

## Original Article

# Identifying the Origin and Proportional Contribution of Nitrate in the Eastern Kabul Aquifer Using Isotopic Indicators and the BSIMM Model

Abdulhalim Zaryab,<sup>1,2</sup> Hamid Reza Nassery,<sup>1\*</sup> Farshad Alijani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Engineering Geology and Hydrogeology, Faculty of Geology and Mines, Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan

Received: 2022.11.01 Accepted: 2024.08.30

**Introduction:** In the past few decades, nitrate contamination in water resources has become a global environmental problem often caused by urban and agricultural activities. In the past two decades, the capital of Afghanistan, Kabul has experienced rapid urbanization. This rapid urbanization has caused groundwater storage depletion and contamination to nitrate in the Kabul Plain. In the Kabul Plain, groundwater is the only source of drinking water for Kabul city residents. This study aims to determine the different sources of nitrate pollution, investigate the nitrogen transformation processes and estimate the proportional contribution of different sources of nitrate pollution in groundwater of the Eastern Kabul Plain.

**Material and Methods:** 18 groundwater samples were collected from the Eastern Kabul Plain aquifer in November 2020. In-situ parameters such as electrical conductivity (EC), pH, dissolved oxygen (DO), and temperature were measured in the sampling sites. The collected samples for analysis of nitrate and nitrate were transported to the Green Tech Laboratory in less than six hours, and the concentrations of mentioned ions were measured on the same day. The collected samples for analysis of major ions were transported to the Regional Water Organization Laboratory of Tehran, Iran. Nitrate samples for isotopic analysis were shipped to the UFZ laboratory in Germany, where isotopic measurements were carried out to use the bacterial denitrifier method. The proportional contribution of nitrate sources was determined using the BSIMM model.

**Results and Discussion:** Kabul city does not have a central sewage collection system, and sewage is disposed of mostly through septic and absorption wells. The groundwater nitrate concentration varies from 4 mg/L to 120.4 mg/L with an average value of 21 mg/L. The values of  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  vary from 4.8 ‰ to 20.8 ‰ and the

---

\* Corresponding Author Email Address: h-nassery@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1244



**Copyright:** © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

values of  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  vary from 0.7 ‰ to 18.6 ‰. The composition diagram of  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  and  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  was employed to determine the main sources of nitrate in the aquifer. Considering that most of the samples are plotted on sewage and manure area, therefore, urban sewage plays a major role in increasing the concentration of nitrate in the groundwater of Eastern Kabul Plain. Since chloride is a conservative ion and is not affected by environmental factors, the diagram of  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  molar ratio versus  $\text{Cl}^-$  has been used to identify potential sources of nitrate in the Kabul Plain aquifer. The plot indicates that urban sewage is the primary source of nitrate in the aquifer. The high concentration dissolved oxygen and nitrate in the groundwater samples indicates the dominance of aerobic conditions in the aquifer and the absence of denitrification. Sewage plays a major role in nitrate pollution of groundwater. Therefore, the rapid urbanization and population growth in the Kabul Plain in the past two decades have caused groundwater nitrate pollution. The uncertainty in nitrate sources estimation has been quantitatively assessed using the uncertainty index ( $\text{UI}_{90}$ ). The results of this study display a relatively high uncertainty for the contribution of nitrate sources, particularly sewage and manure (0.49) and soil organic nitrogen (0.44).

**Conclusion:** Sewage and manure, soil organic nitrogen, and chemical fertilizers are potential sources of nitrate in the Kabul Plain. The Bayesian stable isotope mixing model showed that sewage and manure (69.5%) are the main source of nitrate pollution in the aquifer. The results indicated that nitrification is the main biogeochemical nitrogen transformation process in the Kabul Plain.

**Keywords:** Nitrate pollution, Dual nitrate isotopes, Biogeochemical processes, BSIMM, Kabul aquifer

**How to cite this article:** Zaryab, A., Nassery, H.R. and Alijani, F., 2024. Identifying the Origin and Proportional Contribution of Nitrate in the Eastern Kabul Aquifer Using Isotopic Indicators and the BSIMM Model. *Environ. Sci.* 22(4): .....??.....

مقاله پژوهشی

## شناسایی منشأ و سهم نسبی نیترات در آبخوان شرقی کابل با استفاده از

### نمایانگرهای ایزوتوپی و مدل BSIMM

عبدالحلیم زریاب<sup>۱،۲</sup>، حمید رضا ناصری<sup>۱\*</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی، دانشکده زمین شناسی و معادن، دانشگاه پولی تکنیک کابل، کابل، افغانستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۹

**سابقه و هدف:** در چند دهه اخیر آلودگی منابع آب به نیترات به یک مسئله زیست محیطی جهانی تبدیل شده است که اغلب ناشی از فعالیت‌های شهری و کشاورزی است. در دو دهه گذشته کابل پایتخت افغانستان شهرنشینی سریع تجربه کرده است. این شهرنشینی سریع باعث کاهش ذخیره آب زیرزمینی دشت کابل و آلودگی آب زیرزمینی به نیترات شده است. در دشت کابل، آب زیرزمینی تنها منبع تأمین آب آشامیدنی ساکنان این شهر است. هدف این پژوهش تعیین منشأهای مختلف آلاینده نیترات، بررسی فرآیندهای تحول نیتروژن و تخمین سهم نسبی منابع مختلف آلاینده نیترات در آب زیرزمینی دشت شرقی کابل می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** در مهر ماه ۱۳۹۹، ۱۸ نمونه آب زیرزمینی از آبخوان دشت شرقی کابل برداشت شد. پارامترهای صحرائی مانند هدایت الکتریکی، pH، اکسیژن محلول و دما در محل‌های نمونه‌برداری توسط دستگاه پرتابل اندازه‌گیری شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده جهت سنجش نیترات و نیتريت در مدت کمتر از شش ساعت به آزمایشگاه شرکت Green Tech منتقل و در همان روز غلظت یون‌های نیترات و نیتريت سنجش شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده جهت سنجش یون‌های اصلی به آزمایشگاه مرکزی شرکت آب منطقه استان تهران ایران منتقل شد. نمونه‌های نیترات جهت سنجش ایزوتوپی در آزمایشگاه موسسه (UFZ Helmholtz Center for Environmental Research) در کشور آلمان منتقل و در آنجا سنجش‌های ایزوتوپی با استفاده از روش bacterial denitrifier انجام شد. سهم نسبی منابع بالقوه نیترات با استفاده از مدل اختلاط ایزوتوپی پایدار بیزی تعیین گردید.

\* Corresponding Author Email Address: h-nassery@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1244



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**نتایج و بحث:** شهر کابل فاقد سیستم جمع‌آوری فاضلاب مرکزی است. دفع فاضلاب بیشتر از طریق چاه‌های سپتیک و جذبی صورت می‌گیرد. غلظت نیترات آب زیرزمینی از ۴ تا ۱۲۰/۴ میلی‌گرم بر لیتر با مقدار میانگین ۲۱ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند. مقادیر  $\delta^{15}\text{N}$ - $\text{NO}_3^-$  از ۴/۸ پرمیل تا ۲۰/۸ پرمیل و مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$ - $\text{NO}_3^-$  از ۰/۷ پرمیل تا ۱۸/۶ پرمیل تغییر می‌کند. برای تعیین منابع اصلی نیترات از نمودار ترکیبی  $\delta^{18}\text{O}$ - $\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\delta^{15}\text{N}$ - $\text{NO}_3^-$  استفاده شده است. با توجه به قرار گرفتن بخش عمده نمونه‌های در محدوده فاضلاب انسانی و کودهای حیوانی، بنابراین فاضلاب شهری نقش عمده در افزایش غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت کابل دارد. از آنجاکه کلر یک یون پایدار است و تحت تأثیر عوامل محیطی قرار نمی‌گیرد، از نمودار نسبت مولار  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  در مقابل  $\text{Cl}^-$  جهت شناسایی منابع بالقوه نیترات در آبخوان دشت کابل استفاده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که فاضلاب شهری منبع اصلی نیترات در این آبخوان می‌باشد. غلظت بالای اکسیژن محلول و نیترات نمونه‌های آب زیرزمینی بیانگر شرایط اکسیدی حاکم در آبخوان و عدم رخداد نیترات‌زدایی است. نتایج ایزوتوپی پایدار بیزی نیز نشان می‌دهد که فاضلاب شهری نقش اصلی در آلودگی آب زیرزمینی به نیترات دارد. بنابراین شهرنشینی سریع و افزایش جمعیت در دشت کابل در دو دهه اخیر سبب آلودگی آب زیرزمینی به نیترات شده است. عدم قطعیت در برآورد منابع نیترات به صورت کمی با استفاده از شاخص عدم قطعیت (UI90) ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه عدم قطعیت نسبتاً بالایی را برای سهم منابع نیترات، به ویژه فاضلاب و کود حیوانی (۰/۴۹) و نیتروژن آلی خاک (۰/۴۴) نشان می‌دهند.

**نتیجه‌گیری:** فاضلاب انسانی و حیوانی، نیتروژن آلی خاک و کودهای شیمیایی منابع بالقوه نیترات در دشت کابل می‌باشند. مدل اختلاط ایزوتوپی پایدار بیزی نشان داد که فاضلاب انسانی و حیوانی (۶۹/۵ درصد) منبع اصلی آلودگی نیترات در آبخوان هستند. نتایج نشان داد که نیترات‌زایی عمده‌ترین فرآیند بیوژئوشیمی تحول نیتروژن در آبخوان دشت کابل است.

**واژه های کلیدی:** آلودگی نیترات، ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات، فرآیندهای بیوژئوشیمی، BSIMM، آبخوان کابل

**استناد به این مقاله:** زریاب، ع.، ح.ر. ناصری و ف. علیجانی. ۱۴۰۳. شناسایی منشأ و سهم نسبی نیترات در آبخوان شرقی کابل با

استفاده از نمایانگرهای ایزوتوپی و مدل BSIMM. فصلنامه علوم محیطی. ۲۲(۴): ۴۴-۴۹.....

**مقدمه**

آب زیرزمینی از مهم‌ترین منابع طبیعی در جهان است که بیشترین نقش را در تأمین آب شرب به ویژه در مناطق شهری ایفا می‌کند. در چند دهه اخیر آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به نیترات به یک مسئله زیست محیطی در بسیاری از مناطق کشاورزی و شهری جهان تبدیل شده است. نیترات به دلیل قابلیت انحلال بالا، جذب کم و پایداری ترکیب آن یکی از آلاینده‌های اصلی آب زیرزمینی به شمار می‌رود و اغلب ناشی از فعالیت‌های انسانی است (Alley, 1993; Panno *et al.*, 2006). غلظت بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات در منابع آب آشامیدنی باعث ایجاد بیماری متهموگلوبینمیا (Methemoglobinemia) در کودکان و افزایش خطر سرطان و بیماری‌های عفونی در انسان‌ها به ویژه در زنان باردار، افراد بزرگ سال و جنین در حال رشد می‌شود (Fewtrell, 2004; Schullehner *et al.*, 2018; Rogers *et al.*, 2023). همچنین، غلظت زیاد نیترات در آب‌های سطحی می‌تواند باعث رشد بیش از اندازه گیاهان، جلبک‌ها و ایجاد مشکلات زیاد محیط زیستی شود (Kendall *et al.*, 2007).

با توجه به موارد یاد شده، حفاظت آب‌های سطحی و زیرزمینی از آلودگی نیترات یکی از مؤلفه‌های اساسی مدیریت منابع آب است که نیاز به شناسایی منابع اولیه نیترات دارد. با این حال، با توجه به طیف گسترده‌ای منابع بالقوه نیترات در یک منطقه، پیچیدگی فرآیندهای بیوژئوشیمی نیترات و تعیین سهم نسبی آنها با استفاده از روش‌های معمول پایش کیفی آب دشوار است.

برای اولین بار Kohl *et al.* (1971) از داده‌های ایزوتوپی نیتروژن ( $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ ) جهت شناسایی منشأ نیترات در منابع آب استفاده کردند. سپس Kendall (1998) نمودار ترکیبی  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  را به منظور شناسایی منابع مختلف نیترات ارائه داد. روش ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات بر پایه این واقعیت استوار است که نیترات با منابع بالقوه، ترکیبات ایزوتوپی متفاوتی را نشان می‌دهد. پس از ابداع روش آزمایشگاهی Microbial denitrifier توسط Sigman *et al.* (2001) و Casciotti *et al.* (2002)، ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات به‌عنوان ابزار توانمندی برای شناسایی منابع مختلف نیترات و فرآیندهای تحول نیتروژن توسط پژوهشگران آب و محیط زیست کشورهای مختلف در منابع آب بکار گرفته شده است. هرچند این روش دارای محدودیت‌هایی مانند همپوشانی بازه تغییرات مقدار ایزوتوپی بعضی منابع نیترات مانند نیتروژن آلی خاک و فاضلاب انسانی و حیوانی و تغییر در ویژگی‌های وابسته به منابع مختلف نیترات حاصل از فرآیندهای بیوژئوشیمی است (Kendall *et al.*, 2007). از این‌رو جهت شناسایی دقیق‌تر منشأهای مختلف نیترات در منابع آب، از اطلاعات کاربری اراضی، داده‌های

هیدروژنولوزی و هیدروشمی و هم‌زمان با داده‌های ایزوتوپی نیترات استفاده شده است (Pasten-Zapata *et al.*, 2014; )  
(Minet *et al.*, 2017; Nejatijahromi *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; Torres-Martínez *et al.*, 2021).  
در دو دهه اخیر، پژوهشگران مختلف به روش‌های متفاوت تلاش کرده‌اند تا سهم نسبی منشأهای مختلف نیترات را تعیین کنند. تعیین سهم نسبی منابع بالقوه نیترات برای پیشگیری و مهار آلودگی نیترات آب‌های زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای دارد. از آنجاکه مقادیر  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  و  $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$  برای منابع مختلف نیترات مشخص و منحصر به فرد است، می‌توان سهم نسبی منابع مختلف نیترات را بر اساس ایزوتوپ‌های پایدار نیترات تعیین کرد (Xue *et al.*, 2012; Nijatijahromi *et al.*, 2020). بر اساس روش ایزوتوپ‌های پایدار، مدل‌های زیادی برای تعیین سهم نسبی منابع مختلف نیترات در آلودگی آب زیرزمینی استفاده شده است (Moore and Semmens, 2008; Xue *et al.*, 2009; Khodaei *et al.*, 2013; Grimmeisen *et al.*, 2017; )  
(Nijatijahromi *et al.*, 2019; Torres-Martínez *et al.*, 2020; Zaryab *et al.*, 2022). از جمله این مدل‌ها، مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بی‌بی (Bayesian Stable Isotope Mixing Model) در نرم افزار R است که محدودیت‌های مدل‌های قدیمی‌تر را به‌طوری قابل توجهی مرفوع ساخته است (Parnell and Inger, 2016; Herms *et al.*, 2021).  
عوامل انسانی مانند رشد روز افزون جمعیت، فعالیت کشاورزی، شهری و صنعتی نقش عمده را در افزایش غلظت نیترات در دشت شرقی کابل ایفا می‌کنند. نفوذ فاضلاب به آبخوان شهری دشت شرقی کابل یکی از دلایل اصلی آلودگی آب زیرزمینی به نیترات در دشت کابل است، زیرا شهر کابل فاقد شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه مرکزی است و بیشتر متکی به چاه‌های سپتیک و جذبی می‌باشد. پساب‌های خانگی نیز به‌طور عموم از طریق چاه‌ها وارد زمین می‌شود و یا اینکه به رودخانه کابل هدایت می‌شود. لجن چاه‌های سپتیک خانه‌های مسکونی به‌صورت دوره‌ای تخلیه و در مناطق کشاورزی به‌عنوان کود و یا در محل‌های دپوی زباله‌های جامد در سطح شهر دفع می‌شود (Paiman and Noori, 2019). در مناطق کشاورزی دشت شرقی کابل، علاوه بر فضولات انسانی و حیوانی از کودهای شیمیایی نیز برای بازدهی محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. بیشترین مصرف کودهای شیمیایی در گستره مورد مطالعه مربوط به کودهای با ترکیب شیمیایی اوره  $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$ ، سولفات آمونیم  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  و فسفات دی آمونیم  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  است که از کشورهای همسایه و فرا همسایه مانند پاکستان، چین، ایران و ترکیه وارد می‌شوند. کودهای شیمیایی عمدتاً در ابتدای فروردین ماه و اواسط خرداد ماه مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zaryab *et al.*, 2022). قابل ذکر است که تعداد زیادی گورستان واقع در بخش‌های مختلف دشت شرقی کابل از جمله منابع بالقوه نیترات به حساب می‌آیند.

در مطالعه حاضر از تلفیق ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات با داده‌های هیدروشیمی جهت شناسایی منشأ نیترات در آبخوان دشت شرقی کابل استفاده شده است. تعیین سهم نسبی منابع مختلف نیترات با استفاده از مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بیزی (BSIMM) صورت گرفته است. آب زیرزمینی آبخوان دشت کابل تنها منبع آب شرب ساکنین این شهر است، ولی در دو دهه اخیر شهر نشینی سریع و افزایش جمعیت در این دشت سبب کاهش قابل توجه ذخیره آب زیرزمینی و بدتر شدن کیفیت آن شده است. هدف اصلی این پژوهش، تفکیک منشأ، تعیین سهم نسبی منابع غالب نیترات و شناسایی فرآیندهای بیوژئوشیمی در آبخوان دشت شرقی کابل است. این پژوهش اطلاعات ارزشمندی برای بررسی، پیشگیری و مهار آلودگی نیترات جهت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت کابل فراهم می‌کند.

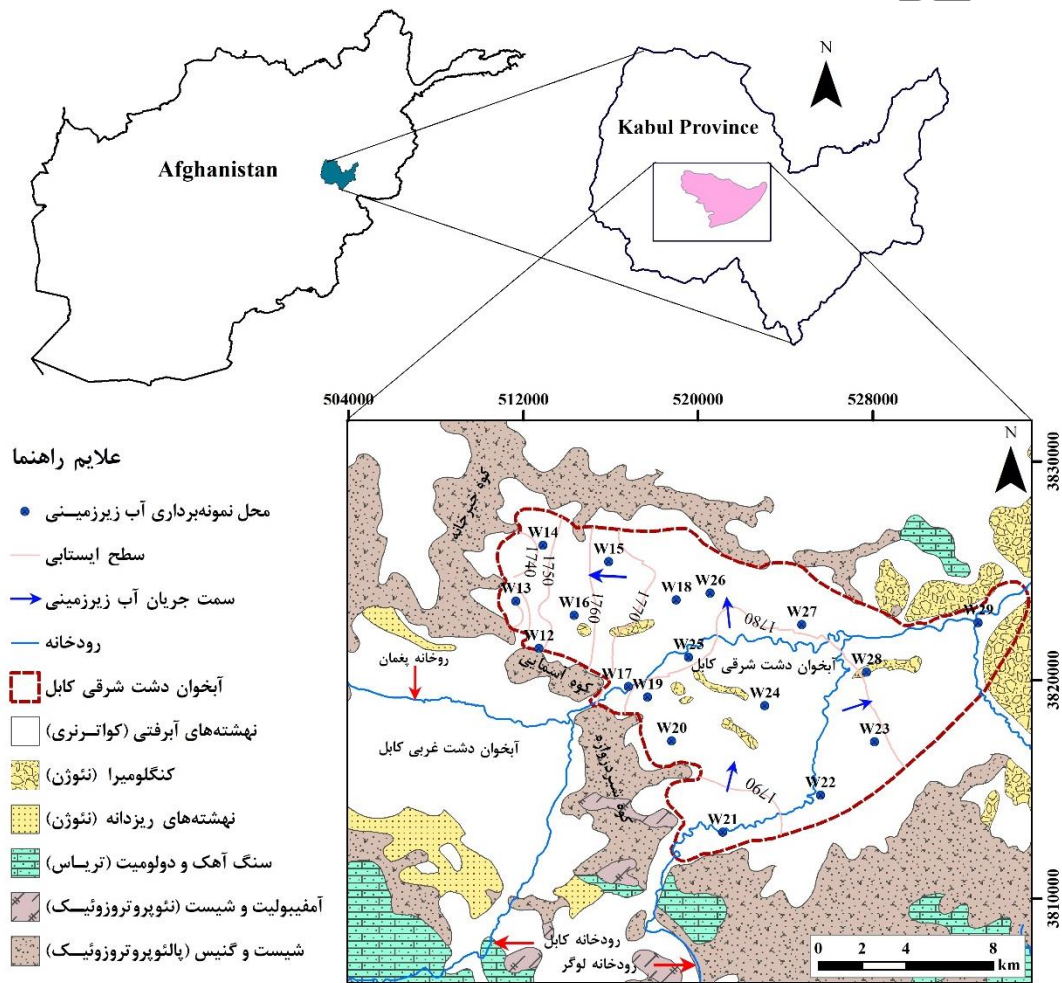
## مواد و روش‌ها

### گستره مورد مطالعه

دشت کابل به وسیله کوه‌های آسمایی و شیردرازه به دو بخش شرقی و غربی تقسیم شده است. گستره مطالعاتی دشت شرقی کابل، بین ۵۰۹۷۳۱ تا ۵۳۵۱۳۳/۵ طول جغرافیایی و ۳۷۳۵۰۲۳/۵ تا ۳۸۱۱۴۸۵/۷ عرض جغرافیایی در مختصات UTM واقع شده است و از نظر اداری مربوط به استان کابل است. وسعت گستره مطالعاتی دشت شرقی کابل ۲۰۱ کیلومترمربع است. رشته کوه‌های خیرخانه در بخش شمالی و شمال غربی گستره مطالعاتی موقعیت دارد. تراز ارتفاعی دشت از ۱۷۸۰ متر در بخش شرقی دشت تا ۱۸۵۰ متر در بخش‌های جنوبی و شمال غربی دشت تغییر می‌کند. میانگین درجه حرارت و بارندگی سالانه بر اساس ایستگاه‌های هواشناسی وزارت انرژی و آب وریاست هواشناسی اداره مستقل هوانوردی ملکی افغانستان به ترتیب ۱۴ درجه سانتی‌گراد و ۳۱۵ میلی‌متر است. توزیع زمانی بارش در دشت کابل نامنظم است به گونه‌ای که ۷۸ درصد از بارندگی‌ها در دی تا اردیبهشت اتفاق می‌افتد. در گذشته چندین تالاب و نواحی باتلاقی در سطح دشت کابل وجود داشت ولی به علت ازدیاد جمعیت و استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی، این تالاب‌ها و باتلاق‌ها به مرور زمان خشک و ناپدید شده است (Shroder and Ahmadzai, 2016; Zaryab *et al.*, 2021a). رودخانه‌های اصلی دشت کابل، رودخانه‌های کابل، لوگر و پغمان است.

گستره مورد پژوهش از نگاه زمین‌شناسی ساختار گرابنی دارد که در اواخر میوسن همزمان با تشکیل دره رودخانه کابل آغاز شده است. دشت شرقی کابل را می‌توان به عنوان دره پر شده در نظر گرفت که این دره‌ها با رسوبات نئوژن و کواترنری پر

شده است و رشته کوهها عمدتاً از سنگهای دگرگونی مانند گنیس، شیست، کوارتزیت، آمفیبولیت، مرمر و برخی کریستالی و رسوبی تشکیل شدهاند (Bohannon, 2010). ضخامت رسوبات نئوژن در بخشهای مرکزی دشت به بیش از ۷۰۰ متر می‌رسد (JICA, 2011). رسوبات کواترنری در سرتاسر فروافتادگی دشت گسترش یافته است. این نهشته‌ها متشکل از ماسه و شن، کنگلومراهای شن‌دار و رس است. نهشته نئوژن بنام آبخوان عمیق و نهشته‌های کواترنری بنام آبخوان کم عمق نیز شناخته می‌شود. به‌طور کلی، با توجه به مطالعه‌های زیرسطحی (حفاری‌های اکتشافی، ژئوفیزیک و چاه‌های مشاهده‌ای)، آبخوان شرقی کابل از نوع آزاد و در برخی بخش‌ها چند لایه‌ای است و احتمال نشتی بودن آن وجود دارد.



شکل ۱- موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری و جهت جریان آب زیرزمینی بر روی نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

Fig. 1- Location of sampling wells and groundwater flow direction on the geological map of the study area



## نمونه‌برداری و سنجش هیدروشیمی و ایزوتوپی

آلودگی آب‌های زیرزمینی به نترات در آبخوان دشت شرقی کابل در فصل خشک مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. برای پراکندگی مناسب نقاط نمونه‌برداری در گستره مورد مطالعه، ۱۸ حلقه چاه به‌گونه‌ای انتخاب شد که نشان دهنده روند تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی در این دشت باشد (شکل ۱ و جدول ۱). در این پژوهش با استفاده از حس‌گرهای الکتروشیمیایی قابل حمل (HQ40D, HACH, USA) پارامترهای اکسیژن محلول، درجه حرارت، pH و هدایت الکتریکی در صحرا اندازه‌گیری شد. برای رفع خطای ناشی از آب راکت در بعضی از چاه‌های که خاموش بودند، ابتدا به مدت هشت دقیقه آبکشی شده، سپس اقدام به نمونه‌برداری گردید. نمونه‌ها برای سنجش ایزوتوپ‌های دوگانه نترات در بطری پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و با حجم ۶۰ میلی‌لیتری و برای سنجش آمونیاک و کاتیون‌های اصلی در بطری‌های پلی‌اتیلن با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری شدند. نمونه‌های ایزوتوپی نترات با استفاده از فیلترهای یکبار مصرف سر سرنگی ۰/۲۲ میکرومتری در محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری فیلتر شدند. نمونه‌های ایزوتوپی بلافاصله پس از جمع‌آوری در یخچال سیار نگهداری و بعد از هشت ساعت به یخچال ثابت منتقل و در دمای منفی ۱۲ درجه سانتی‌گراد تا قبل از ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه در آلمان برای سنجش نگهداری شدند. به دلیل ضرورت انجام سریع بعضی از سنجش‌های آزمایشگاهی از قبیل نترات، نیتريت و آمونیاک، نمونه‌های در بطری‌های پلی‌اتیلن تمیز با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری و در همان روز به آزمایشگاه شرکت Green Tech واقع در ناحیه سوم شهر کابل منتقل و اقدام به سنجش غلظت پارامترهای نامبرده نمونه‌های دریافتی با استفاده از دستگاه طیف سنج نوری شده است. بعد از تکمیل نمونه‌برداری، نمونه‌های ایزوتوپی در یک ظرف کاملاً هوابندی شده ذخیره و به وسیله شرکت بین‌المللی حمل و نقل DHL به منظور سنجش‌های ایزوتوپی نترات به آزمایشگاه ایزوتوپی موسسه UFZ واقع در شهر Halle کشور آلمان منتقل شد.

نمونه‌های جمع‌آوری شده برای آنالیز یون‌های اصلی به علت نبود آزمایشگاه مجهز در داخل افغانستان، به آزمایشگاه مرکزی شرکت آب منطقه‌ای استان تهران منتقل شد. یون‌های اصلی (به جز  $\text{HCO}_3^-$ ) در این آزمایشگاه با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی (Ion Chromatography System S 150-Sykam, Germany) براساس روش استاندارد توصیف شده در (2017) APHA سنجش شد. غلظت یون بی‌کربنات نمونه‌ها با استفاده از روش تیتراسیون اسید-باز (Stumm and Morgan, 2012) تعیین شد. سنجش ایزوتوپ‌های دوگانه نترات در آزمایشگاه موسسه UFZ واقع در شهر Halle کشور آلمان با استفاده از دستگاه Gasbenchll/delta V plus combination (Thermo) و روش bacterial denitrifier

(Sigman *et al.*, 2001; Casciotti *et al.*, 2002) اجرا شدند. میزان دقت اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات در این روش  $1 \pm 6\%$  پرمیل برای  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  و  $\pm 0.4\%$  پرمیل برای  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  است. دقت سنجش‌های صحرائی و آزمایشگاهی با استفاده از نمونه‌های تکراری ناشناس و نمونه‌های تکراری مورد ارزیابی قرار گرفت. همین‌طور دقت سنجش‌های ژئوشیمی با استفاده از توازن یون اصلی مورد بررسی قرار گرفت که برای اغلب نمونه‌ها کمتر از  $\pm 3\%$  بدست آمد. به‌منظور رسم نمودار دو متغیره ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات و بقیه نمودارها از نرم‌افزار Excel (2019) کمک گرفته شده است.

### مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بی‌زی

به‌منظور تعیین سهم نسبی منابع بالقوه نیترات آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل از مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بی‌زی (BSIMM) استفاده شد. مدل BSIMM نسخه به‌روز شده مدل اختلاط ایزوتوپ بی‌زی SIAR است (Parnell *et al.*, 2019). این مدل می‌تواند منابع عدم قطعیت، تفریق ایزوتوپی و منشأهای مختلف نیترات را تحلیل و شناسایی

کند

(Parnell *et al.*, 2019; Herms *et al.*, 2021) مدل که توسط Parnell *et al.* (2013) ارائه شده به شرح زیر است.

$$\begin{aligned}
 X_{ij} &= \sum_{k=1}^k P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{ij} \\
 S_{jk} &\sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \\
 S_{jk} &\sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \\
 S_{jk} &\sim N(0, \sigma_j^2)
 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $X_{ij}$  مقدار ایزوتوپ ز ایستگاه  $i$  است که در آن  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  و  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  و  $S_{jk}$  مقدار ایزوتوپ  $j$  منبع  $k$  که دارای توزیع نرمال است ( $\mu_{jk}$  میانگین و  $\omega_{jk}$  انحراف معیار)،  $P_k$  سهم نسبی منبع  $k$  که با استفاده از بسته SIMMR تخمین زده می‌شود،  $C_{jk}$  فاکتور تفریق ایزوتوپ  $j$  منبع  $k$  که دارای توزیع نرمال است ( $\lambda_{jk}$  میانگین  $\tau_{jk}$  انحراف معیار)  $\varepsilon_{ij}$  خطای باقی‌مانده که دارای توزیع نرمال است (میانگین معادل صفر و انحراف معیار  $\sigma_j$ ). شرح کامل‌تر مدل BSIMM توسط پارنیل و همکاران (Parnell *et al.*, 2013) آورده شده است. در پژوهش حاضر، مدل BSIMM در بسته SIMMR نسخه 4/1 زبان برنامه نویسی R در محیط RStudio انجام شده است. مقادیر  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  و  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  پتانسیل منابع آلودگی نیترات بر اساس منابع علمی و با توجه به مقادیر ایزوتوپی منابع بالقوه نیترات حاصل از آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی

آبخوان شرقی کابل تعیین و به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل تعریف شده است. عدم قطعیت مدل BSIMM با به‌کارگیری از شاخص عدم قطعیت که برای بار اول توسط Ji *et al.* (2017) معرفی شدند، به‌صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است.

## نتایج و بحث

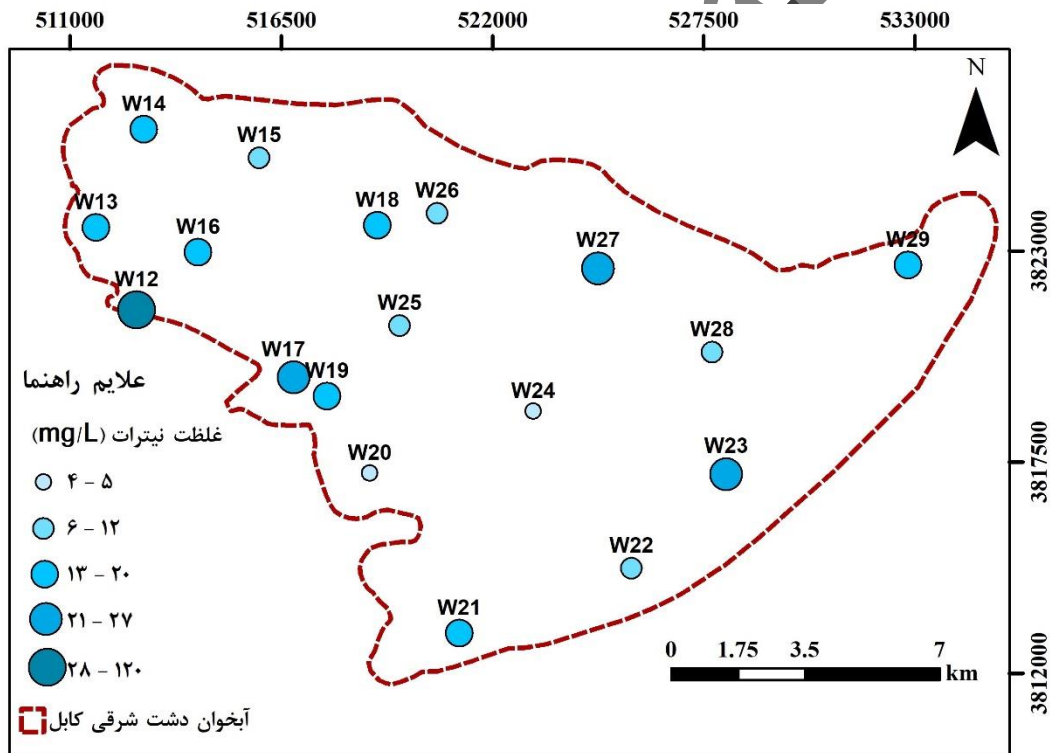
طبق اندازه‌گیری صحرایی و سنجش آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان دشت شرقی کابل، غلظت نترات از ۴ میلی‌گرم در لیتر تا ۱۲۰/۴ میلی‌گرم در لیتر با مقدار میانگین ۲۱ میلی‌گرم تغییر می‌کند (جدول ۱). با توجه به مقدار و تغییرات قابل توجه غلظت نترات در آب زیرزمینی دشت شرقی کابل که در نمونه W12 خیلی بیشتر از استاندارد آب آشامیدنی (WHO, 2017) است، می‌توان منشأهای مختلفی را برای آن در نظر گرفت. غلظت اکسیژن محلول از ۲/۱ میلی‌گرم در لیتر تا ۶/۹ میلی‌گرم در لیتر تغییر می‌کند. مقدار اکسیژن محلول نمونه‌های آب زیرزمینی بیانگر شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان است.

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و مقادیر ایزوتوپی آب‌های زیرزمینی دشت شرقی کابل

Table 1. Physicochemical parameters and groundwater isotopic ratios of the Eastern Kabul Plain

ID	عمق Depth (m)	اکسیژن محلول DO (mg/L)	دما Temp (°C)	بی‌اچ pH (-)	هدایت الکتریکی EC (µS/cm)	کلسیم Ca (mg/L)	منیزیم Mg (mg/L)	سدیم Na (mg/L)	پتاسیم K (mg/L)	بی‌کربنات HCO <sub>3</sub> (mg/L)	کلرید Cl (mg/L)	سولفات SO <sub>4</sub> (mg/L)	نترات NO <sub>3</sub> (mg/L)	نیتريت NO <sub>2</sub> (mg/L)	آمونیاک NH <sub>3</sub> (mg/L)
W12	104	6.9	17.0	7.0	1645	143	63	86	14.2	466	108	111	120.4	0.22	0.12
W13	80	5.5	15.6	7.6	2390	105	105	175	11	183	390	391	15.9	0.19	0.05
W14	100	4.6	17.4	7.2	8870	363	455	865	12	329	1232	3005	19.9	0.50	3.03
W15	70	2.1	15.2	7.4	16400	216	684	3014	74	840	2582	4573	11.1	0.23	3.34
W16	119	5.5	16.1	7.5	1695	81	85	170	10	462	166	212	15.5	2.80	0.01
W17	99	4.4	14.7	7.3	1632	111	72	90	8.7	415	171	101	27	1.16	0.30
W18	20	4.7	15.1	7.4	2020	81	138	108	8.5	767	203	101	18.6	0.51	0.02
W19	40	2.3	15.7	7.3	2230	65	107	153	36.2	728	201	154	14.6	0.84	50.1
W21	20	6.2	14.3	7.6	1722	67	113	116	6.3	549	149	207	18.6	0.88	0.02
W22	25	4.7	16.2	7.6	1635	62	112	114	7.4	622	132	122	12	0.57	0.04
W23	30	5.6	14.5	7.8	2070	54	103	226	6	592	186	271	23.9	0.78	0.02
W24	45	4.0	17.7	7.6	14930	727	407	2353	50.8	305	3997	3062	3.9	0.27	2.24
W25	20	3.4	14.8	7.6	1714	65	106	99	11.3	677	138	117	8.3	0.20	0.01
W26	30	4.6	16.0	7.6	1846	70	119	121	6.8	683	157	122	9.7	0.51	0.02
W27	30	3.3	15.3	7.7	2420	60	170	210	8.3	774	269	180	26.1	0.96	0.02
W28	28	3.8	15.6	7.7	1970	78	134	163	7.5	445	248	327	9.3	0.29	0.02
W29	20	3.2	15.4	7.5	1192	76	51	71	5.2	391	82	109	19	0.56	0.04

غلظت نیترات در چاه‌های آب ارتباط به عوامل مختلف مانند نوع کاربری اراضی مناطق تغذیه‌ای، ضخامت زون غیر اشباع، ویژگی‌های زمین‌شناسی، شیمی آب زیرزمینی و ویژگی‌های هیدرولیکی زون خاک دارد (Wheeler *et al.*, 2015). غلظت نیترات آب زیرزمینی آبخوان شرقی دشت کابل به علت منابع بالقوه نیترات به صورت غیرعادی در نقشه آلودگی نیترات مشخص می‌باشد (شکل ۲). مقادیر غلظت نیترات در ایستگاه W12 بیشتر از حد مجاز تعیین شده توسط سازمان جهانی می‌باشد (WHO, 2017). این ایستگاه نمونه‌برداری در حاشیه دشت، جایی که ضخامت رسوبات در مقایسه با بخش‌های مرکزی دشت کمتر می‌باشد، قرار دارند. در برخی نواحی دشت به ویژه بخش‌های مرکزی دشت، لنزهای رسی گسترش دارند که می‌توانند سبب تسریع فرآیند نیترات‌زدایی بیولوژیکی شوند (Zaryab *et al.*, 2023).



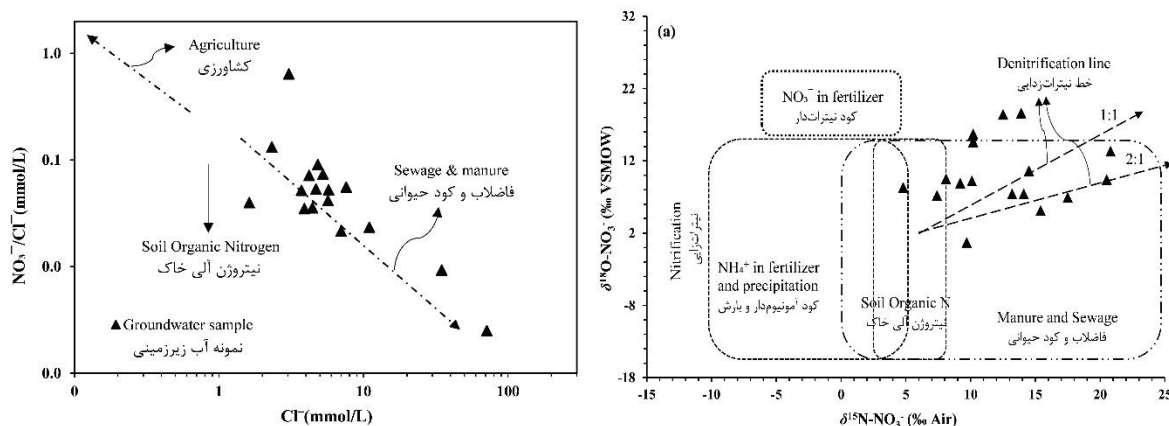
شکل ۲- نقشه تغییرات مکانی غلظت نیترات در آبخوان شرقی دشت کابل

Fig. 2- Map of spatial changes of nitrate concentration in eastern Kabul Plain aquifer

تعیین منشأهای آلودگی نیترات با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار نیترات

برای تعیین منابع اصلی نیترات در آب زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل از نمودار ترکیبی  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  استفاده شد. با توجه به شکل ۳a، نیترات آب زیرزمینی در گستره مورد مطالعه از سه منشأ عمده فاضلاب شهری، نیتروژن آلی خاک و کودهای شیمیایی ناشی می‌شود. با توجه به قرار گرفتن بخش عمده نمونه‌ها در محدوده فاضلاب انسانی و حیوانی، فاضلاب شهری نقش عمده‌ای در افزایش غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت شرقی کابل دارند (شکل ۳a). نمودار ایزوتوپی دوگانه نیترات (شکل ۳a) غنی‌شدگی که دارای همبستگی باشد، نشان نمی‌دهد. از این جهت فرآیند نیترات‌زدایی طبیعی در آب زیرزمینی توسط باکتری‌ها در آبخوان مذکور قابل توجه نمی‌باشد. هرچند نمونه‌های W15، W17، W18 و W27 به احتمال خیلی زیاد تحت فرآیند نیترات‌زدایی قرار گرفته است (شکل‌های ۲ و ۳a). غلظت پایین اکسیژن محلول در ایستگاه‌های نامبرده بیانگر این مدعا است (جدول ۱).

نسبت مولار  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  (Hao *et al.*, 2018) نیز به‌عنوان نمایانگر اختلاط و فرآیند بیولوژیک بر توزیع نیترات و شناسایی منابع بالقوه نیترات در آبخوان دشت شرقی کابل استفاده شده است. به‌طور کلی کودهای شیمیایی دارای مقادیر زیاد غلظت نیترات و نسبت بالای  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  می‌باشند. درحالی‌که فاضلاب دارای مقدار زیادی غلظت کلر و نسبت پایین  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  می‌باشد. با توجه به شکل ۳b، منبع عمده نیترات در آبخوان مورد مطالعه فاضلاب شهری (S&M) و تا اندازه‌ای نیتروژن آلی خاک (SN) و کودهای شیمیایی (CF) است.

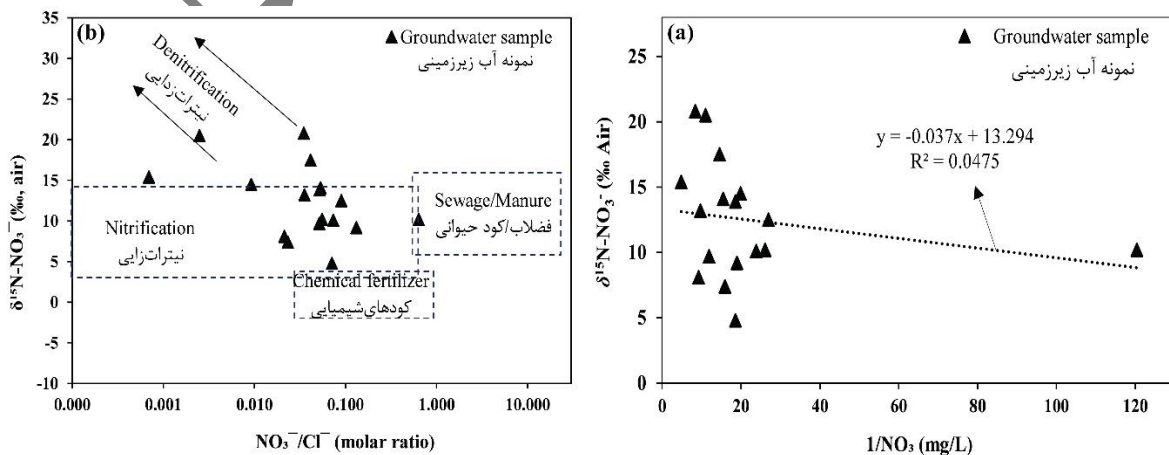


شکل ۳- نمودار ایزوتوپ‌های دوگانه منابع بالقوه نیترات و نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل (a)، نمودار  $\text{Cl}^-$  در مقابل  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  نمونه‌های آب زیرزمینی دشت شرقی کابل (b)

Fig. 3- Diagram of dual isotopes of nitrate potential sources and groundwater samples from Eastern Kabul Plain aquifer (a), diagram of  $\text{Cl}^-$  vs  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  groundwater samples from Eastern Kabul Plain aquifer (b)

## فرآیندهای بیوژئوشیمیایی

با توجه به نتایج اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول (DO) که نشان دهنده شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان می‌باشد، نیترات‌زایی فرآیند اصلی تشکیل نیترات محلول در دشت شرقی کابل است. شکل ۴a نیز نشان می‌دهد که بخش عمده نیترات نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مذکور حاصل از فرآیند نیترات‌زایی است. با توجه به نمودار ترکیبی  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  (شکل ۴a)، نمونه‌های W15، W19 و W25 که بیشتر در بخش‌های مرکزی دشت قرار دارند، تحت تأثیر فرآیند نیترات‌زایی قرار گرفته است. نمونه‌های یاد شده دارای کمترین غلظت نیترات و اکسیژن محلول نسبت به سایر نمونه‌ها است (جدول ۱). همچنین، برای بررسی رخداد فرآیندهای نیترات‌زایی و اختلاط از نمودار  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\text{NO}_3^-$  استفاده شده است (شکل ۴b). نمودار  $\text{NO}_3^-$  در مقابل  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  نشان می‌دهد که در همبستگی معنی‌دار بین  $\text{NO}_3^-$  و  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  ( $r^2 \approx 0.05$  و  $P > 0.05$ ) مشاهده نمی‌شود، که بیانگر عدم رخداد فرآیند نیترات‌زایی در نمونه‌های جمع‌آوری شده و احتمال وقوع اختلاط نیترات از منابع مختلف است (Wong *et al.*, 2018). نقاط نمونه‌برداری W12، W14، W16 و W17 با وجودی که عمق آنها زیاد است، ولی به دلیل واقع شدن این چاه‌ها در حاشیه دشت و درشت دانه بودن رسوبات این نواحی شرایط اکسیدی حاکم است. پژوهش‌های که توسط (Han *et al.*, 2015) در یک آبخوان ساحلی واقع کشور چین و (Nejatijahromi *et al.*, 2019) در آبخوان ورامین واقع جنوب تهران انجام داده اند نیز نشان می‌دهند که در اعماق ۱۰۰ متر و بیشتر از آن غلظت نیترات قابل ملاحظه است که نشان‌دهنده شرایط اکسیدی حاکم در اعماق ۱۰۰ متری در آن آبخوان‌ها می‌باشد. هرچند در آبخوان‌های ریزدانه معمولاً غلظت نیترات با عمق به دلیل کاهش اکسیژن محلول و رخداد فرآیند نیترات‌زایی به شدت کاهش می‌یابد (Su *et al.*, 2020).



شکل ۴- نمودار  $1/[NO_3^-]$  در مقابل  $\delta^{18}O-NO_3^-$  (a) و نمودار  $\delta^{15}N-NO_3^-$  در مقابل نسبت مولار  $NO_3^-/Cl^-$  (b) نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل

Fig. 4-  $1/[NO_3^-]$  vs  $\delta^{18}O-NO_3^-$  (a), and  $\delta^{15}N-NO_3^-$  vs  $NO_3^-/Cl^-$  molar ratio (b) of groundwater samples from the Eastern Kabul Plain aquifer

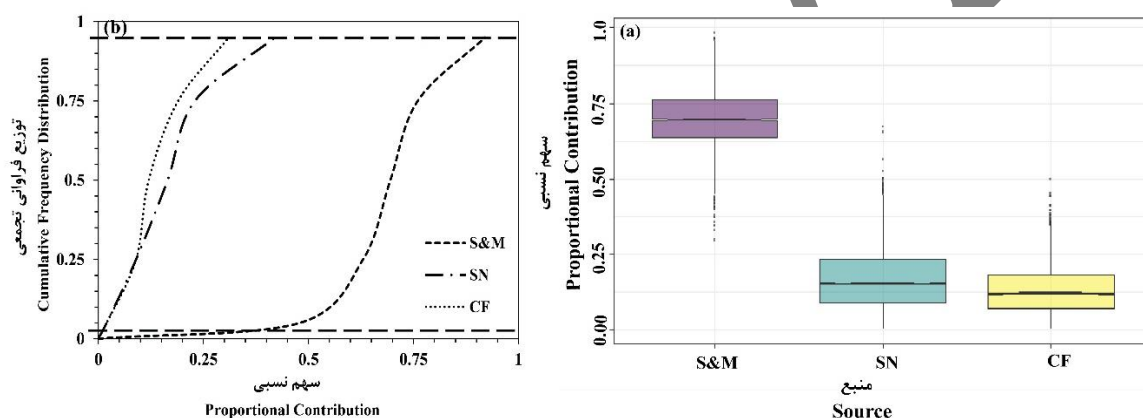
### تعیین سهم نسبی منابع مختلف نیتрат

برای تعیین سهم نسبی منشأهای مختلف نیترات در آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل از مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بیزی که به‌عنوان BSIMM شناخته می‌شود، استفاده شد. مقادیر  $\delta^{15}N-NO_3^-$  و  $\delta^{18}O-NO_3^-$  منابع بالقوه نیترات در آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه با استفاده از مقادیر ایزوتوپی منابع بالقوه نیترات حاصل از سنجش ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه و منابع علمی تعیین و به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل تعریف شد (Yang et al., 2016; Torres-Mrtínez et al., 2020). با توجه به عدم رخداد قابل توجه فرآیند نیترات‌زدایی، فاکتور تفریق ایزوتوپی در مدل صفر لحاظ شده است.

خروجی مدل اختلاط ایزوتوپی BSIMM تغییرات زیادی در سهم سه منبع بالقوه نیترات در آبخوان دشت شرقی کابل نشان می‌دهد. حدود تغییرات هر منبع بالقوه نیترات در آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه در شکل ۵a نشان داده شده است. با توجه به این شکل، فاضلاب انسانی و حیوانی با میانگین  $69/5$  درصد بیشترین سهم را در آلودگی نیترات آب زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل دارند، سپس به ترتیب نیتروژن آلی خاک ( $16/5$  درصد) و کودهای شیمیایی ( $12$  درصد) می‌باشند. بر اساس نتایج مدل BSIMM و با توجه به کاربری اراضی، فاضلاب شهری نقش اصلی را در آلودگی نیترات آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه دارد. این نشان دهنده تأثیر افزایش جمعیت و شهرنشینی سریع در دشت کابل در دو دهه اخیر است. انتظار می‌رود آلودگی نیترات در آب زیرزمینی دشت کابل به دلیل افزایش جمعیت و نبود سیستم منظم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری افزایش یابد، هرچند بین کاهش غلظت نیترات و افت سطح آب زیرزمینی رابطه مستقیم وجود دارد (Zaryab et al., 2021b).

همپوشانی در مقادیر ایزوتوپی بعضی منابع نیترات و فرآیندهای بیوژئوشیمی سبب عدم قطعیت در تعیین سهم نسبی منابع بالقوه نیترات می‌شود. از این رو اثرات کمی عدم قطعیت همپوشانی در مقادیر ایزوتوپی و فرآیندهای بیوژئوشیمی بر روی نتایج مدل BSIMM با به‌کاری از شاخص عدم قطعیت ( $UI_{90}$ ) مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵b). یافته‌های تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد که مقادیر شاخص عدم قطعیت ( $UI_{90}$ ) فاضلاب انسانی و حیوانی ( $0/49$ )، نیتروژن آلی خاک ( $0/44$ ) و

کودهای شیمیایی (۰/۳۲) است. به منظور کاهش عدم قطعیت مدل‌های اختلاط ایزوتوپی، نیاز به استفاده از نتایج ایزوتوپی منابع بالقوه نیترات گستره مورد مطالعه در مدل‌های اختلاط ایزوتوپی است. به طور کلی، درصد سهم برآورد شده سه منبع بالقوه نیترات توسط مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بیزی با تجزیه و تحلیل کیفی ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات و مشاهدات صحرائی همخوانی خوبی دارند. مدل BISMM که یک روش آماری است و بر اساس چارچوب بیزی استوار می‌باشد، امروزه به طور وسیع برای تعیین سهم نسبی منابع بالقوه نیترات مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مدل BISMM یک روش قابل اعتماد برای تعیین سهم نسبی منابع بالقوه نیترات و ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی آلودگی نیترات به حساب می‌آید.



شکل ۵- سهم نسبی سه منبع نیترات تخمین زده شده به وسیله BSIMM. فاضلاب انسانی و حیوانی (S&M)، نیتروژن آلی خاک (SN) و کودهای شیمیایی (CF) (a). توزیع تجمعی سهم نسبی سه منبع بالقوه نیترات در فصل خشک (b)  
**Fig. 5. Proportional contributions of three potential sources of nitrate estimated by BSIMM. Sewage and manure (S&M), soil organic nitrogen (SN), and chemical fertilizer (CF) (a). Cumulative distribution of the proportional contributions of three potential nitrate sources in the dry season (b)**

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای شناسایی منشأ نیترات، فرآیندهای بیوژئوشیمی و تخمین سهم نسبی منابع مختلف نیترات در آب زیرزمینی آبخوان دشت شرقی کابل، از ایزوتوپ‌های دوگانه نیترات ( $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  و  $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ ) و مدل اختلاط ایزوتوپ پایدار بیزی برای ۱۸ نمونه در فصل خشک (آبان ماه) ۱۳۹۹ استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد که منابع اصلی نیترات در گستره مورد مطالعه شامل فاضلاب انسانی و حیوانی، کودهای شیمیایی و نیتروژن آلی خاک است. نیترات‌زایی فرآیند غالب بیوژئوشیمی در آبخوان شناسایی شد، در حالی که فرآیند نیترات‌زدایی در آبخوان قابل ملاحظه نمی‌باشد. با توجه به شرایط اکسیداسیون حاکم بر آبخوان مورد مطالعه، زمان ماندگاری آلاینده نیترات در آبخوان طولانی مدت خواهد بود. سهم نسبی نیترات



در آب زیرزمینی آبخوان گستره مورد مطالعه با استفاده از مدل BSIMM در بسته SIMMR زبان برنامه نویسی R تعیین شد. نتایج مدل BSIMM نشان داد که فاضلاب شهری بیشترین سهم با میانگین ۶۹/۵ درصد در آلودگی نترات آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه دارد. استفاده از نتایج ایزوتوپی منابع گستره مورد مطالعه معمولاً موجب کاهش عدم قطعیت مدل اختلاط ایزوتوپی بیزی می‌شود. از آنجایی که فاضلاب شهری منبع اصلی نترات در آبخوان شرقی کابل می‌باشد، ایجاد تصفیه خانه‌های مناسب برای تصفیه پساب فاضلاب شهری می‌تواند موجب کاهش قابل ملاحظه غلظت نترات در آبخوان شهری دشت کابل شود.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از موسسه UFZ آلمان بویژه دکتر Knoeller به خاطر سنجش‌های ایزوتوپی صمیمانه قدردانی کنند.

### References

### منابع

- Alley, W.M., 1993. Regional Ground-Water Quality. Van Nostrand Reinhold, New York.
- APHA/AWWA/WEF, 2017. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, DC.
- Bohannon, R.G., 2010b. Geologic and topographic maps of the Kabul South 30'×60' quadrangle, Afghanistan: U.S. Geological Survey Scientific Investigation Map 3137, 34 p. pamphlet, 2 map sheets, scale 1: 100,000. <http://pubs.usgs.gov/sim/3137>.
- Casciotti, K.L., Sigman, D.M., Hastings, M.G., Böhlke, J.K. and Hilkert, A. 2002. Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate seawater and freshwater using the denitrifier method. *Analytical Chemistry*, 74(19), 4905-4912. <https://doi.org/10.1021/ac020113w>.
- Fewtrell, L., 2002. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion. *Environmental Health Perspectives*, 112(14), 1371-1374.
- Grimmeisen, F., Lehmann, M.F., Liesch, T., Goepfert, N., Klinger, J., Zopfi, J. and Goldscheider, J. 2017. Isotopic constraints on water source mixing, network leakage and contamination in an urban groundwater system. *Science of the Total Environment*, 1,583: 202-213. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.054.
- Han, D., Cao, G., McCallum, J., Song, X., 2015. Residence times of groundwater and nitrate transport in coastal aquifer systems: dawejia area, northern China. *Science of the Total Environmental*, 538: 539-554. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.036>.

- Hao, Z., Zhang, X., Gao, Y., Xu, Z., Yang, F., Wen, X. and Wang, Y., 2018. Nitrogen source track and associated isotopic dynamic characteristic in a complex ecosystem; A case study of a subtropical watershed, China. *Environmental Pollution*, 236, 177-187.
- Herms, I., Jodár, J., Soler, A., Lambán L.J., Custodio, E., Núñez, J.A., Arnó, G., Parcerisa, D. and Jorge-Sánchez J. 2021. Identification of natural and anthropogenic geochemical processes determining the groundwater quality in Port del Comte High Mountain karst aquifer (SE, Pyrenees). *Water*, 13, 2891. <https://doi.org/10.3390/w13202891>.
- JICA and Sanyu Consultants Inc., 2011. The study on groundwater resources potential in Kabul Basin in the Islamic Republic of Afghanistan.
- Kendall, C., Elliott, E.M. and Wankel, S.D., 2007. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 375-449.
- Khodaei, K., Mohammadzadeh, H., Nassery, H.R., Shahsavari, A.A., 2013. Determining the source of nitrate in the Dezful-Andimeshk aquifer using isotopes of  $^{15}\text{N}$  and  $^{18}\text{O}$ . The First National Conference on the use of stable isotopes, May 2013, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Landell Mills, 2020. Regional groundwater model, TA 8969. AFG: Kabul Managed Aquifer Recharge Project preparation.
- Minet, E.P., Goodhue, R., Meier-Augenstein, W., Kalin, R.M., Fenton, O., Richards, K.G. and Coxon, C.E., 2017. Combining stable isotopes with contamination indicators: a method for improved investigation of nitrate sources and dynamics in aquifers with mixed nitrogen inputs. *Water Research*. 124, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.041>.
- Moore, J.W. and Semmens, B.X., 2008. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 11, 470-480. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01163.x>.
- Nejatijahromi, Z., Nassery, H.R., Hosono, T., Nakhaei, M., Alijani, F. and 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. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.04.015.
- Nejatijahromi, Z., Nassery, H.R., Nakhaei, M., Alijani, F., 2020. Estimate proportional contributions of multiple nitrate sources in groundwater of varamin plain using a Bayesian isotope Mixing Model. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 25-38. Doi: 10.22093/wwj.2019.170201.2821 (In Persian with English abstract).
- Paiman, Z. and Noori, A.R., 2019. Evaluation of wastewater collection and disposal in Kabul city and its environmental impacts. *Modern Environmental Science and Engineering*, 5(5): 451-458. DOI: 10.15341/mese(2333-2581)/05.05.2019/012.
- Panno, S.V., Hackley, K.C., Kelly, W.R., and Hwang, H.H., 2006. Isotopic evidence of nitrate sources and denitrification in the Mississippi River, Illinois. *Journal of Environmental Quality*, 35(2), 495-504.

- Parnell, A.C., Phillips, D.L., Bearhop, S., Semmens, B.X., Ward, E.J., Moore, J.W., Jackson, A.L., Grey, J., Kelly, D.J. and Inger, D.J., 2013. Bayesian stable isotope mixing models. *Environmetrics* 24(6), 387-399. <https://doi.org/10.1002/env.2221>.
- Parnell, A.C., and Inger, R., 2016. SIMMR: A stable isotope mixing model. R Package version 0.4.1.
- Parnell, A.C., Inger, R., Bearhop, S. and Jackson, A.L., 2010. Source partitioning using stable isotopes: with too much variation. *PloS ONE* 5 (3), e9672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672>.
- Pastén-Zapata, E., Ledesma-Ruiz, R., Harter, T., Ramirez, A.I. and Mahlknecht, J., 2014. Assessment of sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area by using a multi-tracer approach. *Science of the Total Environment*, 470 (471), 855–864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.043>.
- Rogers, K.M., Raaij, R.V.D., Phillips, A., Stewart, M., 2023. A national isotope survey to define the sources of nitrate contamination in New Zealand freshwaters. *Journal of Hydrology* 617, 129131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129131>.
- Schullehner, J., Hansen, B., Thygesen, M., Pedersen, C.B., Sigsgaard, T., 2018. Nitrate in drinking water and colorectal cancer risk. A nationwide population-based cohort study. *International Journal of Cancer*, 143 (1), 73-79.
- Sigman, D.M., Casciotti, K.L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M. and Böhlke, J.K., 2001. A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. *Analytical Chemistry*, 73(17), 4145-4153. <https://doi.org/10.1021/ac10088e>.
- Shroder, J. and Ahmadzai, S.J., 2016. *Transboundary Water Resources in Afghanistan: Climate Change and Land-Use Implications*. Elsevier Inc.
- Su, C., Zhang, F., Cui, X., Cheng, Z., Zhang, Z., 2020. Source characterization of nitrate in groundwater using hydro-geochemical and multivariate statistical analysis in the Muling-Xingkai Plain, Northeast China. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08347-6>.
- Torres-Martínez, J.A., Mora, A., Knappett, P.S.K., Ornelas-Soto, N. and Mahlknecht, J., 2020. Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model. *Water Research*, 182, 115962, DOI: 10.1016/j.watres.2020.115962.
- Torres-Martínez J. A., Mora, A., Mahlknecht, J., Kaown, D. and Barceló, D., 2021. Determining nitrate and sulfate pollution sources and transformations in a coastal aquifer impacted by seawater intrusion-A multi-isotopic approach combined with self-organized maps and a Bayesian mixing model. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126103. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126103>.
- Wheeler, D.C., Nolan, B.T., Flory, A.R., DellwValle, C.T., Ward, M.H., 2015. Modeling groundwater nitrate concentrations in private wells in Iowa. *Science of the Total Environment* 536, 481-488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.080>.
- WHO, 2017. *Guideline for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*, fourth ed. Geneva. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00006-6).

- Wong, W.W., Pottage, J., Warry, F.Y., Reich, P., Roberts, K.L., Grace, M.R. and Cook, P.L.M., 2018. Stable isotopes of nitrate reveal different nitrogen processing mechanisms in streams across use gradient during wet and dry periods. *Biogeosciences*, 15(13): 3953-3965.
- Wu, H., Dong, Y., Gao, L., Song, X., Liu, F., Peng, X. and Zhang, G.-L., 2020. Identifying nitrate sources in surface water, regolith and groundwater in a subtropical red soil Critical Zone by using dual isotopes. *CATENA*. 198, 104994.
- Xue, D., Bottle, J., Baets, B., Accoe, F., Nestler, A., Taylor, P., Cleemput, O., Berglund, M. and Boeckx, P., 2009. Present limitations and future prospects of stable isotopes methods for nitrate source identification in surface and groundwater. *Water Research*, 43, 1159-1170.
- Xue, D., Baets, B.D., Cleemput, O.V., Hennessy, C., Berglund, M. and Boeckx, P., 2012. Use of a Bayesian isotope mixing model to estimate proportional contributions of multiple nitrate sources in surface water. *Environmental Pollution*, 161, 43-49. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.033.
- Zaryab, A., Nassery, H.R. and Alijani, F., 2021a. Identifying sources of groundwater salinity and major hydrogeochemical processes in the lower Kabul Basin aquifer, Afghanistan. *Environmental Science: Process Impacts* 23, 1589–1599. <https://doi.org/10.1039/D1EM00262G>.
- Zaryab, A., Nassery, H.R. and Alijani, F. 2021b. The effects of urbanization on the groundwater system of the Kabul shallow aquifers, Afghanistan. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02445-6>.
- Zaryab A., Nassery, H.R., Knoeller, K., Alijani, F. and Minet, E. 2022. Determining nitrate pollution sources in the Kabul Plain aquifer (Afghanistan) using stable isotopes and Bayesian stable isotope mixing model. *Science of the Total Environment*, 823, 153749.
- Zaryab, A., Farahmand, A., Nassery, HR., Alijani, F., Ali, S., Jamal, MZ., 2023. Hydrogeochemical and isotopic evolution of groundwater in shallow and deep aquifers of the Kabul Plain, Afghanistan. *Environmental Geochemistry and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01734-1>.