Scientific Quarterly Journal of Geosciences, Vol. 36, Issue 3, Serial No. 141, Autumn 2026, pp. 173-190
www.gsjournal.ir

Original Research Paper

Impact of the Gourieh earthquake swarm on groundwater hydrochemistry in the Dezful Embayment and Zagros Folded Belt

Yaghoub Jalili Shahmansouri*[1] and Yasaman Jahangiri[1]

[1]Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 2025 December 20
Accepted: 2026 June 29
Available online: 2026 September 23

Keywords:
Earthquake swarm
Physicochemical Parameters
Aquifer
Guriyeh
Shushtar
Mianab

ABSTRACT

The effects of the Guriyeh earthquake swarm (November 2017–July 2018) on groundwater hydrochemistry were examined in northeastern Khuzestan Province. Production-well data from 2004 to 2019 were used to evaluate changes in EC, TDS, pH, and the concentrations of major ions (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-, and SO_4^{2-}) across two time periods, defined as before and after the earthquake swarm. The results show that seismic activity, particularly where earthquake epicenters are densely clustered, altered groundwater flow systems by opening fractures and increasing fault permeability. These structural changes were accompanied by clear shifts in both the magnitude and spatial distribution of groundwater chemical parameters. Following the earthquake swarm, EC and TDS increased noticeably along active fault zones and in areas of intense seismicity, pointing to the contribution of deeper and more saline fluids to the aquifer system. Changes were also evident in the spatial patterns of major ions. Before the earthquake swarm, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, and Cl^- displayed relatively broad and region-scale distributions, whereas after the swarm they became more localized and clustered. This shift suggests a reactivation of fault-controlled hydrogeological pathways. These observations indicate a close link between seismicity, fault structures, and the alluvial aquifer system.

1. Introduction

Aquifer systems commonly experience both chemical and physical perturbations during and following seismic events. Chemical responses typically include changes in groundwater hydrochemistry, turbidity, and the concentrations of isotopic constituents (Andrén et al., 2016; Kim et al., 2023). Physical responses may involve variations in groundwater temperature, water-table levels, spring discharge, and river flow rates (Montgomery and Manga, 2003). Seismic activity can trigger either abrupt or long-term modifications in aquifers, which are highly sensitive to tectonic stresses and ground shaking. These responses may result in alterations of groundwater physicochemical properties, with important implications for human health, agricultural systems, and environmental sustainability.

* Corresponding author: Yaghoub Jalili Shahmansouri; E-mail: yjalili@scu.ac.ir

Citation:
Jalili Shahmansouri, Y., and Jahangiri, Y., 2026. Impact of the Gourieh earthquake swarm on groundwater hydrochemistry in the Dezful Embayment and Zagros Folded Belt. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(3), 141, 173-190. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.566761.2241.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2026.566761.2241 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.9.1

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

A growing body of research has demonstrated that seismic waves can induce significant fluctuations in groundwater level, temperature, and geochemical composition (Matsumoto et al., 2003; Roeloffs, 1998; Roeloffs et al., 2003; Adinolfi Falcone et al., 2012; Wang et al., 2012; Shi et al., 2015; Kim et al., 2018). Variations in groundwater hydrochemical characteristics may occur during three distinct phases-pre-seismic, co-seismic, and post-seismic-reflecting the combined effects of tectonic and physicochemical processes. These processes directly influence aquifer permeability, pore-pressure regimes, and the ionic composition of groundwater.

Seismic events can induce substantial variations in groundwater levels, hydrochemistry, electrical conductivity (EC), pH, and the concentrations of major ions such as Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^-, Cl^-, and SO_4^{2-} (Hartmann, 2006; Pérez et al., 2008; Tsunogai and Wakita, 1995; Skelton et al., 2014; Hosono and Masaki, 2020). Post-seismic hydrochemical monitoring provides a valuable tool to evaluate the influence of fault activity on aquifer physicochemical parameters. Previous studies have also shown that seismic waves can trigger significant fluctuations in groundwater level, temperature, and geochemical composition, reflecting complex interactions between tectonic and hydrogeological processes (Matsumoto et al., 2003; Roeloffs, 1998; Roeloffs et al., 2003; Adinolfi Falcone et al., 2012; Wang et al., 2012; Shi et al., 2015; Kim et al., 2018).

Between November 2017 and July 2018, a nine-month earthquake swarm occurred in the Shushtar and Mian-Ab aquifers in northeastern Khuzestan Province, southwestern Iran (Fig. 1). Surface faults, including the Shushtar, Sardarabad, and Shahur faults, as well as subsurface structures such as buried lineaments and basement faults, control seismicity in the Gourieh area, with focal mechanisms indicating predominantly compressional faulting accompanied locally by right-lateral strike-slip components (Mombeni Salehi, 2021; Charchi et al., 2021). Previous research has examined the impact of this swarm on physical groundwater parameters, particularly water-table fluctuations, highlighting the role of northeast–southwest-trending faults (Jalili et al., 2025). However, the effects on groundwater hydrochemistry remain unexplored.

This study investigates changes in hydrochemical parameters—including K^{+}, Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, EC, pH, and total dissolved solids (TDS)—before and after the Gourieh earthquake swarm. By evaluating the influence of fault structures on groundwater quality, the study aims to improve understanding of subsurface flow dynamics, recent fault activity, and the hydrogeochemical stability of the Shushtar and Mian-Ab aquifers under tectonic stress.

2. Research methodology

To evaluate the impact of the Gourieh earthquake swarm on the physicochemical parameters of groundwater in southeastern Shushtar, geological maps, previous studies, production-well data, and seismic records were utilized. Geological maps at a 1:100,000 scale were used to assess the regional geology, while previous studies provided information on seismicity and active faults in the area. Given the occurrence of the Gourieh earthquake swarm in November 2017, production-well data from 2004 to 2019 were divided into two periods: pre-swarm (2004–November 2017) and post-swarm (November 2017–2019) (Fig. 3). Spatial distribution maps of hydrochemical parameters were generated using statistical data from production wells in the ArcGIS environment. Kriging interpolation was applied to estimate groundwater quality parameters across the study area and to produce continuous distribution maps. These maps were then used to analyze and evaluate temporal and spatial variations in the concentrations of major ions and other water-quality parameters before and after the Gourieh earthquake swarm within the Shushtar and Mian-Ab aquifers. This approach allowed the assessment of earthquake-induced changes in groundwater chemistry and their spatial correlation with local hydrogeological and structural features.

3. Results

Due to the limited availability of groundwater well data, which were only accessible from 2004 to 2019, earthquake epicenters within the same period were considered for analysis. During the first period (2004-November 2017), 583 earthquakes occurred at depths ranging from 1 to 36 km (mean 11.8 km) with magnitudes of 2.5-5.2 (mean 2.97) (Fig. 3). Earthquakes during this period were predominantly low-magnitude and distributed at moderate to deep depths. In the second period (November 2017-2019), 669 earthquakes occurred at depths of 5-28 km (mean 12.8 km) with magnitudes of 2.5-5.0 (mean 2.97), displaying a wider range of depths and magnitudes, including events up to 4.4. Figures 4 to 13 illustrate the spatial distribution of hydrochemical parameters prior to and following the earthquake swarm in November 2017.

4. Discussions

Analysis of hydrochemical parameters in the Shushtar and Mian-Ab aquifers before and after the November 2017 Gourieh earthquake swarm (Figs. 4–13) indicates that recent seismic events not only induced structural deformations in the regional geology but also directly and indirectly affected the chemical composition of groundwater. Spatiotemporal patterns of hydrochemical parameters suggest that reactivation of fractures, increased fluid pressures, vertical flow displacement, and reorganization of subsurface pathways played a critical role in aquifer chemical evolution following the earthquake swarm.

Pre-seismic electrical conductivity (EC) maps show elevated values concentrated in the southern and southeastern aquifer zones, coinciding with earthquake epicenters (Fig. 4), suggesting preferential fluid pathways along faults. After the swarm, seismic density increased in central and southern regions, accompanied by

corresponding EC maxima, indicating that fracture opening and the upward migration of deeper, more conductive fluids significantly contributed to EC enhancement. Multiple seismic events likely reactivated minor fractures and facilitated deeper flow, introducing high-EC fluids into the shallow aquifer system. Previous studies similarly reported that fluid release along strike-slip and thrust faults, driven by increased pore pressure and tensile fracturing, can elevate EC and alter groundwater chemistry (Wang and Manga, 2015; Rosen et al., 2018; Kim et al., 2018), particularly near fault intersections with active aquifers.

Total dissolved solids (TDS) exhibited similar behavior, with marked post-swarm increases along central and southern faults (Fig. 5). This pattern reflects the combined effects of deep fluid input, enhanced mineral dissolution, and altered hydrodynamics due to fault reactivation. Such earthquake-induced processes redistribute solutes, mobilize deep saline waters, and are consistent with observations from seismically active regions in Japan and South Korea (Hosono and Masaki, 2020; Lee et al., 2020).

Bicarbonate (HCO_3^-) concentrations were initially high in central, southern, and southeastern zones, reflecting prolonged water–carbonate rock interactions (Fig. 6). Following the swarm, localized HCO_3^- decreases coincided with epicentral areas, likely due to deep fluid intrusion with lower CO_2, dilution from newly injected waters, or shifts in carbonate/bicarbonate equilibrium. Spatial overlap between HCO_3^- depletion zones and the earthquake swarm supports the role of seismic activity in modifying carbonate-related ions, consistent with studies showing that ground shaking mobilizes fluids stored in fractures and pore spaces (Rosen et al., 2018; Hosono and Masaki, 2020; Zhou et al., 2021).

Sodium (Na^+) concentrations, initially elevated along southern faults, decreased in central and southern regions post-swarm with patchy distribution at margins (Fig. 7), suggesting mixing between deep saline and shallow fresher waters, multi-source fluid interactions, or hydrostatic pressure changes along fault zones. Magnesium (Mg^{2+}) exhibited increased concentrations but in more spatially restricted zones near active faults (Fig. 8), indicating focused flow through fault-controlled pathways and enhanced ionic exchange in dolomitic environments. Potassium (K^+) concentrations shifted from broad pre-swarm zones to localized clusters along faults and epicenters post-swarm (Fig. 9), reflecting channelized flow and focused input of deep K^+-rich fluids.

pH patterns transitioned from a continuous neutral–alkaline distribution to patchy, localized zones post-swarm (Fig. 10), likely reflecting intrusion of deeper acidic fluids, shifts in HCO_3^-/CO_2 ratios, redox changes along newly activated fractures, and localized water–rock interactions. Chloride (Cl^-), calcium (Ca^{2+}), and sulfate (SO_4^{2-}) displayed similar post-seismic patterns (Fig. 11–13), with spatial contraction and channelized or localized maxima along faults, consistent with upward migration of saline fluids (Cl^-), enhanced carbonate dissolution (Ca^{2+}), and local redox or evaporative processes (SO_4^{2-}).

Collectively, these observations indicate that the Gourieh earthquake swarm transformed the aquifer system from a broadly homogeneous hydrochemical regime to a structurally controlled, locally heterogeneous system. The spatial correspondence between hydrochemical anomalies and active fault zones highlights the pivotal role of fault reactivation in modulating groundwater chemistry in the Shushtar and Mian-Ab aquifers following seismic activity.

5. Conclusion

This study integrates seismic, hydrochemical, and structural data to demonstrate that the Gourieh area in southeastern Shushtar is significantly influenced by the convergence of the Arabian and Iranian plates and by the activity of a hidden fault. The spatial density and orientation of earthquake epicenters between 2004 and 2019, their overlap with groundwater level and depth variations, and the alignment of water quality patterns with fault structures collectively indicate the presence and reactivation of a fault system in this region.

Comparative analysis of hydrochemical parameters before and after the November 2017 earthquake swarm reveals that recent seismic events not only induced subsurface rearrangements, increased permeability, and fracture reactivation, but also caused significant changes in the chemical composition of the Shushtar and Mian-Ab aquifers. Post-seismic increases in electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) along central and southern faults, coinciding with a spatial shift in parameter maxima, indicate the upward migration of deeper, more saline fluids into shallower aquifer zones. These observations are consistent with global findings that associate earthquakes with fluid release, elevated pore pressures, and fracture dilation.

Major ions including HCO_3^-, Na^+, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, Ca^{2+}, and SO_4^{2-} exhibited similar patterns. Pre-seismic broad-scale distributions transitioned to channelized, patchy, and localized concentrations along faults, reflecting the strong structural control exerted on groundwater geochemistry following seismic activity. Specifically, decreases in HCO_3^- in central and southern zones, localized increases in Mg^{2+}, reductions in Na^+, and the spatial concentration of K^+ indicate mixing of fluids from multiple sources, the upward release of deep carbonate- and salt-rich waters, and reorganization of subsurface flow along reactivated fault structures. Localized pH changes further support the intrusion of chemically distinct fluids and alterations in redox conditions.

Overall, these results underscore the critical role of fault-controlled processes in modulating hydrochemical dynamics in the Shushtar and Mian-Ab aquifers and highlight the sensitivity of these groundwater systems to seismic perturbations.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۱۴۰۵، دوره ۳۶، شماره ۳، پیاپی ۱۴۱، صفحه ۱۷۳ تا ۱۹۰

مقاله پژوهشی

پیوند صفحه نخست: www.gsjournal.ir

اثر فوج لرزه‌های گوریه بر روی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی در جنوب خاوری شوشتر، فروبار دزفول، کمربند چین‌خورده زاگرس

یعقوب جلیلی شاه‌منصوری*[1] و یاسمن جهانگیری[1]

[1] گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

فوج لرزه

پارامترهای فیزیکوشیمیایی

آبخوان

گوریه

شوشتر

میان‌آب

چکیده

در این مطالعه اثر فوج لرزه‌های گوریه که طی آبان ۱۳۹۶ تا تیر ۱۳۹۷ در محدوده آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب در شمال‌خاوری خوزستان رخ داد، با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری بر روی سطح آب ایستابی و هیدروشیمی آب زیرزمینی بررسی گردید. این پژوهش با استفاده از داده‌های چاه‌های بهره‌برداری طی دوره ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، نقشه‌های زمین‌شناسی و بولتن زمین‌لرزه‌ها، به ارزیابی سطح آب ایستابی و تغییرات پارامترهای pH، TDS، EC و غلظت یون‌های اصلی (SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^-، Mg^{2+}، Ca^{2+}، K^+، Na^+) در دو بازه زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌ها پرداخته است. نتایج پهنه‌بندی مکانی داده‌ها که با روش کریجینگ در محیط GIS انجام شد، نشان می‌دهد که رخدادهای لرزه‌ای هم‌زمان با تراکم کانون‌های زلزله، موجب تغییرات ساختاری در مسیرهای جریان زیرزمینی، بازشدگی شکستگی‌ها و افزایش نفوذپذیری گسل‌ها شده و در پی آن، تغییرات معنی‌داری در توزیع مکانی و مقدار پارامترهای شیمیایی ایجاد شده است. در بازه زمانی بعد از فوج لرزه‌ها، افزایش شایان‌توجه EC و TDS در امتداد گسل‌های فعال و نواحی دارای بیشترین تراکم لرزه‌ها مشاهده شد که بیانگر ورود سیالات ژرف‌تر و شورتر به آبخوان‌ها است. همچنین الگوهای پهنه‌بندی یون‌های SO_4^{2-}، Mg^{2+}، Ca^{2+}، Na^+ و Cl^- از تغییرات گسترده و پهنه‌ای در دوره پیش از فوج لرزه‌ها به تمرکزهای موضعی و خوشه‌ای در دوره پس از فوج لرزه‌ها تبدیل شده‌اند که نشان‌دهنده فعال‌شدن مجدد مسیرهای هیدروژئولوژیکی در راستای گسل‌ها است. در مقابل، کاهش غلظت SO_4 و افزایش غلظت pH در بخش‌های مرکزی و جنوبی با افزایش رخدادهای لرزه‌ای هم‌زمان بوده و احتمالاً ناشی از تغییرات فشار منفذی، افزایش تبادل آب ـ سنگ و جابه‌جایی آب‌های کم‌ژرفا و ژرف است. برهم‌کنش بین لرزه‌خیزی، ساختارهای گسلی و سامانه آبخوان‌های آبرفتی منطقه نشان می‌دهد که فوج لرزه‌های گوریه اثر مستقیم و قابل تشخیصی بر پایداری هیدروشیمیایی آبخوان‌ها داشته و می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای شناسایی گسل‌های پنهان و مسیرهای ترجیحی جریان زیرسطحی به‌کار رود.

۱- پیش‌نوشتار

آبخوان‌ها در هنگام زمین‌لرزه و پس از آن دچار تغییرات فیزیکی و شیمیایی می‌شوند که تغییرات شیمیایی معمولا می‌تواند شامل تغییر در هیدروشیمی، کدورت و غلظت عناصر ایزوتوپی آب باشد (Andrén et al., 2016; Kim et al., 2023). تغییرات فیزیکی ممکن است شامل: تغییر در دمای آب، سطح ایستابی، تغییر در آب‌دهی چشمه‌ها و همچنین آب‌دهی (دبی) رودخانه‌ها باشد (Montgomery and Manga, 2003). فعالیت‌های لرزه‌ای می‌توانند به تغییرات ناگهانی یا بلندمدت در آبخوان‌ها بیانجامند که نسبت به تنش‌ها و ارتعاشات زمین‌ساختی حساسیت بالایی دارند. این تغییرات ممکن است به دگرگونی در پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی بیانجامند که پیامدهایی برای سلامت انسان، کشاورزی و محیط زیست به همراه دارد.

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که امواج لرزه‌ای قادرند نوسانات شایان توجهی در سطح ایستابی، دما و ترکیب ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی ایجاد کنند (Matsumoto et al., 2003; Roeloffs, 1998; Roeloffs et al., 2003; Adinolfi Falcone et al., 2012; Wang et al., 2012; Shi et al., 2015; Kim et al., 2018). تغییرات در ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی ممکن است در ۳ مرحله پیش‌لرزه‌ای، هم‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای بروز کنند. این تغییرات حاصل مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌ساختی و فیزیکوشیمیایی هستند که به‌طور مستقیم بر تراوایی، فشار منفذی، و ترکیب یونی آب تاثیر می‌گذارند.

رخداد زمین لرزه‌ها می‌توانند تغییرات شایان توجهی در سطح ایستابی، ترکیب

* نویسنده مسئول: یعقوب جلیلی شاه‌منصوری؛ E-mail: y.jalili@scu.ac.ir

ماخذنگاری:

جلیلی شاه‌منصوری، ی.، و جهانگیری، ی.، ۱۴۰۵، اثر فوج لرزه‌های گوریه بر روی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی در جنوب خاوری شوشتر، فروبار دزفول، کمربند چین‌خورده زاگرس. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۳)، ۱۴۱، ۱۷۳-۱۹۰. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.566761.2241

doi: 10.22071/gsj.2026.566761.2241 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.9.1

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

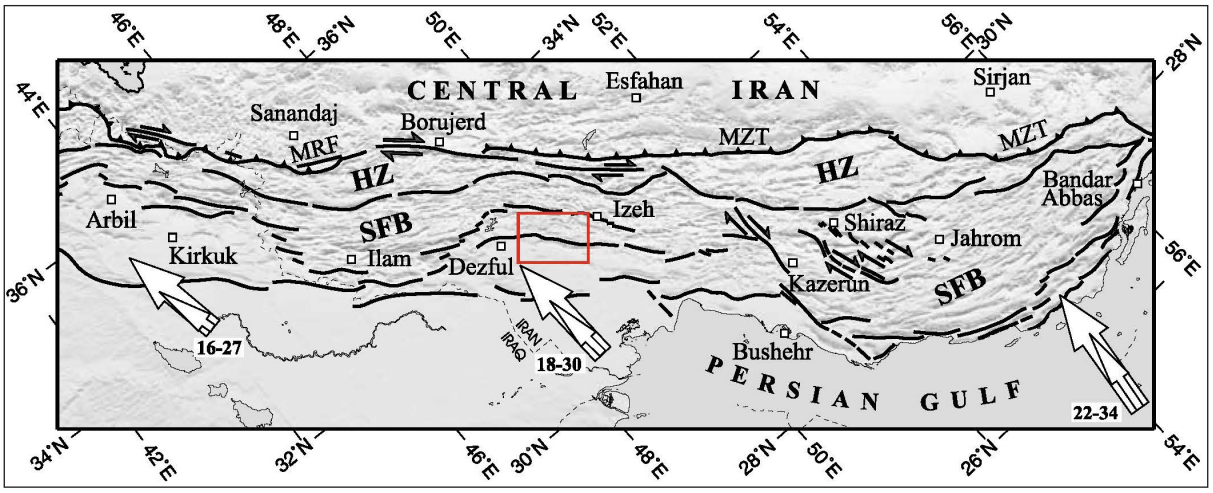
یونی، رسانایی الکتریکی (EC)، pH، و غلظت یون‌های اصلی مانند Na^+، Mg^{2+}، Ca^{2+}، Cl^-، HCO_3^-، K^+ و SO_4^{2-} ایجاد کنند. بررسی این تغییرات در شرایط پسازلزله‌ای ابزاری کارآمد برای تفسیر اثر گسل‌ها بر روی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی می‌باشند (Hartmann, 2006; Pérez et al., 2008; Tsunogai and Wakita, 1995; Skelton et al., 2014; Hosono and Masaki, 2020).

حد فاصل بین آبان ماه ۱۳۹۶ تا تیر ماه ۱۳۹۷ به مدت تقریبی ۹ ماه، فوج لرزه‌ای در محدوده آبخوان‌های شوشتر و میان آب در جنوب باختری ایران، شمال خاوری استان خوزستان و در منطقه گوریه رخ داده است. مطالعات پیشین نشان داد که عملکرد گسل‌های سطحی مانند گسل‌های شوشتر، سردارآباد و شاهور و ساختارهای زیرسطحی مانند خطواره‌های زیرسطحی و گسل پی‌سنگی با روندهای عربی و زاگرسی در لرزه‌خیزی منطقه گوریه تاثیر دارند (مومبنی صالحی، ۱۳۹۹؛ چرچی و همکاران، ۱۳۹۹). سازوکار کانونی ارائه شده برای زمین‌لرزه‌های این محدوده، سازوکار فشاری و در مواردی همراه با مولفه امتدادلغز راست‌گرد برای گسل‌های مسبب لرزه‌خیزی محدوده گوریه را نشان می‌دهد (چرچی و همکاران، ۱۳۹۹). اثر فوج لرزه‌های گوریه بر روی پارامترهای فیزیکی مانند تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی در آبخوان‌های محدوده شوشتر و میان آب متاثر از فوج لرزه‌های گوریه نیز مطالعه شده است که نشان می‌دهد گسل‌های با روند شمال خاوری ـ جنوب باختری نقش مهم‌تری در لرزه‌خیزی محدوده گوریه داشته‌اند (جلیلی و همکاران، ۱۴۰۴). در این مطالعه نقشه‌های ژرف سطح ایستابی آب زیرزمینی نشان داد که این منحنی‌ها در محدوده پراکنش فوج لرزه‌ها تغییرات آشکاری را نشان می‌دهند. بررسی گسل‌های شناسایی شده در محدوده گوریه نشان داد که راستای پراکنش کانون‌های زمین‌لرزه و راستای تغییرات ژرفای سطح ایستابی آب زیرزمینی با خطواره زمین‌ساختی استخراج شده از اطلاعات مغناطیسی با روند شمال خاوری ـ جنوب باختری، همخوانی معناداری را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که می‌توان رخداد فوج زمین‌لرزه‌ها و در ادامه تغییرات سطح آب زیرزمینی را متاثر از فعالیت این گسل پنهان نسبت داد.

با این وجود، اثر این فوج لرزه‌ها بر روی پارامترهای هیدروشیمیایی هنوز بررسی نشده است. با توجه به قرار گرفتن آبخوان‌های شوشتر و میان آب در این منطقه، می‌توان تاثیر این زلزله‌ها را بر روی پارامترهای هیدروشیمیایی پیش و پس از فوج‌لرزه‌ها بررسی نمود.

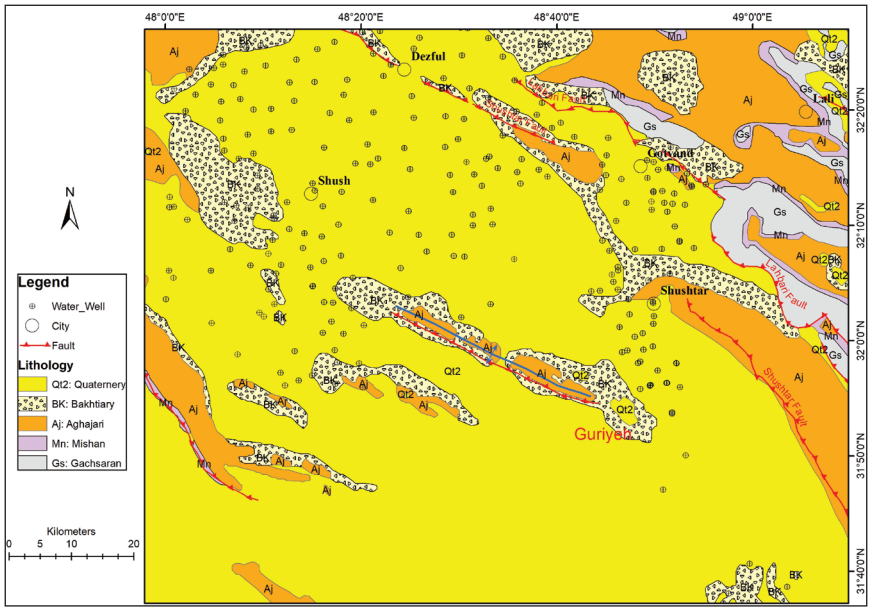
مطالعه تغییرات پارامترهای شیمیایی آبخوان‌های شوشتر و میان آب در ارتباط با فعالیت‌های فوج لرزه‌ی گوریه نه تنها به درک بهتر سازوکارهای انتقال آب‌های زیرزمینی و فعالیت‌های اخیر گسل‌ها کمک می‌کند، بلکه به‌عنوان شاخصی کارآمد برای ارزیابی پایداری هیدروژئوشیمیایی این آبخوان‌ها در برابر تنش‌های زمین‌ساختی مطرح است. در پژوهش حاضر، با تمرکز بر آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب، تغییرات شیمیایی پارامترهای EC، pH، HCO_3^-، SO_4^{2-}، Cl^-، Mg^{2+}، Ca^{2+}، Na^+، K^+ و TDS در بازه‌های زمانی پیش و پس از فوج لرزه منطقه گوریه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است تا نقش ساختارهای گسلی در ایجاد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی منطقه ارزیابی گردد. نتایج این مطالعه در شناسایی منشا تغییرات پارامترهای شیمیایی آبخوان‌های متاثر از گسل‌های فعال، کاربرد خواهد داشت.

محدوده مورد مطالعه در جنوب باختری ایران و در شمال خاوری استان خوزستان و در جنوب شهرستان شوشتر قرار دارد. این منطقه از نظر زمین‌ساختی در پهنه کمربند چین‌خورده ـ رانده زاگرس و در بخش فروبار دزفول قرار دارد (شکل ۱). رخنمون‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه شامل سازند آسماری، سازند گچساران، سازند آغاجاری، و نهشته‌های آبرفتی کواترنر می‌باشند (شکل ۲). نهشته‌های آبرفتی به‌طور عمده در مناطق دشتی مانند گوریه گسترش دارند و بیشترین پتانسیل برای تشکیل آبخوان‌های آزاد و تحت‌فشار را دارا هستند. آبخوان‌های منطقه شوشتر و میان آب بیشتر از نوع آبرفتی هستند. در دشت شوشتر، بسته به ساختار زمین‌شناسی، آبخوان‌ها به صورت آزاد در مناطق سطحی و به‌صورت تحت فشار در نواحی با پوشش رسی مشاهده می‌شوند. در منطقه گوریه، بیشتر آبخوان‌ها آزاد هستند اما با گسترش سازندهای رسی یا آهکی در برخی نقاط، آبخوان نیمه‌محصور نیز گزارش شده است. منطقه گوریه در حاشیه دشت آبرفتی قرار دارد و با توجه به قرارگیری روی بخش‌هایی از سازند آغاجاری، در برخی نقاط نیز جریان آب زیرزمینی در امتداد شکستگی‌ها رخ می‌دهد (به‌ویژه در مناطق کوهپایه‌ای).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کمربند چین‌خورده ـ رانده زاگرس (Talebian and Jackson, 2004).

Figure 1. The location of the study area within the Zagros Fold–Thrust Belt (Talebian and Jackson, 2004).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه. بر روی نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه گوریه و هم چنین رو مرکز زمین لرزه‌ها نشان داده شده است.

Figure 2. Geological map of the study area, showing the geographic location of the Guriyeh area and the distribution of earthquake epicenters.

مطالعات پیشین نشان دادند که طبق نقشه‌ها و لایه‌های تولید شده، آبخوان دشت میان‌آب به‌صورت آزاد و تک‌لایه تشخیص داده شد همچنین شمال دشت به‌دلیل وجود رسوبات دانه درشت دارای، هدایت هیدرولیکی، ضریب آب‌گذری بالاتر و کیفیت مناسب‌تر می‌باشد (شیخی‌بگلری و همکاران، ۱۳۹۷). جهت جریان عمومی آبخوان از شمال به جنوب دشت می‌باشد و طبق نقشه تراز آب زیرزمینی، آبخوان میان آب از رودخانه‌های موجود در منطقه به‌ویژه در نواحی شمالی تغذیه می‌شود. همچنین نقشه هم میزان کلر نشان داد که میزان کلر از شمال دشت به سمت جنوب افزوده می‌شود و مشخص شد کیفیت آب زیرزمینی دشت میان‌آب در بیشتر مناطق در رده متوسط بوده و کیفیت آب زیرزمینی برای زراعت و کشاورزی نامناسب است (اکبری و همکاران، ۱۳۸۵؛ حفیظی و همکاران، ۱۳۹۶).

گسل‌های مهم و گسل‌های فعال از نظر لرزه‌خیزی در محدوده مورد مطالعه شامل راندگی‌های شوشتر (رامهرمز)، لهبری، شاهوار و سردار آباد می‌باشند. راندگی شوشتر (رامهرمز) با روند شمال باختری ـ جنوب خاوری یکی از مهم‌ترین گسل‌های لرزه‌خیز در استان خوزستان می‌باشد که از بخش شمالی محدوده مورد مطالعه عبور می‌کند و سبب رانده‌شدن سازند گچساران بر روی سازندهای جوان‌تر و رسوبات کواترنر شده است (Berberian and Kings, 1981; Talbot and Alavi, 1996). گسل لهبری یکی دیگر از راندگی‌های مهم منطقه می‌باشد که دارای روند شمال باختری ـ جنوب خاوری می‌باشد و در بخش شمالی محدوده مورد مطالعه قرار دارد. این راندگی سبب رانده شدن سازند گچساران بر روی سازند آغاجاری گردیده است. افزون بر گسل‌های ناحیه‌ای، در میانه محدوده مورد مطالعه، به‌واسطه عملکرد گسل‌هایی همچون سردارآباد و شاهور با جهت چیره N120°، ارتفاعات و ناهمواری‌های مجزایی در میان دشت ایجاد گشته و سبب رانده شدن سازند آغاجاری و لهبری بر روی سازند بختیاری شده است (هوشمند، ۱۳۹۸؛ چرچی و همکاران، ۱۳۹۹). گسل‌های پنهان با روند شمال خاوری ـ جنوب باختری تنها بر اساس خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده است و تاکنون شواهد زمین‌شناسی در ارتباط با این گسل‌ها در محدوده گوریه مطالعه‌ای انجام نشده است.

۲- روش پژوهش

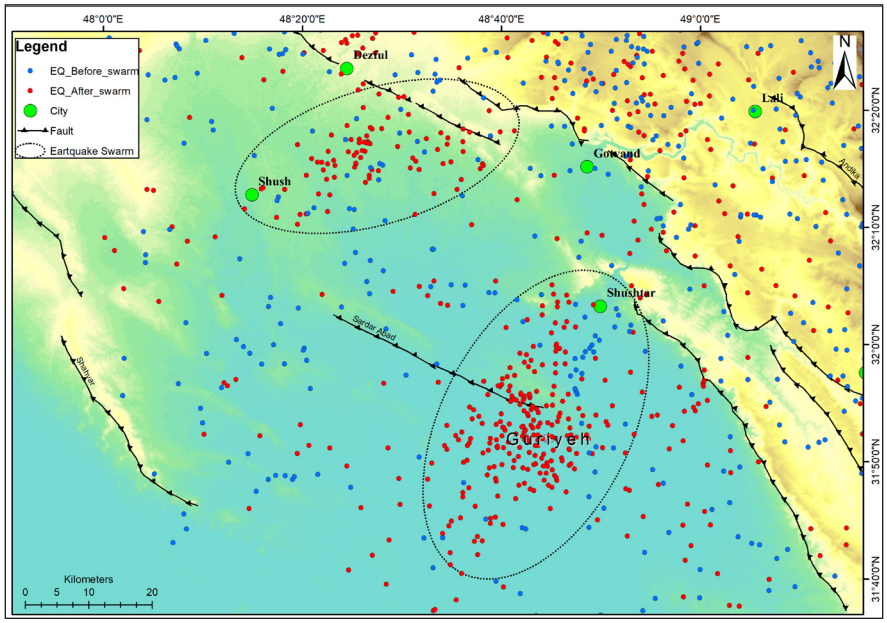
به منظور بررسی تاثیر فوج لرزه‌های گوریه بر روی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی در جنوب خاوری شوشتر، از نقشه‌های زمین‌شناسی، مطالعات پیشین، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای (سازمان آب و برق خوزستان، ۱۴۰۴) و همچنین اطلاعات مربوط به زمین‌لرزه‌ها (برگرفته از بولتن زمین‌لرزه‌ها، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۱۴۰۴) استفاده گردید. نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱۰۰,۰۰۰ برای بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه و از مطالعات پیشین برای بررسی وضعیت لرزه‌خیزی و گسل‌های فعال منطقه استفاده گردید. با توجه به رخداد فوج لرزه‌های گوریه در آبان ۱۳۹۶، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ به دو بازه زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌ها تقسیم شده‌اند. بازه زمانی اول از سال ۱۳۸۳ تا آبان ماه ۱۳۹۶ و بازه زمانی دوم از آبان ماه سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ می‌باشد (شکل ۳). به منظور بررسی و مقایسه غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی و یون‌ها بین دو بازه زمانی پیش از فوج‌لرزه‌ها و پس از فوج‌لرزه‌ها، نمودارهای تغییرات غلظت آن‌ها از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷ رسم شد (شکل ۶). نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر با استفاده از داده‌های آماری چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای در محیط نرم‌افزار ARC GIS تهیه گردید. برای میان‌یابی داده‌های کیفیت و کمی آب در محدوده مورد مطالعه و ایجاد این نقشه‌ها، از روش کریجینگ (Kriging) استفاده شد. با استفاده از این نقشه‌ها، وضعیت ژرفای سطح آب در چاه‌ها، سطح تراز آب زیرزمینی و تغییرات پراکنش غلظت عناصر موثر بر کیفیت آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌های رخ داده در محدوده آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب، بررسی و تحلیل گردیده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

با توجه به محدودیت اطلاعات چاه‌های آب زیرزمینی که این اطلاعات تنها در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ در دسترس بودند، کانون‌های زمین‌لرزه‌ای که در همین بازه زمانی رخ داده‌اند در نظر گرفته شدند. در بازه زمانی اول از سال ۱۳۸۳ تا آبان

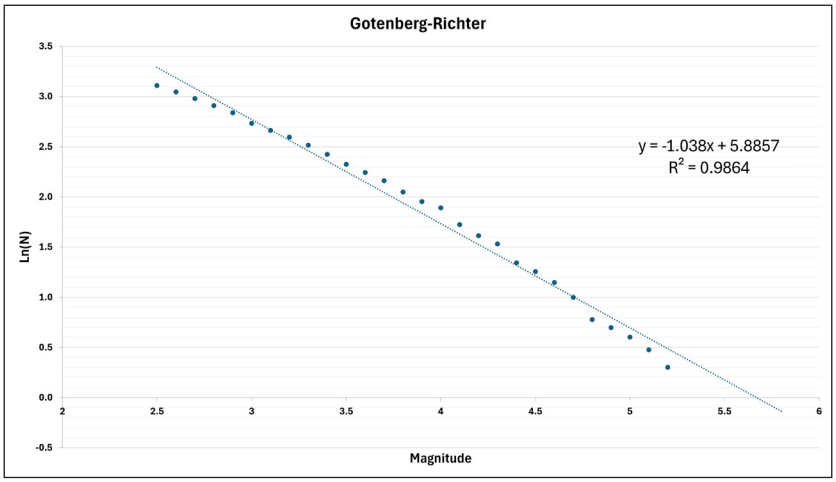
ماه سال ۱۳۹۶، تعداد ۵۸۳ کانون زمین‌لرزه با ژرفای ۱ تا ۳۶ کیلومتر (میانگین ۱۱/۸ کیلومتر) و بزرگی ۲/۵ تا ۵/۲ ریشتر (میانگین ۲/۹۷ ریشتر) رخ داده است (شکل ۳). در این بازه زمانی، پراکندگی زلزله‌هایی با ژرفاهای متوسط تا زیاد و اغلب با بزرگی کم دیده می‌شود. در بازه دوم از آبان ماه سال ۱۳۹۶ تا سال ۱۳۹۸ تعداد ۶۶۹ زمین‌لرزه با ژرفای ۵ تا ۲۸ کیلومتر (میانگین ۱۲/۸۱ کیلومتر) و بزرگی ۲/۵ تا ۵ ریشتر (میانگین ۲/۹۷ ریشتر) رخ داده است. در این بازه زمانی پراکندگی زلزله‌های کم‌ژرفا تا ژرف و بزرگی کم تا زیاد (تا ۴/۴ ریشتر) به فراوانی دیده می‌شود.

بر اساس داده‌های زمین لرزه‌های محدوده گوریه در بازه زمانی۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ نمودار گوتنبرگ ـ ریشتر رسم گردید و پارامترهای a، b و Mc محاسبه گردید (شکل ۴). با توجه به این که مقدار Mc حدود ۲/۶۵ تخمین زده شد داده‌های کوچک‌تر از آن توالی‌ها حذف شدند.



شکل ۳- موقعیت کانون‌های زمین‌لرزه و فوج لرزه‌ها بر روی تصویر توپوگرافی.

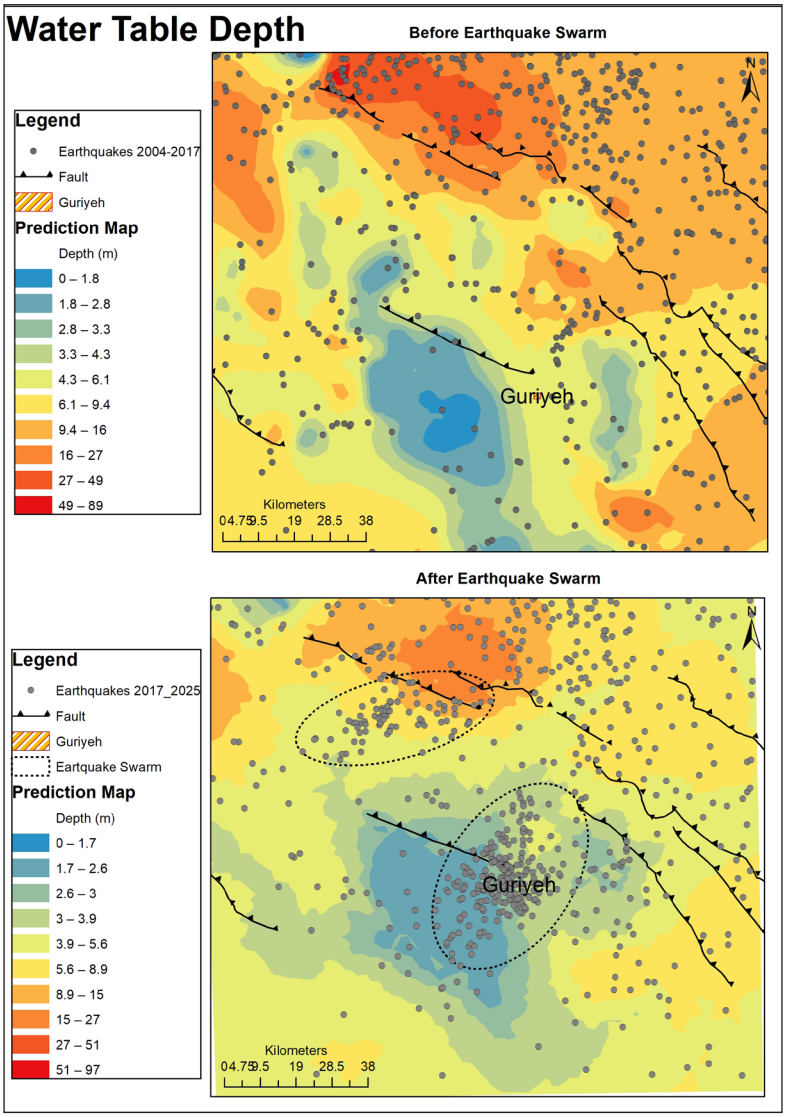
Figure 3. Spatial distribution of earthquake hypocenters and seismic swarms overlaid on the topographic map.



شکل ۴- نمودار محاسبه ضرایب گوتنبرگ- ریشتر.

Figure 4. Gutenberg–Richter frequency–magnitude relationship showing the estimation of the a and b parameters.

– ژرفای سطح ایستابی آب (Water Table Depth): بر اساس نقشه هم‌ژرفای سطح ایستابی آب رسم شده در زمان پیش از فوج لرزه‌ها، بیشترین میزان ژرفا در نواحی مرتفع یا با توپوگرافی مشاهده می‌شود (شکل ۵). به سمت نواحی دشت و کم ارتفاع، ژرفای سطح ایستابی آب کاهش محسوسی نشان می‌دهد. نکته مهم و جالب توجه روند این کاهش و افزایش سطح ایستابی آب، موازی بودن این تغییرات با روند گسل‌های راندگی با راستای شمال باختری ـ جنوب خاوری می‌باشد. در زمان پس از فوج لرزه‌ها، ژرفای سطح ایستابی آب به طور میانگین کمتر شده است. به‌طور مثال در محدوده گوریه نسبت به زمان پیش از فوج لرزه‌ها، ژرفای سطح ایستابی آب کاهش پیدا کرده است. افزون بر این، روند تغییرات ژرفای سطح ایستابی آب نیز در زمان پس از فوج لرزه‌ها متفاوت شده است. به گونه‌ای که روند شمال باختری ـ جنوب خاوری دیگر چیره نیست و اندکی به سمت شمال خاوری ـ جنوب باختری متمایل شده است.

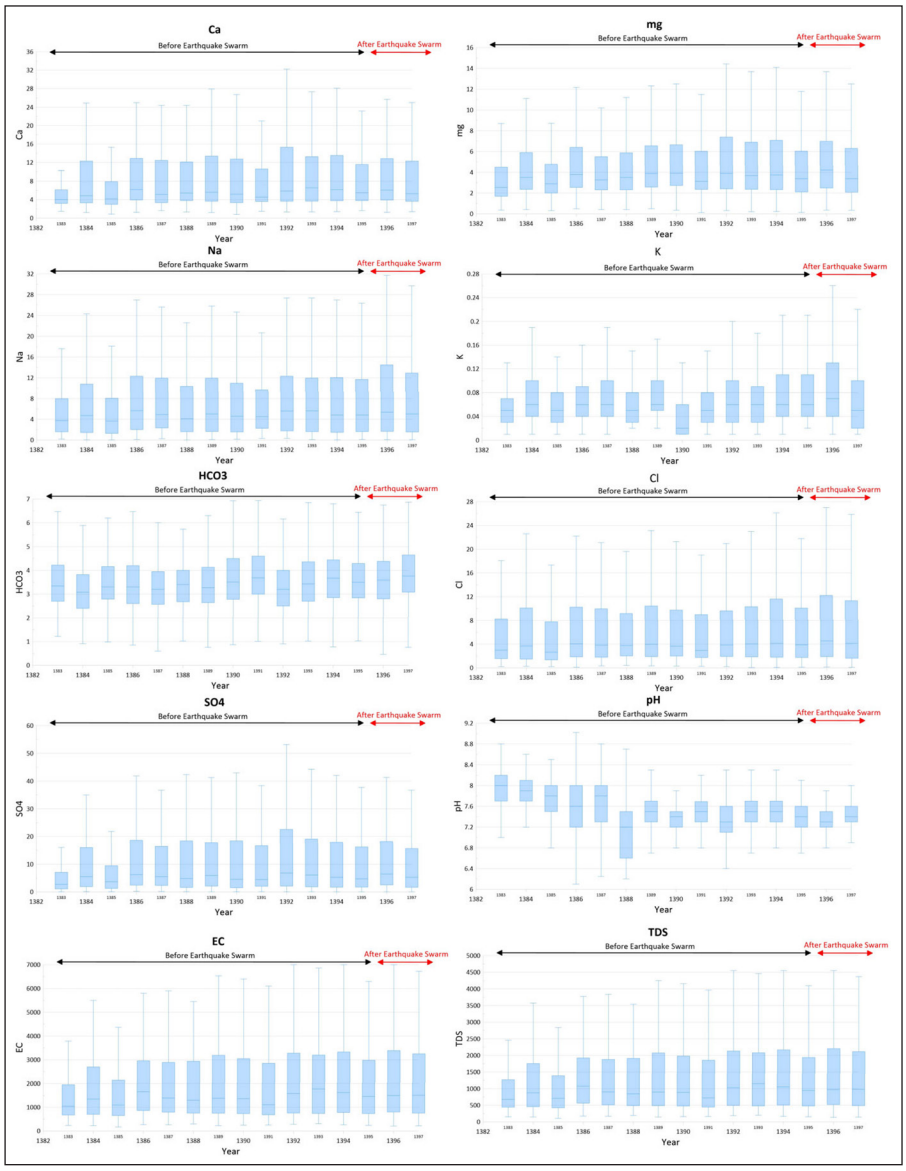


شکل ۵- نقشه‌های ژرفای سطح آب ایستابی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 5. Comparison of groundwater table depth maps before and after the Guriyeh earthquake swarm.

بررسی و مقایسه غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی و یون‌ها بین دو بازه زمانی پیش از فوج‌لرزه‌ها (۱۳۸۳-۱۳۹۶) و پس از فوج‌لرزه‌ها (۱۳۹۶-۱۳۹۸) نشان‌دهنده تغییرات آشکار در بعد عددی است (شکل ۶). نمودارهای تغییرات هدایت الکتریکی (EC)، غلظت کل مواد محلول (TDS) و pH نشان می دهند که میزان غلظت آن‌ها پس از فوج لرزه‌ها نسبت به قبل افزایش پیدا کرده است. همچنین مقادیر یون‌های سدیم (Na) و کلر (Cl) نیز به میزان چشمگیری متاثر از فوج لرزه‌ها افزایش داشته است (شکل ۶). تغییرات غلظت یون سدیم (Na)، یون منیزیم (Mg)، یون پتاسیم (K) و بی‌کربنات (HCO_3) در بازه‌های زمانی پیش و پس از فوج‌لرزه‌ها نشان‌دهنده یک تغییر مکانی ـ زمانی چشمگیر در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به‌وجود آمده است. افزون بر این، فوج لرزه‌ها بر روی مقادیر غلظت SO_4 نیز اثر مستقیم گذاشته‌اند، به‌گونه‌ای که مقادیر SO_4 پس از فوج لرزه‌ها به طرز چشمگیری کاهش پیدا کرده است (شکل ۶). هم‌پوشانی فضایی بین نقاط با تغییر محسوس غلظت یون‌ها و فوج لرزه‌ها، این احتمال را تقویت می‌کند که رخدادهای لرزه‌ای متاثر از فعالیت گسل‌ها، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در تغییر الگوی شیمیایی آبخوان نقش داشته‌اند.

تغییرات آشکار در بعد مکانی پارامترهای هیدروشیمیایی و یون‌ها در بازه‌های زمانی پیش از فوج‌لرزه‌ها و پس از فوج‌لرزه‌ها نیز با مقایسه غلظت آن‌ها کاملا آشکار است (شکل‌های ۷ تا ۱۴).



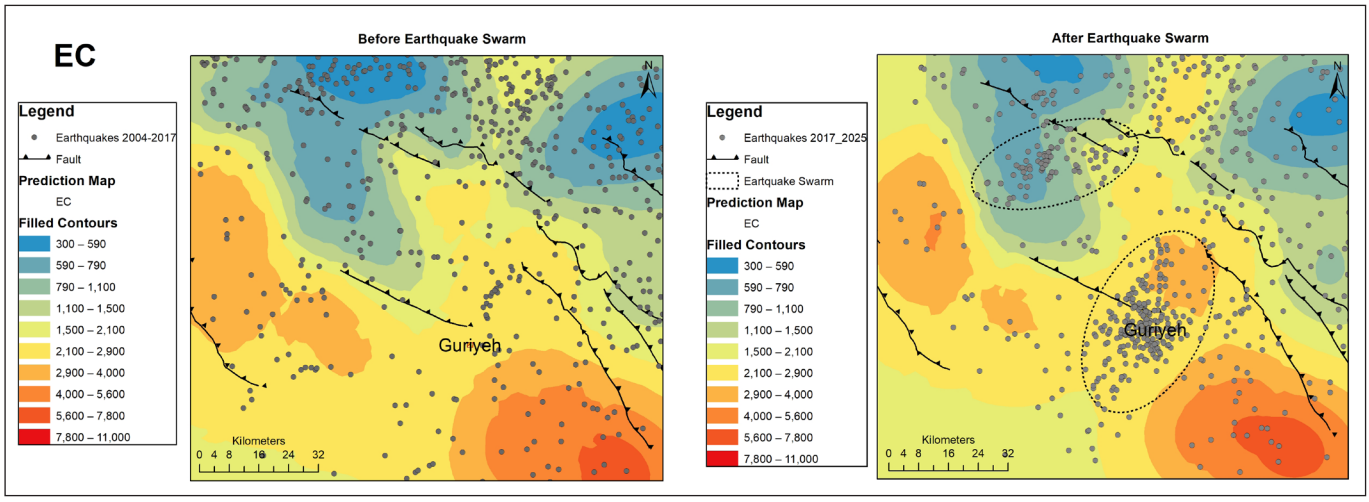
شکل ۶- تغییرات غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی آبخوان از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷. بازه زمانی پیش (Before Earthquake Swarm) و پس از فوج‌لرزه‌ها (After Earthquake Swarm) بر روی نمودارها مشخص گردیده است.

Figure 6. Time-series variations in groundwater hydrochemical parameter concentrations during 2004–2018. The pre-earthquake swarm (Before Earthquake Swarm) and post-earthquake swarm (After Earthquake Swarm) periods are highlighted in the plots.

–هدایت الکتریکی (EC): بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی (EC) در بازه زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌ها، در ناحیه جنوب‌خاوری منطقه است در حالی که کمترین مقدار در نواحی شمال تا شمال‌باختری مشاهده می‌شود (شکل ۷). بر اساس نقشه پهنه‌بندی، هم‌پوشانی مکانی زیادی بین نواحی با EC بالا و کانون زمین‌لرزه‌ها به‌ویژه در جنوب نقشه مشاهده می‌شود. در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها، تراکم زمین‌لرزه‌ها به‌طور چشمگیری در منطقه گوریه و در بخش مرکزی و جنوبی افزایش یافته است. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که در زمان پیش از فوج لرزه‌ها هدایت الکتریکی در محدوه گوریه کم بود و در حالی که بیشینه هدایت الکتریکی در زمان پس از فوج لرزه‌ها در محل تجمع یا تمرکز کانون زمین لرزه‌ها و در نزدیکی منطقه گوریه قرار دارد.

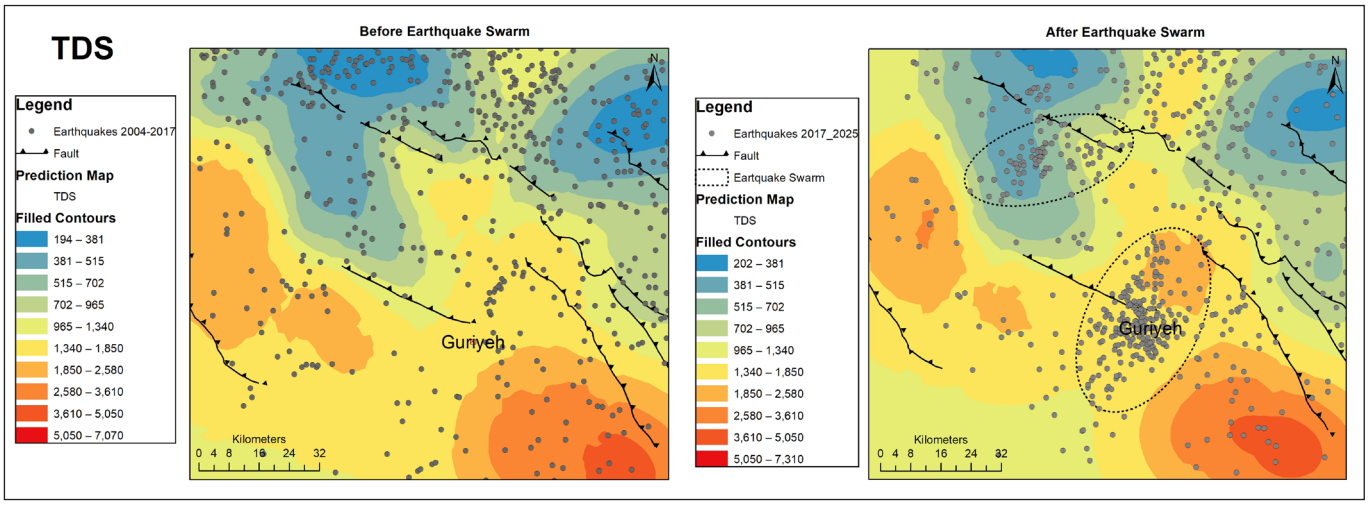
–غلظت کل مواد محلول (TDS): مقایسه غلظت کل مواد محلول (TDS) در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌ها نشان می‌دهد که الگوی پراکندگی و شدت غلظت کل مواد محلول (TDS) در سامانه آبخوان دچار دگرگونی چشمگیری شده است (شکل ۸). در زمان پیش از فوج لرزه‌ها، مقادیر پایین‌تر TDS در بخش‌های شمالی و مرکزی چیره است و با پراکندگی به‌نسبت کم تراکم زمین‌لرزه‌ها هم‌زمانی دارد؛ در حالی‌که پس از فوج لرزه‌ها، افزایش شایان توجهی در مقادیر TDS به‌ویژه در منطقه گوریه و محدوده مرکزی دیده می‌شود که با تراکم بالای کانون زمین‌لرزه‌ها منطبق است. این تغییر بیانگر نقش موثر فعالیت‌های لرزه‌ای اخیر در تغییر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی است.

–یون بی‌کربنات (HCO_3^-): در بازه زمانی پیش از فوج لرزه‌ها، الگوی پهنه‌بندی غلظت یون بی‌کربنات (HCO_3^-) نشان‌دهنده تمرکز مقادیر بالاتر در مناطق شمالی و مرکزی است (شکل ۹)؛ این توزیع می‌تواند ناشی از تماس بیشتر آب‌های زیرزمینی با سنگ‌های کربناته و انحلال کانی‌های کربناته باشد. در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها، افزایش محسوس غلظت HCO_3^- در نواحی مرکزی به‌ویژه در محدوده گوریه مشاهده می‌شود که هم‌زمان با تمرکز بیشتر رخدادهای زمین‌لرزه‌ای در همان محدوده‌ها است. این تغییرات مکانی ـ زمانی بیانگر تاثیر بالقوه فعالیت لرزه‌ای بر ترکیب شیمیایی آبخوان است.



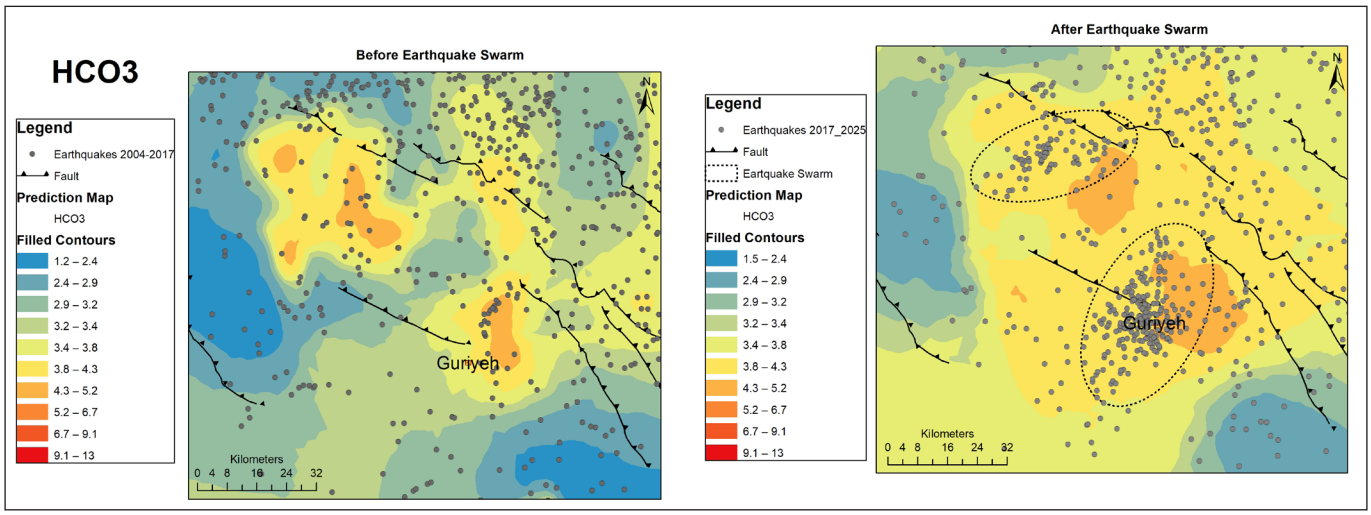
شکل ۷- نقشه‌های توزیع هدایت الکتریکی (EC) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 7. Spatial distribution maps of groundwater electrical conductivity (EC) before and after the Guriyeh earthquake swarm.



شکل ۸- نقشه‌های توزیع غلظت کل مواد محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 8. Spatial distribution maps of total dissolved solids (TDS) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.



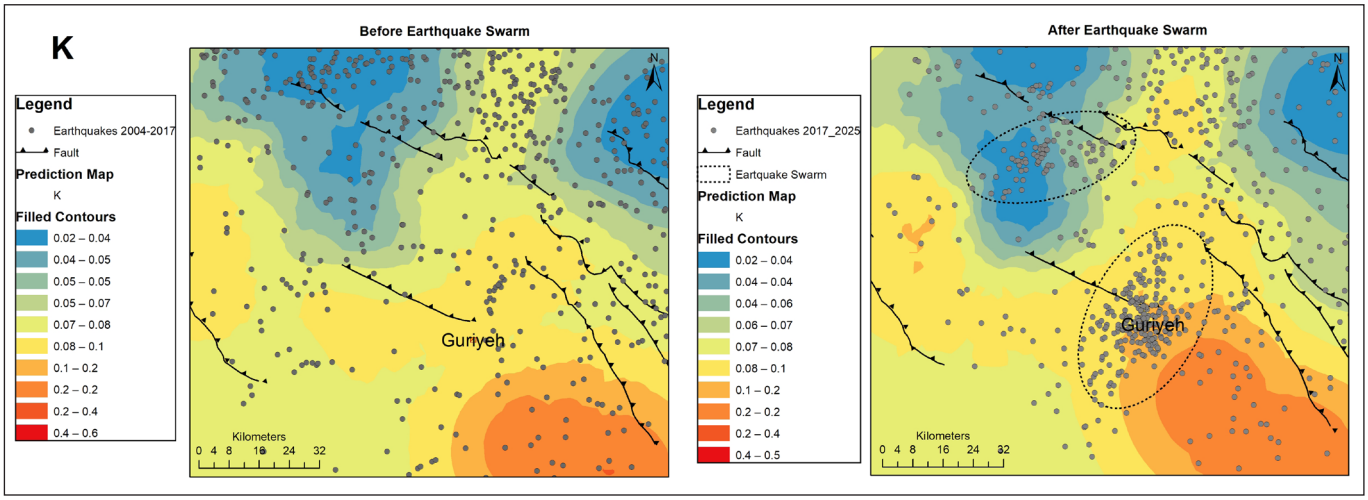
شکل ۹- نقشه‌های توزیع یون بی‌کربنات (HCO_3^-) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 9. Spatial distribution maps of bicarbonate (HCO_3^-) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.

–یون پتاسیم (K^+): مقایسه پهنه‌بندی غلظت یون پتاسیم (K^+) در دو بازه زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌ها نشان‌دهنده یک تغییر آشکار در الگوی فضایی و تمرکز مقدار این یون می‌باشد (شکل ۱۰). در بازه زمانی پیش از فوج لرزه‌ها، پهنه‌های دارای مقادیر بالاتر یون K^+ نسبتا محدود به ناحیه جنوب‌خاوری منطقه بوده که در آن پراکنش زمین‌لرزه‌ها با ژرفاهای متوسط تا زیاد مشاهده می‌شود. در بازه دوم اگرچه محدوده‌هایی با مقدارهای بالای پتاسیم مشاهده می‌شوند، اما این مقادیر به‌صورت موضعی و متمرکز در محل تجمع زمین‌لرزه‌ها و امتداد گسل‌ها به‌ویژه در محدوده گوریه ظاهر شده‌اند؛ در نتیجه پهنه‌های وسیع K^+ بالا در بازه نخست به الگوی نقطه‌ای‌تر و کانال‌گونه‌ای در بازه دوم تبدیل شده‌اند.

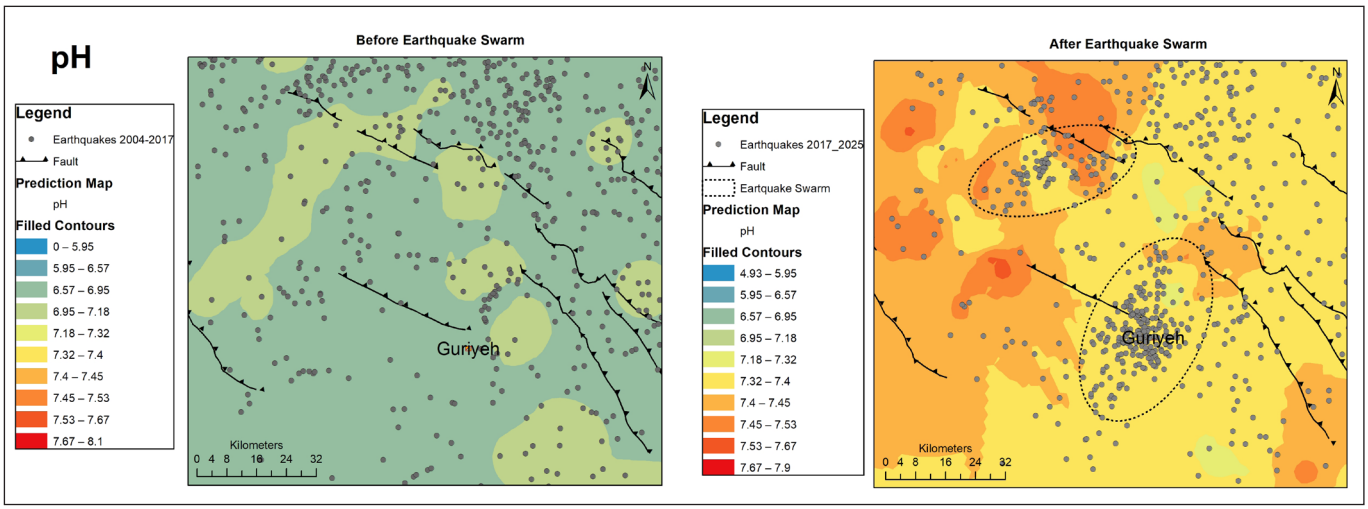
-pH: مقایسه پهنه‌بندی pH بین دو بازه زمانی نشان می‌دهد که الگوی فضایی و پراکندگی pH در دوره پس از فوج لرزه‌ها با پیش از فوج لرزه‌ها تفاوت معناداری داشته است. در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۹۶–۱۳۸۳ مقدار pH عمدتا در محدوده خنثی تا قلیایی قرار داشته و به‌صورت پراکنده در بخش‌های باختری و مرکزی منطقه گسترش داشته است، در حالی‌که در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۹۸–۱۳۹۶ با تمرکز رخدادهای لرزه‌ای، نواحی با pH پایین‌تر در مجاورت گسل‌ها ظاهر شده‌اند و پهنه‌های قلیایی پیوسته به لکه‌های موضعی‌تر و کوچک‌تر تبدیل شدند (شکل ۱۱). پس از فوج لرزه‌ها، توزیع pH تمایل به محلی‌تر و موضعی‌تر شدن داشته و نواحی نزدیک به برخی گسل‌های فعال عمدتا به سمت کاهش pH متمایل شده‌اند. به‌بیان دیگر، تغییر چیره در مقیاس منطقه‌ای به‌صورت «افزایش میانگین محلی و تمرکز موضعی نواحی با pH بالا» تفسیر می‌شود.

–یون کلرید (Cl^-): مقایسه پهنه‌بندی غلظت یون کلرید (Cl^-) بین دو بازه زمانی ۱۳۸۳–۱۳۹۶ و ۱۳۹۶–۱۳۹۸ نشان‌دهنده تغییرات آشکار در هر دو بعد مکانی و عددی است. در بازه ۱۳۸۳–۱۳۹۶، کلرید به‌صورت پهنه‌های نسبتا گسترده با تمرکزهای عمده در بخش‌های جنوب و جنوب‌خاوری منطقه توزیع شده است (شکل ۱۲)؛ اما در دوره زمانی ۱۳۹۶–۱۳۹۸، الگو به سمت تمرکز موضعی و خوشه‌ای در نواحی مرکزی ـ جنوب‌خاوری به‌ویژه در محدوده گوریه تغییر یافته است؛ به بیان دیگر، به‌جای توزیع پهنه‌ای کلرید بالا، در بازه دوم نقاط و لکه‌های متمرکز با یون کلرید (Cl^-) بالا پدیدار شده‌اند که عموما در مجاورت فوج‌لرزه‌ها و امتداد گسل‌های اصلی قرار گرفته‌اند.



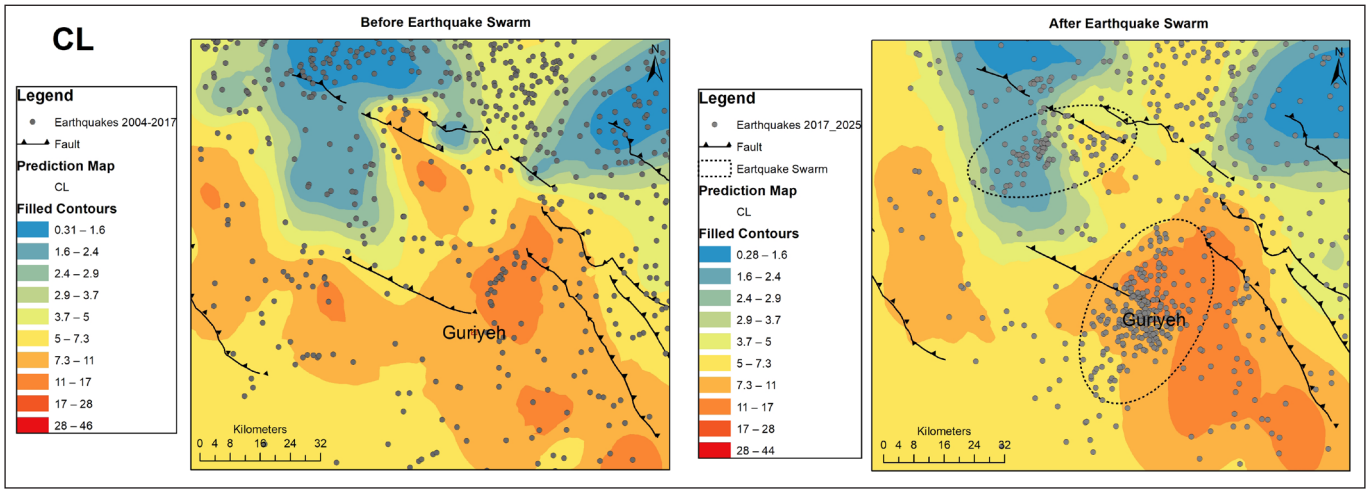
شکل ۱۰– نقشه‌های توزیع یون پتاسیم (K^+) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 10. Spatial distribution maps of potassium (K^+) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.



شکل ۱۱– نقشه‌های پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

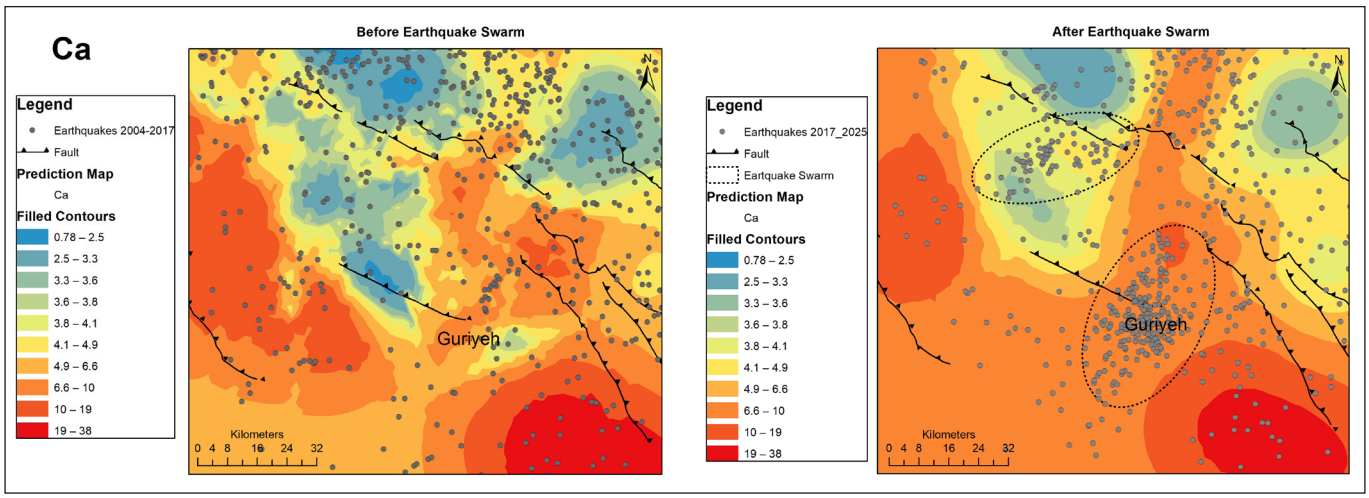
Figure 11. Spatial distribution maps of groundwater pH before and after the Guriyeh earthquake swarm.



شکل ۱۲- نقشه‌های توزیع یون کلرید (Cl^-) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 12. Spatial distribution maps of chloride (Cl^-) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.

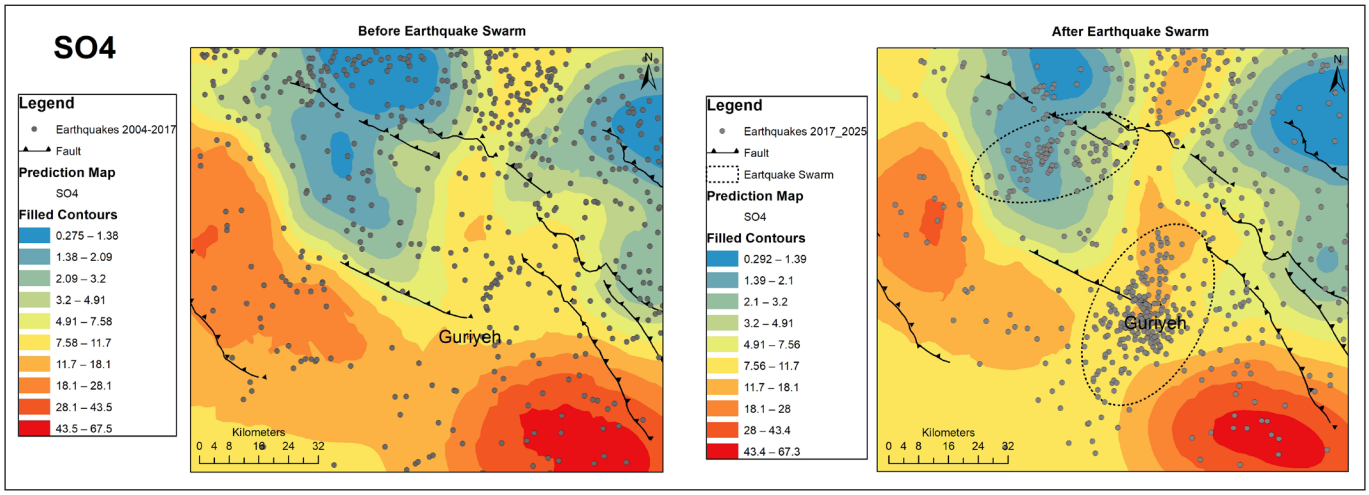
-یون کلسیم (Ca^{2+}): مقایسه پهنه‌بندی غلظت یون کلسیم (Ca^{2+}) بین دو بازه زمانی نشان‌دهنده تغییرات ساختاری و مکانی در ترکیب هیدروشیمیایی آبخوان است (شکل ۱۳). در بازه نخست، پهنه‌های با مقدار نسبتا بالای کلسیم به‌صورت گسترده و پیوسته در بخش‌های جنوب‌خاوری تا باختری گسترش یافته‌اند، در حالی‌که در بازه دوم الگو به‌سمت تمرکز موضعی تغییر کرده و بالاترین مقادیر کلسیم عمدتا در نواحی هم‌جوار با امتداد گسل‌ها و تمرکز زمین‌لرزه‌ها متمرکز شده‌اند. به بیان دیگر، به‌رغم این که نقاطی با مقادیر بالای (Ca^{2+}) در هر دو بازه دیده می‌شوند، ساختار فضایی توزیع از پهنه‌ای در دوره اول به نقطه‌ای یا کانال‌گونه به‌ویژه در اطراف محدوده گوریه در دوره دوم تبدیل شده است.



شکل ۱۳- نقشه‌های توزیع یون کلسیم (Ca^{2+}) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 13. Spatial distribution maps of calcium (Ca^{2+}) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.

-یون سولفات (SO_4^{2-}): در بازه اول توزیع مقادیر بالاتر یون سولفات (SO_4^{2-}) نسبتا پهنه‌ای و گسترده در بخش‌هایی از جنوب ـ جنوب‌خاور تا جنوب‌باختر آبخوان را نشان می‌دهد (شکل ۱۴)؛ در بازه دوم الگو به سمت تمرکز موضعی و خوشه‌ای تغییر کرده است؛ نواحی با یون سولفات (SO_4^{2-}) بالا غالبا در نزدیکی فوج لرزه‌ها و امتداد گسل‌ها ظاهر می‌شوند؛ برخی نواحی که در دوره اول پهنه وسیعی از SO_4^{2-} بالا داشتند، در دوره دوم به بخش‌های جداگانه یا کانال‌های خطی تغییر شکل پیدا کرده‌اند. این الگو (کاهش پهنه‌ای همراه با افزایش موضعی) نشان می‌دهد که تغییرات SO_4^{2-} در دوره دوم به‌طور عمده ناشی از فرایندهای موضعی (و نه یک غنی‌شدن پایدار و همگن منطقه‌ای) است.



شکل ۱۴- نقشه‌های توزیع یون سولفات (SO_4^{2-}) در آب‌های زیرزمینی در زمان پیش و پس از فوج لرزه‌های گوریه.

Figure 14. Spatial distribution maps of sulfate (SO_4^{2-}) concentrations in groundwater before and after the Guriyeh earthquake swarm.

۴- بحث

همگرایی صفحات ایران و عربستان موجب ایجاد پهنه زاگرس و همچنین سامانه‌های پیچیده‌ای از گسل‌های معکوس، امتدادلغز و وقوع زلزله‌های فراوانی در این پهنه شده است (Vernant et al., 2004). از جمله ویژگی‌های این پهنه، کمیاب بودن گسیختگی سطحی همراه با فعالیت لرزه‌ای است، که موجب شده بیشتر اطلاعات در مورد گسلش فعال در این منطقه از زمین‌لرزه‌ها به‌دست آید (Talebian and Jackson, 2004). در مدل زمین‌لرزه خاورمیانه در سال ۲۰۱۴ (EMME-SSM14)، ایران به‌عنوان یکی از مراکز اصلی لرزه‌خیزی منطقه معرفی می‌شود که تحت تاثیر مستقیم همگرایی صفحه عربستان به سمت اوراسیا قرار دارد. این همگرایی با نرخ متوسط حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال، عامل اصلی شکل‌گیری و فعالیت کمربند چین‌خورده ـ رانده زاگرس ـ بیتلیس، رشته‌کوه البرز، گسل‌های درون‌قاره‌ای ایران مرکزی و همچنین لرزه‌خیزی ژرف در برخی نواحی است (Danciu et al., 2018).

بر اساس اطلاعات آماری، در گوریه واقع در شهرستان شوشتر پراکنش کانون فوج لرزه‌های رخ داده در فاصله زمانی آبان ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ در راستای شمال خاوری ـ جنوب باختری قرار گرفته‌اند. نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت عناصر آب زیرزمینی نشان دهنده تغییرات آشکار عناصر یاد شده در محدوده پراکنش فوج لرزه‌ها می‌باشد. راستای پراکنش کانون‌های زمین‌لرزه‌ها، راستای تغییرات سطح تراز و ژرفای آب زیرزمینی و جهت جریان و کیفیت آب زیرزمینی همگی از جمله شواهد فعالیت و وجود یک گسل پنهان با راستای شمال خاوری ـ جنوب باختری در این منطقه است. بررسی تغییرات پارامترهای فیزیکی و هیدروشیمیایی آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب در دو بازه زمانی پیش و پس از فوج لرزه‌های آبان ماه سال ۱۳۹۶ در محدوده گوریه نشان داد (شکل‌های ۵ تا ۱۴) که رخدادهای لرزه‌ای اخیر نه‌تنها موجب دگرریختی‌های ساختاری در زمین‌شناسی منطقه شده‌اند، بلکه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی را نیز تحت تاثیر قرار داده‌اند. الگوهای مکانی ـ زمانی پارامترهای هیدروشیمیایی آبخوان‌های مورد مطالعه بیانگر این است که فعال شدن مجدد شکستگی‌ها، افزایش فشار سیالات، جابه‌جایی عمودی جریان‌ها و بازآرایی مسیرهای زیرسطحی تحت تاثیر فوج‌لرزه‌های اخیر، نقش مهمی در تحول شیمی این آبخوان‌ها داشته‌اند.

نقشه‌های ژرفای سطح آب ایستابی پیش از فوج لرزه‌ها به نوعی تاثیر گسل‌های راندگی را آشکارا نشان می‌دهد به‌گونه‌ای که بیشینه و کمینه تغییرات سطح ایستابی آب در راستای شمال باختری ـ جنوب خاوری و در راستای گسل‌ها می‌باشد (شکل ۵). با رخداد فوج لرزه‌ها این روندها تغییر پیدا کرده و به طوری که با روند تمرکز کانون فوج‌لرزه‌ها همخوانی مناسبی را نشان می‌دهند (شکل ۵). فوج لرزه‌ها سبب افزایش سطح ایستابی آب شده و راستای کمینه و بیشینه این تغییرات تقریبا اندکی متمایل به جهت‌گیری در راستای شمال خاوری و جنوب باختری شده است. با توجه به راستای فوج لرزه‌ها و جهت تغییرات سطح آب زیرزمینی به نظر می‌رسد محدوده گوریه متاثر از یک گسل امتداد لغز یا پهنه برشی با روند شمال خاوری و جنوب باختری باشد.

نتایج این مطالعه همخوانی مناسبی با مطالعه بررسی اثر زمین لرزه ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ سر پل ذهاب متاثر از فعالیت گسل امتداد لغز بر روی سطح ایستابی آب آبخوان سر پل ذهاب، را نشان می دهد (رشیدی گویا و همکاران، ۱۴۰۳). فعالیت گسل امتداد لغز سبب ایجاد محدوده‌های کششی و فشاری در اطراف هر گسل شود. محدوده‌های کششی گسل امتداد لغز، ربع‌های انبساطی اطراف گسل امتداد لغز می‌باشند (Aydin and Nur, 1982) که تخلخل در آن افزایش می‌یابد. افزایش تخلخل سبب کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود و بالعکس در محدوده فشاری گسل امتداد لغز، تخلخل در آن می‌تواند کاهش یابد. کاهش تخلخل سبب افزایش سطح آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین می‌توان افزایش و کاهش سطح آب زیرزمینی به ترتیب در ربع فشاری و ربع کششی مجاور گسل مشاهده کرد.

پهنه‌بندی هدایت الکتریکی (EC) پیش از فوج لرزه‌ها تمرکز مقادیر بالا را در جنوب و جنوب‌خاور نشان می‌دهد که هم‌پوشانی با کانون‌های لرزه‌ای دارند (شکل ۷). این هم‌پوشانی گویای احتمال وجود مسیرهای ترجیحی هدایت سیالات در امتداد گسل‌ها است. پس از رویدادهای لرزه‌ای، تراکم زمین‌لرزه‌ها در بخش‌های مرکزی و جنوبی به‌ویژه در محدوده گوریه، افزایش یافت و هم‌زمان بیشینه هدایت الکتریکی (EC) به همان نواحی منتقل شد (شکل ۶). افزایش میزان هدایت الکتریکی (EC) (شکل ۶) و تغییر مکانی هدایت الکتریکی (EC) از کمینه به بیشینه (شکل ۷)، آن هم دقیقا در محل تراکم لرزه‌ها، بیانگر این است که رخدادهای لرزه‌ای با بازشدن شکستگی‌ها و ورود سیالات ژرف با رسانایی بیشتر، نقش مهمی در افزایش هدایت الکتریکی (EC) داشته‌اند. رخدادهای لرزه‌ای متعدد، احتمالا سبب فعال شدن مجدد شکستگی‌های ریز و افزایش جریان‌های عمقی‌تر شده‌اند که به ورود سیالات با

رسانایی بالاتر به سامانه آبخوان سطحی انجامیده است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که طی رخداد فوج لرزه‌ها، آزادسازی سیالات در امتداد گسل‌های امتداد لغز و راندگی، به‌واسطه افزایش فشار منفذی و شکستگی‌های کششی، موجب افزایش هدایت الکتریکی (EC) و تغییرات ترکیب شیمیایی در آب‌های زیرزمینی مجاور می‌شود (Wang and Manga, 2015; Rosen et al., 2018; Kim et al., 2018). این پدیده به‌ویژه در نواحی که در محل تلاقی گسل‌ها با آبخوان‌های فعال قرار دارند، آشکار است.

الگوی غلظت کل مواد محلول (TDS) نیز همین رفتار را تایید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که پس از فوج لرزه‌ها، مقدار غلظت کل مواد محلول (TDS) به‌ویژه در محدوده گوریه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت (شکل‌های ۶ و ۸). این افزایش گسترده در پی تمرکز بالای رخدادهای لرزه‌ای روی داده است و نشان می‌دهد که ورود سیالات با منشا ژرف‌تر، افزایش انحلال مواد معدنی و تغییر رژیم هیدرودینامیکی متاثر از فعالیت مجدد گسل‌ها، در شکل‌گیری غلظت کل مواد محلول (TDS) بالا موثر بوده‌اند. این تغییر بیانگر نقش موثر فعالیت‌های لرزه‌ای اخیر در تغییر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که فعالیت‌های لرزه‌ای می‌تواند سبب آزادسازی سیالات ژرف، جابه‌جایی آب‌های شورتر از ژرفا به نواحی کم‌ژرفاتر، و باز توزیع نمک‌های محلول در امتداد گسل‌ها شود (Hosono and Masaki, 2020; Lee et al., 2020; Zhang et al., 2023; Gorbunova et al., 2023). این فرایندها به‌ویژه در سامانه‌های شکستگی فشاری، به افزایش میزان کل مواد محلول (TDS) می‌انجامند. بنابراین، افزایش TDS در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها را می‌توان نتیجه ترکیب دو عامل دانست: ۱) افزایش نفوذپذیری گسل‌ها و تراوش سیالات شور از ژرفا بر اثر تنش‌های لرزه‌ای، ۲) افزایش تبادل آب در لایه‌های اشباع و نیمه‌اشباع که به تمرکز بیشتر املاح در آب‌های زیرزمینی منتهی می‌شود. این تفسیر با نتایج پژوهش‌های مشابه در مناطق لرزه‌خیز ژاپن و کره جنوبی نیز هم‌خوانی دارد، جایی که پس از رخداد زلزله‌های متوسط تا شدید، افزایش محسوسی در TDS گزارش شده است (Lee et al., 2020; Hosono and Masaki, 2020). نقش گسل‌ها نیز به صورت کانال (بخش‌های جنوب و جنوب‌خاور) و کانال یا مانع (بخش‌های شمالی و مرکزی) نیز مشاهده می‌شود.

پیش از فوج لرزه‌ها، مقادیر بالای یون بی‌کربنات (HCO_3^-) در بخش‌های شمالی و مرکزی چیره بوده است که نشان‌دهنده تماس طولانی آب زیرزمینی با سنگ‌های کربناته و افزایش انحلال کربنات‌ها است (شکل ۹). اما پس از رخدادهای لرزه‌ای، کاهش محسوس غلظت کل مواد محلول (TDS) دقیقا در همان نواحی مشاهده شد؛ که مرکز رخدادهای لرزه‌ای نیز بوده‌اند (شکل ۶). این تغییر می‌تواند ناشی از ۱) ورود سیالات ژرف با CO_2 کمتر نسبت به سیالات سطحی، ۲) رقیق شدن آب کربناته به‌وسیله آب‌های تزریقی از شکستگی‌های جدید، و ۳) تغییر تعادل کربنات/بی‌کربنات در اثر گاززدایی یا تغییر pH باشد. نتایج نشان می‌دهند که فعالیت لرزه‌ای می‌تواند حتی ترکیب یون‌های وابسته به چرخه کربنات را نیز به‌طور شایان‌توجهی تغییر دهد. بر اساس مطالعات پیشین، ارتعاشات زمین قادرند سیالات ذخیره‌شده در منافذ جداگانه و شکستگی‌ها را آزاد کنند و آن‌ها را به مسیرهای اصلی جریان وارد نمایند، که موجب تغییرات موقتی در ترکیب شیمیایی آب می‌شود (Rosen et al., 2018). همچنین در مطالعه زلزله کوماموتو گزارش شده که ترکیب شیمیایی آب، پس از زلزله، دچار تغییراتی شده است که می‌تواند ناشی از مخلوط شدن آب‌های با منابع متفاوت باشد (Hosono and Masaki, 2020). همپوشانی فضایی بین مناطقی که کاهش HCO_3 دارند و فوج لرزه‌ها، تقویت‌کننده این فرضیه است که فعالیت لرزه‌ای تاثیر شایان‌توجهی بر رفتار هیدروژئوشیمی سیستم آبخوان منطقه داشته است (Zhou et al., 2021). از سوی دیگر، تحلیل هم‌پوشانی نقشه‌های تغییر غلظت HCO_3 با موقعیت گسل‌های اصلی منطقه نشان می‌دهد که بیشترین نوسانات شیمیایی در مجاورت گسل‌های امتداد لغز و راندگی‌های فعال رخ داده است. این هم‌زمانی، بیانگر نقش مستقیم تحرک گسل‌ها در انتقال سیالات و تغییر مسیر جریان آب‌های زیرزمینی است. بر اساس نتایج مطالعات مشابه (Rosen et al., 2018; Hosono and Masaki, 2020; Zhou et al., 2021)، گسل‌ها می‌توانند به‌عنوان مسیرهای انتقال سیالات ژرفی عمل کرده و موجب ورود آب‌ها یا گازهای غنی از CO_2 به بخش‌های بالاتر سیستم آبخوان شوند. پس از رویدادهای لرزه‌ای، بازشدگی مجدد شکستگی‌ها و افزایش نفوذپذیری در امتداد این گسل‌ها به‌احتمال سبب تخلیه آب‌های با غلظت بالاتر HCO_3 و جایگزینی آن‌ها با آب‌های تازه‌تر شده است. بنابراین، نقش گسل‌های فعال منطقه را می‌توان به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در کنترل رفتار هیدروشیمیایی آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها در نظر گرفت.

پهنه‌های گسترده یون پتاسیم (K^+) پیش از فوج لرزه‌ها نشان‌دهنده ارتباط با ژرفاهای متوسط تا زیاد و مسیرهای گسلی باز بوده است (شکل ۱۰). اما در بازه دوم، غلظت‌های بالا به نواحی نقطه‌ای و متمرکز در محل گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه به ویژه محدوده گوریه محدود شده‌اند (شکل ۱۰). تغییر از الگوی پهنه‌ای به نقطه‌ای بیانگر کاهش نفوذپذیری گسترده و تمرکز جریان در کانال‌های گسلی، ورود موضعی سیالات یون پتاسیم (K^+) دار از منابع ژرفی و بازآرایی مسیرهای زیرسطحی پس از فوج لرزه‌ها است.

تغییرات pH (شکل ۱۱) نیز از الگوی پیوسته خنثی ـ اسیدی به الگوی لکه‌ای و موضعی پس از فوج لرزه‌ها بیانگر ورود سیالات قلیایی‌تر از ژرفا، تغییر نسبت HCO_3^-/CO_2، افزایش اکسایش ـ کاهش در مسیرهای جدید، و فعال‌شدن شکستگی‌ها در مجاورت گسل‌های فعال است. افزایش موضعی pH نزدیک گسل‌ها یکی از ویژگی‌های فعالیت لرزه‌ای همراه با تزریق سیالات است.

یون‌های کلرید (Cl^-)، کلسیم (Ca^{2+})، سدیم (Na^+) و منیزیم (Mg^{2+}) رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند (شکل‌های ۶، ۱۲ و ۱۳). غلظت‌های بالای یون‌های کلرید (Cl^-) و کلسیم (Ca^{2+}) پیش از فوج لرزه‌ها به‌طور عمده در پهنه‌های مرکزی و جنوبی و در امتداد گسل‌های جنوبی مشاهده شده است (شکل‌های ۱۲ تا ۱۳)؛ که با رژیم تنشی فشارشی منطقه و بالاآمدن سیالات شورتر از عمق سازگار است. اما پس از فوج لرزه‌ها، با افزایش نسبی این یون‌ها در نواحی مرکزی و جنوبی همراه با پراکندگی لکه‌ای در حاشیه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۶). با وجود افزایش عددی یون‌های کلرید (Cl^-)، در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها، گستره مکانی آن محدودتر و بیشتر در مجاورت گسل‌های فعال متمرکز شده است (شکل ۱۲). این الگو بیانگر احتمال رخداد فرایندهایی مانند جابه‌جایی سیالات ژرف و جایگزینی با سیالات کم‌شورتر سطحی، اختلاط چند منشایی سیالات پس از شکستگی‌های جدید و یا افت فشار هیدرواستاتیک در مسیرهای گسلی پس از فعالیت لرزه‌ای می‌باشد. همپوشانی تغییرات یون‌های کلرید (Cl^-) و کلسیم (Ca^{2+}) با فوج لرزه‌های گوریه (شکل‌های ۱۲ تا ۱۳) تایید می‌کند که فعالیت گسل‌ها به‌طور مستقیم الگوی شیمیایی آبخوان را تغییر داده است.

با وجود افزایش عددی یون منیزیم (Mg^{2+}) سدیم (Na^+) در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها (شکل ۶)، گستره مکانی آن محدودتر و عمدتا در مجاورت گسل‌های فعال متمرکز شده است. این الگوی افزایش عددی و کاهش فضایی معمولا زمانی رخ می‌دهد که سیالات غنی از یون منیزیم (Mg^{2+}) از مسیرهای گسلی محدود وارد آبخوان شوند، تبادل یونی در محیط‌های دولومیتی تشدید شود و یا مسیرهای جدید زیرسطحی مانند شکستگی‌ها، فعال شده و جریان‌ها کانالیزه شوند. تمرکز یون منیزیم (Mg^{2+}) در نزدیکی فوج‌لرزه‌ها نشان‌دهنده فعال‌شدن مجدد مسیرهای گسلی و تغییر رژیم جریان پس از زلزله‌هاست. مدل‌سازی عددی ارائه‌شده توسط وانگ (Wang et al., 2004) نیز نشان داد که نوسانات لرزه‌ای موجب برهم‌خوردن تعادل یونی و آزادسازی یون‌های منیزیم از سطح کانی‌های رسی و کربناته می‌شود، که در کوتاه‌مدت افزایش غلظت را در مجاورت گسل‌ها توضیح می‌دهد. در مجموع، افزایش عددی اما کاهش گستره فضایی Mg در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها، به‌ویژه

در نواحی دارای تراکم بالاتر زمین‌لرزه‌ها، شواهدی از فعال‌شدن مجدد مسیرهای هیدروژئولوژیکی ساختاری و تغییر در رژیم جریان زیرزمینی است. این همپوشانی فضایی بین نواحی با افزایش منیزیم و فوج لرزه‌ها، دلالت بر تاثیر مستقیم فرایندهای تکتونو ـ هیدروژئوشیمیایی بر کیفیت آبخوان دارد.

کاهش عددی سولفات (SO_4^{2-}) در بازه زمانی پس از فوج لرزه‌ها (شکل ۱۴)، گستره مکانی آن محدودتر و به‌طور عمده در مجاورت گسل‌های فعال متمرکز شده است. کاهش پهنه‌ای و افزایش لکه‌ای و کانال‌گونه پس از فوج لرزه‌ها در نقشه‌های پهنه‌بندی این یون‌ها پس از فوج لرزه‌ها مشاهده می‌شود. چنین تغییراتی معمولا نشان‌دهنده بالاآمدن سیالات شورتر از مسیرهای محدود گسلی (Cl^-)، افزایش انحلال کربنات‌ها در نواحی تنش‌بالا (Ca^{2+}) و فعال‌شدن فرایندهای موضعی اکسایش ـ کاهش یا انحلال تبخیری‌ها (SO_4^{2-}) هستند. تمرکز موضعی این یون‌ها در امتداد گسل‌ها و در محدوده گوریه تایید می‌کند که فعالیت‌های لرزه‌ای اخیر رژیم ژئوشیمیایی آبخوان را از یک سیستم گسترده و یکنواخت به یک سیستم موضعی ـ ساختاری وابسته تبدیل کرده است.

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های لرزه‌ای، فیزیکی، هیدروشیمیایی و شواهد ساختاری نشان می‌دهد که پهنه گوریه در جنوب‌خاوری شوشتر به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر همگرایی صفحات ایران و عربستان و فعالیت یک گسل پنهان قرار دارد. تراکم و راستای پراکنش کانون‌های فوج لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، هم‌پوشانی آن‌ها با تغییرات سطح و ژرفای آب زیرزمینی، و نیز تطابق الگوی کیفی آب با ساختارهای گسلی، همگی گویای وجود و فعالیت مجدد یک سامانه گسلی در این منطقه است.

بررسی مقایسه‌ای پارامترهای هیدروشیمیایی پیش و پس از فوج لرزه‌های آبان ۱۳۹۶ نشان داد که رخدادهای لرزه‌ای اخیر نه‌تنها موجب بازآرایی زیرسطحی، افزایش سطح ایستابی آب، افزایش نفوذپذیری، و فعال شدن مجدد شکستگی‌ها شده‌اند، بلکه تغییرات شایان‌توجهی در ترکیب شیمیایی آبخوان‌های شوشتر و میان‌آب نیز ایجاد کرده‌اند. افزایش سطح ایستابی آب و تغییر روند بیشینه و کمینه آن از جهت زاگرسی به روند عربی نشان دهنده تاثیر گسل امتداد لغز با روند شمال خاوری ـ جنوب باختری می باشد. افزایش غلظت EC و TDS در امتداد گسل‌های مرکزی و جنوبی، همزمان با جابه‌جایی مکانی بیشینه‌های این پارامترها، گویای ورود سیالات شورتر با منشا ژرف و انتقال آن‌ها به نواحی کم‌ژرفاتر پس از رخدادهای لرزه‌ای است. این تغییرات با یافته‌های جهانی از اثر زلزله‌ها بر آزادسازی سیالات، افزایش فشار منفذی و بازشدگی شکستگی‌ها سازگاری دارد.

تغییرات عددی و مکانی رفتار یون‌های اصلی شامل Mg^2، Na^+، HCO_3^-، Ca^{2+}، Cl^-، K^+ و SO_4^{2-} نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که تغییرات از پهنه‌ای گسترده به الگوهای کانالیزه، لکه‌ای و متمرکز در مجاورت گسل‌ها، بیانگر کنترل ساختاری شدید رژیم ژئوشیمیایی آبخوان پس از فعالیت لرزه‌ای در محدوده گوریه است. افزایش HCO_3^- در مرکز و جنوب، افزایش عددی اما محدود Mg^{2+}، افزایش Na^+ در نواحی مرکزی و تمرکز موضعی K^+، همگی بیانگر اختلاط سیالات با منشاهای متفاوت، تخلیه سیالات کربناته و شور از ژرفا، و بازآرایی جریان‌های زیرسطحی پس از فعال شدن مجدد ساختارهای گسلی هستند. تغییرات موضعی pH نیز تایید‌کننده ورود سیالات قلیایی است.

مجموع شواهد حاصل از تغییرات سطح ایستابی آب، فضای هیدروشیمیایی، تغییرات آبخوان، و الگوهای لرزه‌ای به‌روشنی نشان می‌دهد که فعالیت گسلی پنهان در گوریه نقش تعیین‌کننده‌ای در تحول هیدروژئوشیمیایی منطقه داشته است. این نتایج نشان می‌دهند که در پهنه‌های فشاری مانند زاگرس، حتی زلزله‌های با بزرگای متوسط نیز قادرند ساختار جریان آب زیرزمینی، ترکیب شیمیایی سیالات، و نفوذپذیری شکستگی‌ها را به‌طور چشمگیری تغییر دهند. از این‌رو، ترکیب پایش لرزه‌ای، تغییرات سطح ایستابی آب و هیدروشیمیایی می‌تواند به‌عنوان رویکردی کارآمد برای شناسایی گسل‌های پنهان و ارزیابی پویایی سیستم‌های آبخوان در مناطق لرزه‌خیز مورد استفاده قرار گیرد.

کتابنگاری

اکبری، ا.، کلانتری، ن.، رحیمی، م.ح.، ۱۳۸۵، بررسی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر با استفاده از GIS، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده رود (فرصت‌ها و چالش‌ها)، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

جلیلی، ی.، چرچی، ع.، جهانگیری، ی.، ۱۴۰۴، اثر فوج لرزه‌های گوریه بر روی سطح تراز و جهت جریان آب زیرزمینی در جنوب خاوری شوشتر، فروبار دزفول، کمربند چین‌خورده زاگرس. اولین کنفرانس ملی هیدروژئولوژی، تبریز. ایران.

چرچی، ع.، هوشمند، ف.، سامانی، ب.، ۱۳۹۹، تحلیل لرزه زمین‌ساخت منطقه گوریه با نگرشی بر فوج لرزه سال‌های ۱۳۹۷ -۱۳۹۶ (استان خوزستان)، فصلنامه زمین‌ساخت، سال چهارم، شماره ۱۶، ص ۱-۱۸.

حفیظی، ز.، هوشمند، ع.، ناصری، ع.ع.، عبده کلاهچی، ع.، ۱۳۹۶، ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و شرب (مطالعه موردی دشت میان آب شوشتر)، اولین همایش بین المللی وچهارمین همایش ملی گیاهان دارویی و کشاورزی پایدار، همدان.

رشیدی گویا، ح.، کتیبه، ه.، امجد، م.، ۱۴۰۳، نگرشی نوین به تأثیر زمین‌لرزه بر تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان سرپل ذهاب). فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، سال بیستم، شماره ۲، ص ۱۴۶-۱۷۷.

سازمان آب و برق خوزستان، ۱۴۰۴، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای آب زیرزمینی استان خوزستان. اهواز، ایران.

شیخی بگلری، پ.، میرزایی ارجنکی، س.ی.، چیت سازان، م.، ۱۳۹۷، بررسی هیدروژئولوژیکی دشت میان آب شوشتر با تاکید بر تهیه مدل مفهومی منطقه، اولین دوره همایش ملی مدل‌سازی وفناوری‌های جدید در مدیریت آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

مرکز لرزه‌نگاری کشور، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۱۴۰۴، کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران. تهران، ایران.

مومبنی صالحی، ر.، ۱۳۹۹. تحلیل ساختاری و رخدادهای لرزه‌ای منطقه گوریه و ارتباط آن‌ها با ساختارهای زیر سطحی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۰۰ ص.

هوشمند، ف.، ۱۳۹۸، تحلیل لرزه‌زمین‌ساخت گسلش محدوده گوریه در جنوب شوشتر، رساله کارشناسی‌ارشد، گرایش تکتونیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

References

Adinolfi Falcone, R., Carucci, V., Falgiani, A., Manetta, M., Parisse, B., Petitta, M., Rusi, S., Spizzico, M., and Tallini, M., 2012. Changes on groundwater flow and hydrochemistry of the Gran Sasso carbonate aquifer after 2009 L'Aquila earthquake, Italian Journal of Geosciences, 131, 459-474. https://doi.org/10.3301/IJG.2011.34.

Akbari, A., Kalantari, N., and Rahimi, M.H., 2007. Evaluation and assessment of groundwater quality in the Mianab Plain, Shushtar, using GIS, In Proceedings of the First Regional Conference on Water Resources Management in the Karun and Zayandeh-Rud Basins: Opportunities and Challenges. Shahrekord University, Shahrekord, Iran (in Persian).

Andrén, M., Stockmann, G., Skelton, A., Sturkell, E., Mörth, C.M., Guðrúnardóttir, H.R., and Kockum, I., 2016. Coupling between mineral reactions, chemical changes in groundwater, and earthquakes in Iceland, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 121(4), 2315-2337. https://doi.org/10.1002/2015JB012614.

Aydin, A., and Nur, A., 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale independence, Tectonics, 1(1),91–105. https://doi.org/10.1029/TC001i001p00091.

Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal Earth Science, 18, 210-265. https://doi.org/10.1139/e81-019.

Charchi, A., Houshmand, F., and Samani, B., 2021. Seismotectonic analysis of the Guriyeh region with emphasis on the 2017–2018 earthquake swarm (Khuzestan Province, Iran), Journal of Tectonics, 4(16), 1–18 (in Persian).

Danciu, L., Şeşetyan, K., and Demircioglu, M., 2018. The 2014 Earthquake Model of the Middle East: seismogenic sources, Bull Earthquake Eng, 16, 3465–3496. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0096-8.

Gorbunova, E., Besedina, A., Petukhova, S., and Pavlov, D., 2023. Reaction of the Underground Water to Seismic Impact from Industrial Explosions, Water, 15 (7), 1358. https://doi.org/10.3390/w15071358.

Hafizi, Z., Houshmand, A., Naseri, A.A., and Abdeh Kolahchi, A., 2018. Evaluation of groundwater quality for agricultural and drinking purposes: A case study of the Mianab Plain, Shushtar, Iran, In Proceedings of the First International Conference and Fourth National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture. Hamadan, Iran (in Persian).

Hartmann, J., 2006. Long-term seismotectonic influence on the hydrochemical composition of a spring located at Koryaksky-Volcano, Kamchatka: deduced from aggregated earthquake information, Internatioanl Journal of Earth Science, 95, 649–664.

Hosono, T., and Masaki, Y., 2020. Post-seismic hydrochemical changes in regional groundwater flow systems in response to the 2016Mw 7.0 Kumamoto earthquake. Journal of Hydrology 580, 124340. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124340.

Houshmand, F., 2019. Seismotectonic analysis of faulting in the Guriyeh area, south of Shushtar (Zagros Fold–Thrust Belt). M.Sc. thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (in Persian).

Iranian Seismological Center, Institute of Geophysiscs University of Tehran, 2025. Earthquake Catalogue of Iran, Tehran, Iran. (In Persian).

Jalili, Y., Charchi, A., and Jahangiri, Y., 2025. Effects of the Guriyeh earthquake swarm on groundwater level and flow direction in southeastern Shushtar, the Dezful Embayment, Zagros Fold–Thrust Belt, In Proceedings of the First National Conference on Hydrogeology. Tabriz, Iran (in Persian).

Khuzestan Water and Power Authority, 2025. Groundwater Data from Production and Observation Wells in Khuzestan Province, Ahvaz, Iran. (In Persian).

Kim, J., Kaown, D., Park, I.W., and Lee, K.K., 2023. Hydrogeochemical and microbial signatures of deep and shallow groundwater near the enhanced geothermal system in response to the earthquake, Environmental Earth Sciences 82(3):87.

Kim, J., Lee, J., Pettitta, M., Lee, S., Lee, K.K., Kim, H., Kwon, D., and Park, I.W., 2018. Hydrogeological responses to the 2016 Gyeongju earthquakes, Korea, Hydrology and Earth System Sciences, Discuss. https://doi.org/10.5194/hess-2018-360.

Lee, S-H., Lee, J-M., Yoon, H., Kim, Y., Hwang, S., Ha, K., and Kim, Y., 2020. Groundwater Impacts from the M5.8 Earthquake in Korea as Determined by Integrated Monitoring Systems, Ground Water, 58(6), 951-961. https://doi.org/10.1111/gwat.12993.

Matsumoto, N., Kitagawa, G., and Roeloffs, E., 2003. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan–I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses, Geophysical Journal International, 155, 885-898. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2003.02103.x.

Mombeni Salehi, R., 2021. Structural analysis and seismic events of the Gurieh region and their relationship with subsurface structures. M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 100 p. (in Persian).

Montgomery, D.R., and Manga, M., 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes: Science, 300 (5628), 2047-2049. https://doi.org/10.1126/science.1082980.

Pérez, N.M., Hernández, P.A., Igarashi, G., Trujillo, I., Nakai, S., Sumino, H., and Wakita, H., 2008. Searching and detecting earthquake geochemical precursors in CO2-rich groundwaters from Galicia, Spain, Geochemical Journal, 42, 75-83. https://doi.org/10.2343/geochemj.42.75.

Rashidi Gouya, H., Katibeh, H., and Amjad, M., 2025. A new perspective on the effects of earthquakes on groundwater level fluctuations: A case study of the Sarpol-e Zahab aquifer, Iranian Journal of Water Resources Research, 20(2), 146–177 (in Persian).

Roeloffs, E. A., 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103, 869-889, https://doi.org/10.1029/97jb02335.

Roeloffs, E., Sneed, M., Galloway, D. L., Sorey, M. L., Farrar, C. D., Howle, J. F., and Hughes, J., 2003. Water-level changes induced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 127, 269-303. https://doi.org/10.1016/s0377-0273(03)00173-2.

Rosen, M.R., Binda, G., Archer, C., Pozzi, A., Michetelli, A.M., and Noble, P.J., 2018. Mechanisms of earthquake induced chemical and fluid transport to carbonate earthquakes groundwater springs after earthquakes, Water Resources Research, 54 (8), 5225-5244. https://doi.org/10.1029/2017WR022097.

Sheikhi Baghlari, P., Mirzaei Arjanki, S.Y., and Chitsazan, M., 2019. Hydrogeological investigation of the Mianab Plain, Shushtar, with emphasis on developing a conceptual model of the study area, In Proceedings of the First National Conference on Modeling and New Technologies in Water Management. University of Birjand, Birjand, Iran (in Persian).

Shi, Z., Wang, G., Manga, M., and Wang, C.Y., 2015. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes-insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland, Earth and Planetary Science Letters, 430, 66-74. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012.

Skelton, A., Andrén, M., Kristmannsdóttir, H., Stockmann, G., Mörth, C.-M., Sveinbjörnsdóttir, Á., Jónsson, S., Sturkell, E., Guõrúnardóttir, H.R., Hjartarson, H., Siegmund, H., and Kockum, I., 2014. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland, Nat. Geoscience, 7, 752–756. https://doi.org/10.1038/NGEO2250.

Talbot, C.J., and Alavi, M., 1996. The past of a future syntaxis across the Zagros: In: Salt Tectonics. In: Alsop, I., Blundel, D, J. and Davison, I. (Eds), Geological Society of London Special Publication, 100, 89-109. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08.

Talebian, M., and Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, Geophysical Journal International 156(3), 506-526. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x.

Tsunogai, U., Wakita, H., 1995. Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan, Science, 269, 61–63. https://doi.org/10.1126/science.269.5220.61.

Vernant, P., Nilforoushan, F., Chéry, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J.F., Sedighi, M., and Tavakoli, F., 2004. Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data, Earth and Planetary Science Letter 223(1), 177-185. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.017.

Wang, C.Y., Dreger, D., Manga, M., and Wong, A., 2004. Streamflow increases due to rupturing of hydrothermal reservoirs: evidence from the 2003 San Simeon, California, earthquake, Geophys. Res. Lett. 31, L10502. https://doi.org/10.1029/2004GL020124.

Wang, C.Y., and Manga, M., 2015. New streams and springs after the 2014 Mw 6.0 South Napa earthquake, Nat. Commun, 6, 7597. https://doi.org/10.1038/ncomms8597.

Wang, C.Y., Manga, M., Wang, C.H., and Chen, C.H., 2012. Transient change in groundwater temperature after earthquakes, Geology, 40, 119-122. https://doi.org/10.1130/g32565.1.

Zhang, S., Shi, Z., Wang, G., Zhang, Z., and Guo, H., 2023. The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations, Hydrology and Earth System Sciences, 27, 401-415. https://doi.org/10.1111/gwat.12993.

Zhou, Z., Zhong, J., Zhao, J., Yan, R., Tian, L., and Fu, H., 2021. Two Mechanisms of Earthquake-Induced Hydrochemical Variations in an Observation Well. Water, 113(17), 2385. https://doi.org/10.3390/w13172385.