱۲ میلیون متر مکعب در سال برآورد می‌شود. از ۲۱ حلقه چاه آهکی آب شرب ایذه، ۱۰ حلقه چاه با آبدهی زیاد (۶۰ تا ۷۰ درصد حجم آب شرب) از نوار باریکه تاقدیس نعل اسبی در مجاورت مرز جنوبی آبخوان آبرفتی ایذه تأمین می‌شود، باتوجه به شرایط خشکسالی حاکم در چند سال اخیر و افت شدید آب در آبخوان نعل اسبی (بر اساس آمار چاه‌های مشاهداتی در این آبخوان)، تغذیه این بخش از آبخوان نعل اسبی به تبادلات هیدرولیک و تغذیه از سوی آبخوان آبرفتی که با فاضلاب غنی شده است، نسبت داده می‌شود.

در شکل (۱) جهت جریان در آبخوان آبرفتی مبین ورود آب به کارست نعل اسبی است. از دیگر شواهد ورود آب آبخوان آبرفتی به آبخوان کارست نعل اسبی، عدم تخلیه آب آبخوان شهری به سمت بخش‌های شمالی و تالاب میانگران در اثر ریزدانه شدن آبخوان و عملکرد شبه سد هیدرولیکی آن، در برابر زهکشی آب نفوذی حاصل از تغذیه فاضلاب شهری است. این ساختار آبرفت باعث زهکشی اجباری آب به سمت آبخوان نعل اسبی می‌شود و نتیجه آن ممانعت از بالا آمدگی آب در منطقه شهری علی‌رغم عمق کم آب زیرزمینی است. پیش از این، نتایج مدل‌سازی آبخوان ایذه در دهه ۸۰، این تغییر رژیم هیدرولیکی را اثبات کرده و نتایج کار علیجانی (۱۳۸۱)

نشان می‌دهد که آب آبرفت از بخش درشت دانه آبخوان تا جنوب شرقی جریان یافته و از منطقه کلدوزخ وارد آبخوان نعل اسبی می‌شود. نتیجه این معکوس شدن جریان آب زیرزمینی از آبرفت به آهک، باعث افزایش نیترات در چاه‌های آهکی آب شرب ایذه مثل چاه‌های آهکی کلدوزخ و جاموشی در یال غربی نعل اسبی به ۵۰ تا ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات شده است (علیجانی، ۱۳۸۱).

بررسی تغییرات مکانی و زمانی در غلظت نیترات در آب زیرزمینی در منطقه شهری ایذه به علت ورود آلاینده‌های نیترا ته در بخش‌های مختلف این آبخوان و در زمان‌های مختلف، نوسانات و ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهد.

از نظر زمانی، با اینکه کوددهی زمین‌های زراعی در محدوده آبخوان، به خصوص در جنوب شهر تا حدی در افزایش نیترات آبخوان تأثیر دارد، ولی منشا اصلی آن نفوذ فاضلاب انسانی از طریق چاهک‌های جذبی و فروشویی آلاینده‌های سطح شهر می‌باشد. فروشویی آلاینده‌ها در طی بارش زمستانه و کوددهی زمین‌های کشاورزی در بهمن و اسفند باعث شده، حداکثر غلظت نیترات در آبخوان شهری ایذه در فروردین ماه ۱۴۰۳ رخ دهد. کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب در بهار و توقف فعالیت‌های زراعی، باعث شده که عمده نرخ نیترات‌زدایی در دوره پس از رخداد حداکثر غلظت نیترات رخ دهد، که منطبق با یافته‌های Hu و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد.

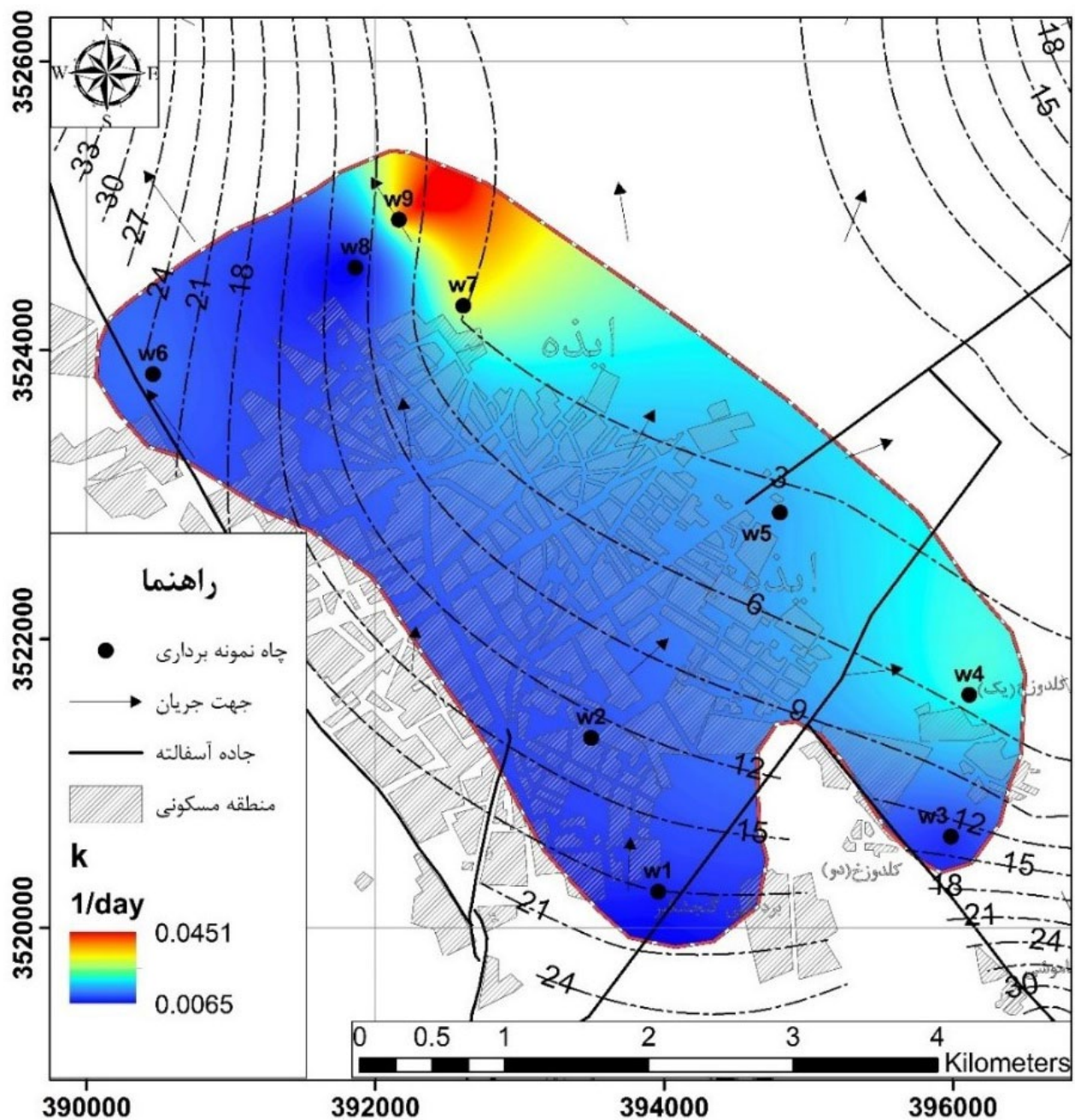
از نظر مکانی، غلظت نیترات به عوامل مختلفی بستگی دارد ولی در آبخوان شهری ایذه، عمدتاً تحت تأثیر نیترات‌زدایی و نیترات‌زایی در آب‌های زیرزمینی قرار دارند. به دلیل رخداد نیترات‌زایی در افق خاک منطقه، غلظت آمونیوم ارتباط مشخصی با غلظت نیترات نشان نمی‌دهد، Castaldelli و همکاران (۲۰۱۸) نیز در مطالعات خود نشان دادند نیترات‌زایی آمونیوم در عمق ۱۵ سانتی‌متری سطح خاک به‌طور کامل انجام می‌شود. در شمال شهر ایذه که مجاور با مرز خروجی آبخوان است تا محدوده دریاچه میانگران، به دلیل تمرکز جریان آب زیرزمینی آلوده به فاضلاب شهری، عمق کم سطح ایستابی و ریزدانه بودن آبخوان شرایط احیایی شدید با حداکثر مقادیر BOD و COD وجود دارد، غلظت نیترات تحت تأثیر نیترات‌زدایی کاهش شدید یافته و غلظت آمونیوم و نیتريت نیز افزایش جزئی دارد. به‌طور کلی غلظت قابل توجه نیترات و آمونیوم در آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ثبت نشده است.

در آبخوان شهری ایذه، هیچ روند نزولی واضح و معناداری در غلظت آمونیوم و نیتريت مشاهده نشد ولی الگوی افزایش

حداکثری نیترات در اثر فروشست همراه با آب نفوذی از بارش در فرودین ماه، در تطابق با حداقل هدایت الکتریکی به دلیل رقیق شدن است.

مهم‌ترین مرحله پس از اثبات وجود فرایند نیترات‌زدایی در آبخوان شهری ایزده و شناسایی فرایندهای موثر بر آن (کاهش تغذیه، کاهش غلظت اکسیژن و غالب شدن محیط احیایی) بر مبنای اطلاعات فوق، تعیین نرخ نیترات‌زدایی است. این موضوع از دیدگاه مدیریتی به منظور تعیین نقاط مستعد جهت پالایش آبخوان از نیترات و تهیه نقشه پهنه‌بندی

نیترات‌زدایی بسیار اهمیت می‌یابد. نیترات‌زدایی یک فرآیند تسهیل‌شده توسط میکروارگانیسم‌ها است که در آن غلظت نیترات کاهش می‌یابد و در نهایت محصولات گازی (یعنی NO ، N_2O و N_2) در محیط‌های بی‌هوازی تولید می‌شود (Li و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به نتایج این تحقیق، پهنه‌بندی نرخ نیترات‌زدایی ارزیابی شد و اینکه آیا واکنش نیترات‌زدایی در هر نقطه نمونه‌برداری در هر دوره زمانی رخ داده است یا خیر، با ابهاماتی در دوره‌های مختلف نمونه‌برداری مشخص شد. در مطالعات محققین مختلف درباره نیترات‌زدایی که در مقدمه



شکل ۱۰- پهنه‌بندی ثابت نرخ نیترات‌زدایی (k) در آبخوان شهری ایزده در دوره فروردین تا خرداد ۱۴۰۳

مقاله به برخی تحقیقات مهم اشاره شده است، نیترات‌زدایی نیترات بر طبق معادله واکنش پویایی مرتبه اول^۸ به صورت رابطه (۱) ارائه شده است (Ke و همکاران، ۲۰۲۱):

$$C = C_0 e^{-kt} \left(\ln \frac{C}{C_0} = -kt \text{ or } \lg \frac{C}{C_0} = \frac{-kt}{2,303} \right) \quad (1)$$

که C غلظت نیترات در زمان t و C_0 غلظت اولیه نیترات در زمان t_0 بر حسب میلی گرم بر لیتر، k ثابت نرخ نیترات‌زدایی، و t دوره زمانی که در آن واکنش نیترات‌زدایی رخ می‌دهد، می‌باشند. در آبخوان شهری ایزده دوره اصلی حداکثر رخداد نیترات‌زدایی از فروردین تا خرداد ماه ۱۴۰۳ (در دوره زمانی ۶۵ روزه) بدون بار آلودگی نیترا ته ورودی جهت تعیین نرخ نیترات‌زدایی در نظر گرفته شد ($C_0=0$). بر این اساس پهنه‌بندی ثابت نرخ نیترات‌زدایی در آبخوان شهری ایزده محاسبه شد (شکل ۱۰).

ثابت k در آبخوان شهری ایزده از ۰/۰۰۶۵ تا ۰/۰۴۵۱ بر روز متغیر (متوسط ۰/۰۱۴۴ بر روز) است. بیشترین مقدار k مربوط به شمال آبخوان شهری ایزده و چاه W۹ می‌باشد. چاه‌های W۷ و W۴ نیز ثابت نرخ نیترات‌زدایی بالایی دارند. چنین استنباط شده است که عمق سطح ایستابی کمتر از ۵ متر در شمال و شرق ایزده به سمت تالاب‌های میانگرا ن و بندان، نفوذ فاضلاب شهر ایزده و تمرکز جهت جریان آب زیرزمینی به سمت این بخش‌ها، باعث تشدید شرایط احیایی و تسریع نیترات‌زدایی در این محدوده‌ها شده است. کمترین مقادیر ثابت k مربوط به چاه‌های W۱، W۳ و W۷ در جنوب و غرب ایزده می‌باشد که عمق آب زیرزمینی ۱۵ تا ۲۵ متر دارند. بررسی‌های فوق، نتایج حاصل از مطالعات علیجانی (۱۳۸۱) را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج حاصل از مطالعات پیشین (علیجانی، ۱۳۸۱؛ ناصری و علیجانی، ۱۳۸۶) و مقاله حاضر نشان می‌دهد ه آبخوان شهری ایزده آلوده به نیترات بوده و چاه‌های شرب تأمین کننده آب شهر تحت تنش آلودگی قرار دارند. از آنجایی که نیترات‌زدایی، یک فرآیند بیوشیمیایی تأثیرگذار در کنترل آلودگی نیترات و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی است؛ به منظور اعمال مدیریت کیفی در آبخوان شهری ایزده، رخداد نیترات‌زدایی و سازوکار موثر بر آن، در آبخوان شهری ایزده، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مقادیر نیترات، نیتريت و آمونیوم در یک دوره یک ساله (آذر ۱۴۰۲ - آبان ۱۴۰۳) در ۹

چاه منتخب، در این آبخوان اندازه‌گیری و تحلیل شد. بررسی تغییرات مکانی غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزده نشان می‌دهد نمونه‌های آب چاه‌های شمال شهر ایزده و مجاور با تالاب میانگرا ن، باوجود آلودگی شدید با فاضلاب شهر ایزده و بر عکس بخش‌های جنوبی آبخوان، تحت شرایط احیایی و نیترات‌زدایی شدید قرار داشته و دارای حداقل غلظت نیترات در بین چاه‌های مورد مطالعه در آبخوان شهری ایزده هستند. در نتیجه در این نواحی، تأثیر نیترات‌زدایی منجر به کاهش نیترات و افزایش جزئی آمونیوم و نیتريت شده است. در این آبخوان، نمونه‌هایی با نیترات کمتر از ۲۰ میلی گرم بر لیتر، رخداد شدید نیترات‌زدایی را نشان می‌دهند و نمونه‌هایی با غلظت نیترات بیش از ۴۰ میلی گرم بر لیتر و سولفات کم تا متوسط، بیانگر شرایط اکسیدان و آب تغذیه‌ای در بخش‌های جنوبی و غربی شهر هستند. تفکیک شرایط مختلف در نمودارهای ترکیبی دو گونه احیایی نیتريت و آمونیوم با نیترات، در غلظت نیترات خیلی کم، بیانگر شرایط نیترات‌زدایی شدید می‌باشد؛ آب‌های تغذیه‌ای دارای غلظت نیترات زیاد و آمونیوم و نیتريت کم بوده و بیانگر شرایط اکسیدان می‌باشند و آب‌های با نیترات زیاد و نیتريت و آمونیوم متوسط بیانگر مراحل توسعه میانی نیترات‌زدایی می‌باشند. مراحل توسعه نیترات‌زدایی از کم به زیاد با مجموع BOD+COD بیش از ۱۵ و ۳۰ میلی گرم تفکیک می‌شود. بر اساس کموگراف نیترات، میانگین غلظت نیترات در آبخوان شهری ایزده در ابتدای مطالعات در آذر ۱۴۰۲، برابر ۴۹ میلی گرم بر لیتر بوده است، که به دلیل فروشویی آلاینده‌های فاضلاب شهری، نفوذ از چاهک‌های جذبی و کودهای شیمیایی و افزایش شرایط اکسیدان با نفوذ آب‌های تازه از بارش، در بهمن ماه ۱۴۰۲ و فروردین ۱۴۰۳ به ترتیب به ۶۷ و ۸۳ میلی گرم بر لیتر افزایش یافته است. در فصل بهار، به دلیل تشدید شرایط احیایی در آبخوان و توقف فعالیت‌های کشاورزی، حداکثر نرخ نیترات‌زدایی رخ داده که باعث کاهش شدید میانگین غلظت نیترات در خرداد به ۳۴ میلی گرم بر لیتر شده است. در دوره شهریور و آبان ۱۴۰۳، میانگین غلظت نیترات چاه‌های آب نمونه‌برداری شده به ۳۷ و ۵۱ میلی گرم در لیتر (مشابه با ابتدای دوره) افزایش یافته است. تغییرات زمانی نیترات در این مقاله با پژوهش ناصری و علیجانی (۱۳۸۶) مطابقت دارند. محاسبه نرخ نیترات‌زدایی در دوره فرودین تا خرداد ۱۴۰۳، نشان می‌دهد بیشترین مقدار ثابت نرخ نیترات‌زدایی به میزان ۰/۰۴۵۱ بر روز متغیر، مربوط به شمال و شرق شهر ایزده می‌باشد. عمق سطح ایستابی کمتر از ۵ متر، مجاورت با تالاب‌های میانگرا ن و بندان، نفوذ فاضلاب

- علیجانی، فرشاد. (۱۳۸۱). هیدروژئوشیمی و آلودگی آبهای زیرزمینی دشت ایزه. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. تهران، ایران.
- ناصری، حمیدرضا و علیجانی، فرشاد. (۱۳۸۶). بررسی منابع آلاینده آبهای زیرزمینی دشت ایزه، شمال شرق خوزستان. فصلنامه علوم محیطی، ۴(۴)، ۳۳-۴۶.
https://envs.sbu.ac.ir/article_96668.html
- Abascal, E., Gomez-Coma, L., Ortiz, I., & Ortiz, A. (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of The Total Environment*, 810, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152233>
- Aleku, D.L., Dähnke, K. & Pichler, T. (2024). Source, transport, and fate of nitrate in shallow groundwater in the eastern Niger Delta. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 65034-65050. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35499-6>
- Amiri, H., Zare, M., & Widory, D. (2015). Nitratennitrogen and Oxygen Isotope Characterization of the Shiraz Aquifer (Iran). *Procedia Earth and Planetary Science*, 13, 52-55. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.012>
- Amiri, V., Ali Khan, S., Sohrabi, N., & Amiri, F. (2023). Hydrogeochemical evaluation with emphasis on nitrate and fluoride in urban and rural drinking water resources in western Isfahan province, central Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 108720-108740. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30001-0>
- Bailey, R. T., Baù, D. A., & Gates, T. K. (2012). Estimating spatially-variable rate constants of denitrification in irrigated agricultural groundwater systems using an Ensemble Smoother. *Journal of Hydrology*, 468-469, 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.033>
- Benekos, A.K., Vasiliadou, I.A., Tekerlekopoulou, A.G., Alexandropoulou, M., Pavlou, S., Katsaounis, A., & Vayenas, D.V. (2023) Groundwater denitrification using a continuous flow mode hybrid system combining a hydrogenotrophic biofilter and an electrooxidation cell. *Journal of Environmental Management*, 339, 654-655. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117914>
- Castaldelli, G., Colombani, N., Tamburini, E., Vincenzi, F., & Mastrocicco, M. (2018). Soil type and microclimatic conditions as drivers of urea transformation kinetics in maize plots. *Catena*, 166, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.009>

شهر ایزه، و تمرکز جهت جریان آب زیرزمینی به سمت این بخش‌ها باعث تشدید شرایط احیایی و تسریع نیترات‌زدایی شده است. کمترین مقادیر ثابت نرخ نیترات‌زدایی به میزان ۰/۰۰۶۵ بر روز، در جنوب و غرب شهر ایزه می‌باشد که مربوط به ناحیه تغذیه با عمق آب زیرزمینی ۱۵ تا ۲۵ متر است. این یافته‌ها نتایج کار ناصری و علیجانی (۱۳۸۶) مبنی بر امکان جذب بیولوژیک نیترات در بخش‌های ریز دانه آبخوان که شدیداً آلوده به باکتری هستند، را تایید می‌کند. اهمیت نرخ کم نیترات‌زدایی و غلظت بالای نیترات در جنوب آبخوان شهری ایزه از این جهت است که این محدوده در مجاورت آبخوان کارستی نعل اسبی قرار گرفته و با آن تبادل هیدرولیکی دارد. هم اکنون تا ۷۰ درصد آب شرب شهر ایزه بواسطه ۲۱ چاه آهکی از آبخوان نعل اسبی بوده و نرخ بالای ورود آلودگی نیترا ته به آن مشهود است، بنابراین کنترل ورود نیترات به این بخش از آبخوان با مدیریت جمع‌آوری فاضلاب (به عنوان اصلی‌ترین منبع آلودگی به نیترات) و مدیریت کودپاشی در فصل کشت زمستانه، جهت افزایش تاب‌آوری محیطی آبخوان در برابر آلودگی و تغییرات اقلیمی ضرورت زیادی دارد. همچنین از دیدگاه مدیریت منابع آب، شناسایی مناطق مستعد نیترات‌زدایی، گزینه‌های مکانی جهت پخش فاضلاب تصفیه شده و پساب‌ها را نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و شرکت سهامی‌سازمان آب و برق خوزستان که تسهیلات لازم و پشتیبانی مالی این پژوهش را فراهم آورده‌اند، قدردانی می‌نمایند.

بی‌نوشت‌ها

1. World Health Organization (WHO)
2. Denitrification
3. N₂O
4. Anoxic
5. Denitrification rate
6. Denitrifica Bacteria
7. Conservative ion
8. First-order reaction kinetic equation

- Chakraborty, A., Suchy, M., Hubert, C.R.J., & Ryan, M.C. (2022) Vertical stratification of microbial communities and isotope geochemistry tie groundwater denitrification to sampling location within a nitrate-contaminated aquifer. *Science of The Total Environment*, 820, 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153092>
- Chander, S., Yadav, S., & Gupta, A. (2023). Nitrate Contamination in Groundwater of Arid and Semi-Arid Regions, Ecotoxicological Impacts, and Management Strategies. Springer, 126(9), 339-370. https://doi.org/10.1007/698_2023_1047
- Green, C. T., Jurgens, B. C., Zhang, Y., Starn, J. J., Singleton, M. J., & Esser, B. K. (2016). Regional oxygen reduction and denitrification rates in groundwater from multi-model residence time distributions, San Joaquin Valley, USA. *Journal of Hydrology*, 543, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.018>
- He, X., Liu, Z., Qian, J., Zhao, W., & Liu, Y. (2016). Distribution of Nitrate in Different Aquifers in the Urban District of Zhanjiang, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 97(2), 279-285. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1822-7>
- Hinkle, S. R., & Tesoriero, A. J. (2014). Nitrogen speciation and trends, and prediction of denitrification extent, in shallow US groundwater. *Journal of Hydrology*, 509, 343-353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.048>
- Hinshaw, S. E., Zhang, T., Harrison, J. A., & Dahlgren, R. A. (2019). Excess N₂ and denitrification in hyporheic porewaters and groundwaters of the San Joaquin River, California. *Water Research*, 115161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115161>
- Hu, Y., Jin, Z., Hu, Q., Hu, J., Ni, C., Li, F. (2020). Using stable isotopes to identify nitrogen transformations and estimate denitrification in a semi-constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 720, 137628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137628>
- Jahangir, M. M. R., Fenton, O., Müller, C., Harrington, R., Johnston, P., & Richards, K. G. (2017). In situ denitrification and DNRA rates in groundwater beneath an integrated constructed wetland. *Water Research*, 111, 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.015>
- Ke, S., Chen, J., Zheng, X., & Sun, X. (2021). Reference ion method: A simple and fast method for quantitatively identifying the source of nitrate and denitrification rate in groundwater. *Science of The Total Environment*, 769, 144555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144555>
- Lapworth, D.J., Boving, T.B., Kremer, D.K., Kebede, S., & Smedley, P.L. (2022). Groundwater quality: Global threats, opportunities and realising the potential of groundwater. *Science Total Environment*, 811, 543-552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152471>
- Li, R., Feng, C., Hu, W., Xi, B., Chen, N., Zhao, B., Liu, Y., Hao, C., & Pu, J. (2016). Woodchip-sulfur based heterotrophic and autotrophic denitrification (WSHAD) process for nitrate contaminated water remediation. *Water Research*, 89, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.044>
- Li, C., Li, S.L., Yue, F.J., Liu, J., Zhong, J., Yan, Z. F., Zhang, R.-C., Wang, Z.J., & Xu, S. (2019). Identification of sources and transformations of nitrate in the Xijiang River using nitrate isotopes and Bayesian model. *Science of the Total Environment*, 646, 801-810. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.345>
- Mahlkecht, J., Torres-Martínez, J.A., Kumar, M., Mora, A., Kaown, D., & Loge, F.J. (2023). Nitrate prediction in groundwater of data scarce regions: The futuristic fresh-water management outlook. *Science of The Total Environment*, 905, 78-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166863>
- Mirbagheri, S. A., Ahmadi, S., & Biglari-Joo, N. (2014). Denitrification of nitrate-contaminated groundwater in an anoxic rotating biological contactor: a case study. *Desalination and Water Treatment*, 57(10), 4694-4700. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994106>
- Mohseni-Bandpi, A., & Elliott, D.J. (1998). Groundwater denitrification with alternative carbon sources. (1998). *Water Science and Technology*, 38(6), 54-62. [https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(98\)00597-6](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(98)00597-6)
- Murphy, D.J., Dillon, P., Donovan, M.O., Shalloo, L., & Ruelle, E. (2024). Nitrate leaching on Irish grassland dairy farms: A review. *European Journal of Agronomy*, 153, 267-279. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127042>
- Nassery, H. R., Alijani, F., & Mirzaei, L. (2009). Environmental characterization of a karst polje: an example from Izeh polje, southwest Iran. *Environmental Earth Sciences*, 59(1), 99-108. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0008-6>
- Nejatijahromi, Z., Nassery, H. R., Hosono, T., Nakhaei, M., Alijani, F., & Okumura, A. (2019). Groundwater nitrate contamination in an area using urban wastewaters for agricultural irrigation under arid climate condition, southeast of Tehran, Iran. *Agricultural Water Management*, 221, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.015>

- Ortega-Martinez, E., Toledo-Alarcon, J., Fernandez, E., Campos, J.L., Oyarzún, R., Etchebehere, C., Cardena, R., Cabezas, A., Kook, L., Bakonyi, P., Magdalena, J.A., Trably, E., Bernet, N., & Jeison, D. (2024). A review of autotrophic denitrification for groundwater remediation: A special focus on bioelectrochemical reactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111552>
- Pan, Y., She, D., Ding, J., Abulaiti, A., Zhao, J., Wang, Y., Liu, R., Wang, F., Shan, J., Xia, Y. (2024). Coping with groundwater pollution in high-nitrate leaching areas: The efficacy of denitrification. *Environmental Research*, 250, 420-433. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118484>
- Qian, J., Wang, L., Liu, Y., Wu, B., & Wang, X. (2014). Distribution of nitrate and its implication for the contaminant source in groundwater of Huaibei Plain, Anhui Province. *Geosciences Journal*, 19(3), 537-545. <https://doi.org/10.1007/s12303-014-0051-5>
- Sotoodehnia, S., Mahdavi Mazdeh, A., Banning, A., & Wohnlich, S. (2024). Evaluating heterotrophic and autotrophic denitrification rates-experiments using organics and different grades pyrites. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 34-51. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105729>
- WHO (World Health Organization). (2017). Guidelines for drinking-water quality. 4th edition. ISBN: 978-92-4-154995-0. <https://www.who.int/publications/item/9789241549950>
- Zaryab, A., Alijani F, Knoeller K, Minet E, Musavi SF, & Ostadhashemi Z. (2024). Identification of groundwater nitrate sources in an urban aquifer (Alborz Province, Iran) using a multi-parameter approach. *Environmental Geochemistry and Health*;46(3), 100.234-248. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01872-0>. PMID: 38407701
- Zendehbad, M., Cepuder, P., Loiskandl, W., & Stumpp, C. (2019). Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100618. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100618>