



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Employing Quartz OSL dating to estimate the slip rate of the Doruneh Fault System in Khalilabad

Seyed Soroush Enferadi¹ | Morteza Fattahi^{2*} | Hamideh Amini³

1. Ph.D. Student, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: soroush.enferadi@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Assoc. Prof., Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mfattahi@ut.ac.ir

3. Asst. Prof., Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hiamini@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received 11 November 2024

Revised 08 December 2024

Accepted 12 December 2024

Published 19 Desember 2024

Keywords:

Doruneh Fault System,
Optically
Stimulated Luminescence,
Quartz,
Slip rate.

ABSTRACT

The first step in earthquake hazard assessment is identifying and mapping active faults, and then calculating their activity in a specific area. The fault slip rate is a key parameter for understanding the rate of activity and potential hazards of a fault. Therefore, it is necessary to determine the fault slip rate and, if possible, the return period of earthquakes caused by that fault. The aim of this study is to determine the slip rate on the Doruneh Fault System (DFS) in Khalilabad using the Optically Stimulated Luminescence (OSL) method. The DFS is an active fault in the Iranian Plateau, located in the northern part of the Khalilabad. This fault system displaced the existing drainage on the generation of an alluvial fan in the northeast of Khalilabad. Using QuickBird, the displacement of the drainage on an old alluvial fan in northeast Khalilabad was measured to be approximately 260 ± 40 m. Subsequently, the extracted quartz from two sediment samples that were collected from a pit excavated into the surface of the alluvial fan was dated using the OSL method. The age of quartz was determined by measuring the equivalent dose, calculated using the Single Aliquot Regenerative (SAR) method, and the dose rate, determined by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) analysis of the sample. Additionally, the last sedimentation period and the slip rate of this part of the DFS were estimated to be approximately 89700-102800 years and 2.1-3.3 mm per year, respectively.

Cite this article: Enferadi, S.; Fattahi, M. & Amini, H. (2024). Employing Quartz OSL dating to estimate the slip rate of the Doruneh Fault System in Khalilabad. *Environmental Hazards Management*, 11 (3), 213-224. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.385250.849>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.385250.849>

Introduction

Identifying, mapping, and quantifying the activity of active faults is essential for assessing seismic hazards. A crucial parameter in this assessment is the fault slip rate, which represents the average slip of fault movement over a specific period. Understanding the slip rate of the Doruneh Fault System (DFS), a prominent tectonic feature in the Iranian Plateau, is critical for evaluating seismic hazards in the region. This study aims to determine the slip rate of the central segment of the DFS, specifically at the Khalilabad site, by employing the Optically Stimulated Luminescence (OSL) method.

Material and Methods

A three-stage methodology was employed to estimate the slip rate of the central segment of the DFS at the Khalilabad site. Initially, the study area was delineated, displacement measurements were conducted, and sedimentary samples were collected and sent to a luminescence laboratory. In the

subsequent phase, laboratory procedures were implemented to extract pure quartz grains from the samples. Finally, in the concluding phase, OSL dating was used to determine the age of these grains and, consequently, the slip rate.

Results and Discussion

The ages of the sedimentary samples KH1 and KH2 were determined using the Single Aliquot Regenerative (SAR) protocol to measure the equivalent dose and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) to determine the dose rate. The calculated ages, equivalent doses, and dose rates for both samples are presented in Table 1. Finally, the slip rate was estimated to be 2.1-3.3 mm per year by dividing the total measured displacement (260 ± 40 m) by the displacement period (89700-102800 years ago).

Conclusion

These findings underscore the necessity of additional studies employing diverse methodologies to assess slip rates along different segments of the DFS over various time periods. Discrepancies between short-term and long-term slip rates on the DFS limit the applicability of slip rate data in seismic hazard assessments for this fault system.

References

- Fattahi, M. (2009). Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods: A review. *Quat. Int.*, 199, 104–146, doi:10.1016/j.quaint.2008.06.015.
- Foroutan, M., Nazari, H., Meyer, B., Sébrier, M. et al. (2012). Late Pleistocene-Holocene Right- Slip Rate of The Dehshir Fault, Central Iran Plateau. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*. GSJ. 1023-7429. <https://doi.org/10.22071/gsj.2011.54458>.
- Karimi Moayed, N., Fattahi, M., Autzen, M., Haghshenas, E. et al. (2024). The sensitisation of quartz extracted from andesite, *Radiation Measurements*. 170, 107048, ISSN 1350-4487, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2023.107048>.
- Krapf, C. B. E., Werner, M., Questiaux, D., Spooner, N. et al. (2018). Optically stimulated luminescence dating revealing new insights into the age of major regolith units of the eastern Musgrave Province, South Australia. Report Book 2018/00004. Department for Energy and Mining, South Australia, Adelaide.
- Lamothe, M., Brisson, L. F., Hardy, F. (2020). Circumvention of anomalous fading in feldspar luminescence dating using Post-Isothermal IRSL. *Quaternary Geochronology*, 57, 101062, ISSN 1871-1014, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101062>.
- Murray, A. S., & Wintle, A. G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32: 57–73, DOI 10.1016/S1350-4487(99)00253-X.



استفاده از سن‌یابی به روش لومینسانس نوری کوارتز به منظور برآورد نرخ لغزش سامانه گسلی درونه در خلیل آباد

سیدسروش انفرادی^۱ | مرتضی فتاحی^{۲*} | حمیده امینی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: soroush.enferadi@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mfattahi@ut.ac.ir

۳. استادیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hiamini@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

کلیدواژه:

سامانه گسلی درونه،

کوارتز،

لومینسانس تحریک‌شده با نور،

نرخ لغزش.

نخستین گام در ارزیابی خطر زمین‌لرزه، شناسایی و به نقشه درآوردن گسل‌های فعال و سپس محاسبه میزان فعالیت آنها در یک گستره مشخص است. نرخ لغزش گسل، شاخصی اساسی برای درک میزان فعالیت و خطرهای بالقوه گسل است. بنابراین تعیین نرخ لغزش گسل و در صورت امکان، دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های ناشی از آن گسل ضروری است. هدف این پژوهش، تعیین نرخ لغزش روی سامانه گسلی درونه در خلیل آباد با استفاده از روش لومینسانس تحریک‌شده با نور (OSL) است. سامانه گسلی درونه، گسلی فعال در فلات ایران است که در بخش شمالی خلیل آباد قرار گرفته است. این سامانه گسلی، آبراهه‌های موجود روی یک نسل از مخروط‌افکنه‌ها در شمال خاوری خلیل آباد را جابه‌جا کرده است. با استفاده از تصاویر QuickBird، ابتدا میزان جابه‌جایی آبراهه‌ها روی مخروط‌افکنه‌ای قدیمی در شمال خاوری خلیل آباد در حدود 260 ± 40 متر اندازه‌گیری شد. سپس کوارتز جداشده از دو نمونه رسوبی که از یک گودال حفاری شده در سطح مخروط‌افکنه جمع‌آوری شده بود، با استفاده از روش لومینسانس تحریک‌شده با نور سن‌یابی شد. سن کوارتز با اندازه‌گیری دز معادل دز طبیعی (محاسبه‌شده با استفاده از روش SAR) و نرخ دز (تعیین‌شده توسط آنالیز ICP-MS) مشخص شد. همچنین آخرین دوره رسوبگذاری و نرخ لغزش این بخش از سامانه گسلی درونه به ترتیب در حدود $102800-89700$ سال و $2/1-3/3$ میلی‌متر در سال برآورد شد.

استناد: انفرادی، سیدسروش؛ فتاحی، مرتضی و امینی، حمیده (۱۴۰۳). استفاده از سن‌یابی به روش لومینسانس نوری کوارتز به منظور برآورد نرخ لغزش سامانه گسلی درونه در خلیل آباد. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱ (۳)، ۲۱۳-۲۲۴.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.385250.849>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.385250.849>



۱. مقدمه

با وقوع مداوم رویدادهای طبیعی مخاطره‌آمیز در دوره‌های زمانی مختلف، همواره رویکردهای جدیدی در مسیر مدیریت مخاطرات طبیعی و اتخاذ روش‌های کاهش خسارات ناشی از آنها در جوامع بشری توسعه پیدا کرده است [۷]. رویداد زمین‌لرزه از پدیده‌های مخاطره‌آمیز طبیعی است که از دیرباز تاکنون تهدیدی جدی برای زندگی بشر محسوب می‌شده است. فلات ایران در امتداد کمربند کوهزایی فعال آلپ هیمالیا قرار گرفته است و زمین‌لرزه، مهم‌ترین پدیده زمین‌ساختی در آن به شمار می‌آید [۸]. از آنجا که فلات ایران از لرزه‌خیزترین مناطق زمین‌ساختی در جهان شناخته می‌شود، شناسایی و به نقشه درآوردن گسل‌های فعال در آن به منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ها ضروری است. تحلیل خطر زمین‌لرزه، مبتنی بر شناسایی گسل‌های فعال و تعیین شدت فعالیت روی آنهاست. نرخ لغزش گسل، میزان جابه‌جایی روی گسل در طول مدت زمانی مشخص است که با استفاده از آن می‌توان به شدت فعالیت یک گسل در یک گستره دست پیدا کرد. نرخ لغزش یک گسل را می‌توان با استفاده از روش‌های زمین‌مبنا (کوتاه‌مدت)، زمین‌ریخت‌شناختی و سن‌یابی مطلق (میان‌مدت) و زمین‌شناختی (درازمدت) محاسبه کرد. تعیین نرخ لغزش یک گسل، مستلزم برآورد دو شاخص کلیدی و تقسیم این دو بر یکدیگر است: میزان جابه‌جایی روی گسل و سن جابه‌جایی [۱۴].

سامانه گسلی درونه، از جمله گسل‌های فعال در فلات ایران است که نخستین بار توسط ولمن (۱۹۶۶) و با درازایی در حدود ۷۰۰ کیلومتر معرفی شد [۲۹]. این سامانه گسلی، تأثیر مهمی در جایگاه زمین‌ساختی و فرایند شکل‌گیری ریختار کنونی فلات ایران داشته است [۲۵،۳]. پژوهش‌های اولیه، سامانه گسلی درونه را بر مبنای موقعیت جغرافیایی روستای درونه و تغییر جهت گسل، به دو بخش خاوری و باختری تفکیک می‌کنند [۲۵،۲۹]. بررسی‌های ساختاری تکمیلی، این سامانه گسلی را بر پایه تغییر الگوهای رفتاری، به سه بخش خاوری، مرکزی و باختری تقسیم می‌کنند [۵،۱۰].

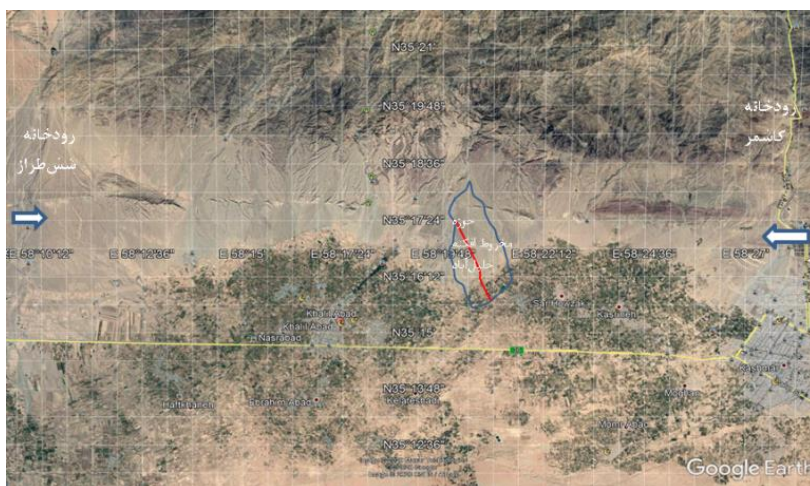
تاکنون بررسی‌های متعددی با هدف پی بردن به نرخ‌های لغزش کوتاه‌مدت، میان‌مدت و درازمدت روی سامانه گسلی درونه صورت گرفته است، اما همچنان توافق جامعی درباره میزان دقیق لغزش روی آن شکل نگرفته است و پژوهش‌های مختلف تفسیرها و نتایج متفاوتی را گزارش کرده‌اند [۲۸، ۲۷، ۲۴، ۲۳، ۲۱، ۱۲، ۱۱، ۴-۲]. در این زمینه با استفاده از GPS [۲۴] و بهره‌گیری از سن‌یابی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور^۱ [۱۲]، متوسط نرخ لغزش بخش مرکزی سامانه گسلی درونه در حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال برآورد شده است که اختلاف زیادی با متوسط نرخ لغزش به‌دست‌آمده با استفاده از سن‌یابی به روش ایزوتوپ‌های کیهانی (در حدود ۱/۵ تا ۸/۴ میلی‌متر در سال) دارد [۱۰]. فرید و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از سرعت ثبت‌شده در ایستگاه‌های کاش و شیر در شمال خاور ایران [۱۸، ۱۹، ۲۶]، نرخ لغزش زمان حال را در حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال گزارش کرده‌اند. از طرفی اندازه‌گیری‌های اخیر GPS در شمال خاور ایران [۲۰]، هیچ تغییری را نشان نداده است. همچنین به گفته فرید و همکاران (۲۰۱۶) به دلایل نامعلومی همخوانی مناسبی میان نرخ لغزش امروزی و متوسط نرخ لغزش در دوران گذشته روی سامانه گسلی درونه وجود ندارد [۱۱]. بنابراین با توجه به ناهمخوانی نتایج نرخ لغزش سامانه گسلی درونه در پژوهش‌های مختلف، ضرورت بررسی‌های دقیق‌تر بیش از پیش احساس می‌شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین نرخ لغزش بخش مرکزی سامانه گسلی درونه (شمال خاوری شهرستان خلیل‌آباد) در دامنه زمانی میان‌مدت (کواترنری پایانی) با استفاده از سن‌یابی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور است.

۲. محدوده و روش پژوهش

۲.۱. محدوده پژوهش

شهرستان خلیل‌آباد از شهرستان‌های واقع در استان خراسان رضوی در شمال خاور ایران است که از شمال به شهرستان کوهسرخ، از جنوب به شهرستان بجستان، از خاور به شهرستان کاشمر و از باختر به شهرستان بردسکن محدود است. مطابق آخرین تقسیمات کشوری، شهرستان خلیل‌آباد دارای دو بخش مرکزی و شش‌طراز است. این شهرستان آب‌وهوای کوهی و

خشک دارد و در ارتفاع ۹۷۵ متری از سطح آب‌های آزاد قرار گرفته است. گستره تحت بررسی در شمال خاوری شهرستان خلیل‌آباد (سایت خلیل‌آباد)، در امتداد خاوری-باختری و به موازات سامانه گسلی درونه قرار گرفته است و این سامانه گسلی از بخش‌های شمالی آن عبور می‌کند (شکل ۱). با توجه به همسایگی بخش مرکزی سامانه گسلی درونه با مراکز جمعیتی واقع در حاشیه‌های آن (خلیل‌آباد، کاشمر و ...) و جایگاه این گستره‌های شهری و روستایی از دیدگاه تمرکز جمعیت، جنبش‌های احتمالی ناشی از آن را می‌توان به‌منزله زمین‌لرزه‌ای ویرانگر قلمداد کرد. از این‌رو لزوم واکاوی شدت فعالیت و تعیین نرخ لغزش در بخش مرکزی سامانه گسلی درونه برای به‌روزرسانی پژوهش‌های پیشین و اجرای هرچه دقیق‌تر ارزیابی خطر لرزه‌ای آشکار می‌شود.



شکل ۱. نمایی از سامانه گسلی درونه در حوضه آبخیز شمال خاوری خلیل‌آباد بین رودخانه‌های کاشمر در خاور و شش‌طراز در باختر. سامانه گسلی درونه (فلش‌های سفید)، به‌صورت خاوری-باختری در مرکز تصویر قرار دارد و گستره کوهسرخ در شمال را از ناحیه کشاورزی-مسکونی در جنوب جدا می‌کند. حوضه آبخیز خلیل‌آباد، در مرکز تصویر مشاهده می‌شود و خط قرمز حد فاصل دو مخروط‌افکنه را نشان می‌دهد. مخروط‌افکنه خاوری دارای قدمت بیشتری از مخروط‌افکنه باختری است.

۲.۲. روش پژوهش

در پژوهش حاضر برای برآورد نرخ لغزش بخش مرکزی سامانه گسلی درونه در شمال خاوری شهرستان خلیل‌آباد، سه مرحله در نظر گرفته شد. در گام نخست، گستره تحت بررسی (سایت خلیل‌آباد) بررسی و شناسایی شده و میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شد. سپس عملیات نمونه‌برداری صورت گرفت و دو نمونه رسوبی برداشته و به آزمایشگاه لومینسانس منتقل شد. در مرحله دوم، عملیات آزمایشگاهی روی نمونه‌های رسوبی برداشته شده از سایت خلیل‌آباد اجرا شده و کوارتز خالص استحصال شد. در مرحله آخر نیز دانه‌های کوارتز جدا شده از هر دو نمونه رسوبی، با تکیه بر روش لومینسانس تحریک‌شده با نور سن‌یابی شده و نرخ لغزش برآورد شد.

۲.۲.۱. اندازه‌گیری جابه‌جایی و نمونه‌برداری

به‌منظور شناسایی حوضه آبخیز خلیل‌آباد در گستره شمال خاوری شهرستان خلیل‌آباد (در موقعیت ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول خاوری و ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی)، ابتدا پژوهش‌های کتابخانه‌ای صورت گرفت و سپس تصاویر ماهواره‌ای و زمین‌شناسی بررسی شد. پس از شناسایی حوضه آبخیز خلیل‌آباد از نظر جایگاه و موقعیت زمین‌شناسی، دو نسل از مخروط‌افکنه‌ها در سایت خلیل‌آباد که پیشتر توسط فرید و همکاران (۲۰۱۱) شناسایی شده بود، با بهره‌گیری از تصاویر QuickBird بررسی شد. سپس میزان جابه‌جایی آبراهه‌ها روی مخروط‌افکنه قدیمی اندازه‌گیری و محل مناسب برای اجرای عملیات نمونه‌برداری انتخاب شد (شکل ۲). با استفاده از لوله‌های فلزی مخصوص و از یک گودال حفاری شده در سطح مخروط‌افکنه، دو نمونه رسوبی (KH1 و KH2) برای سن‌یابی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور برداشته شد. از آنجا که قرارگیری در معرض نور ممکن است سن نمونه رسوبی را کمتر از حد واقعی نشان دهد، برداشت نمونه باید به‌گونه‌ای باشد که نمونه‌ها در طی عملیات نمونه‌برداری و

انتقال به آزمایشگاه، در معرض نور قرار نگیرند [۶]. بنابراین نمونه‌ها در تاریکی و در شرایطی خاص، برداشته و بسته‌بندی شدند و به آزمایشگاه لومینسانس موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران انتقال یافتند.



شکل ۲. نمایی از سیستم رودخانه‌ای روی مخروط افکنه قدیمی در حوضه آبخیز شمال خاوری خلیل‌آباد. مسیر رودخانه، توسط سامانه گسلی درونه (فلش‌های زرد) به میزان ۲۶۰ متر جابه‌جا شده که نخستین بار توسط فرید و همکاران (۲۰۱۱) شناسایی شده است. خطوط آبی، حد مسیر آبراهه‌ها و فلش‌های سفید نیز جابه‌جایی ایجادشده در اثر فعالیت سامانه گسلی درونه را نشان می‌دهند. همچنین دایره سفید نشان‌دهنده محل اجرای عملیات نمونه‌برداری و برداشت نمونه‌ها برای سنجایی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور است.

۲.۲.۲. عملیات آزمایشگاهی

آماده‌سازی نمونه‌های رسوبی در آزمایشگاه لومینسانس (استحصال کوارتز خالص)، از مهم‌ترین بخش‌های سنجایی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور است. این فرایند با طی کردن مراحل هم‌چون باز کردن نمونه، جداسازی به روش خشک (سرد خشک) و تر (سرد تر)، تفکیک با استفاده از مایع سنگین و اسیدکاری انجام می‌گیرد. در این زمینه نمونه‌های رسوبی برداشت‌شده از سایت خلیل‌آباد، ابتدا تحت نور استاندارد سرخ با شدت بسیار کم باز شدند. بخشی از نمونه (در حدود ۲ تا ۳ سانتی‌متر از هر دو سمت لوله‌های نمونه‌برداری) که احتمال نورخوردگی در آن وجود داشت، از نمونه اصلی جدا شد. این نمونه به آزمایشگاه تعیین درصد مواد پرتوزا که مجهز به طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای القایی-جفت‌شده (ICP-MS^۱) است منتقل شد. سپس با استفاده از مقدار غلظت عناصر پرتوزای نمونه، درصد رطوبت نمونه، طول و عرض جغرافیایی محل نمونه‌برداری، عمق نمونه و ارتفاع از سطح دریا و با بهره‌گیری از فرمول‌ها و ضرایب تبدیل استاندارد، میزان نرخ دز^۲ در هر دو نمونه رسوبی اندازه‌گیری شد.

رسوبات موجود در بخش‌های میانی لوله‌های نمونه‌برداری (که اطمینان کامل از نور نخوردن آن وجود داشت)، جداگانه برای تعیین دز معادل دز طبیعی^۳ در آزمایشگاه لومینسانس بررسی شد. این رسوبات با استفاده از الک‌هایی در اندازه‌های مختلف، ابتدا به روش خشک و سپس به روش تر جداسازی شدند. آن‌گاه ۱۵۰ تا ۲۵۰ میکرون از هر نمونه انتخاب شد تا مراحل مختلف اسیدکاری روی آن اجرا شود. نمونه به‌منظور حذف کربنات‌ها و مواد آهکی، دو روز در اسید هیدروکلریدریک ۳۷ درصد و برای حذف مواد آلی و عناصر ریز باقی‌مانده، دو روز در آب اکسیژنه ۳۵ درصد قرار داده شد. سپس نمونه باقی‌مانده در چند نوبت توسط آب مقطر شسته شد و در کوره قرار گرفت تا خشک شود. آن‌گاه با استفاده از مایع سنگین پلی‌تنگستات سدیم، فرایند تفکیک نمونه در چگالی‌های ۲/۵۸ و ۲/۷۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب صورت گرفت و دانه‌های کوارتز نمونه جدا شد. همچنین برای اطمینان از نبود ناخالصی‌های معدنی دیگر (از جمله فلدسپارها) در ذرات کوارتز، نمونه باقی‌مانده ابتدا به مدت ۵۰ دقیقه در اسید هیدروفلوئوریک ۴۸ درصد و سپس یک روز در اسید هیدروکلریدریک ۱۰ درصد قرار داده شد. نمونه باقی‌مانده سپس در چند

1. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

2. Dose rate (Dt)

3. Equivalent dose (De)

نوبت توسط آب مقطر شسته شد و در کوره قرار گرفت تا خشک شود. در نهایت با اعمال تابش فروسرخ به ذرات کوارتز، هیچ‌گونه کاهشی در سیگنال لومینسانس کوارتز مشاهده نشد که بیانگر خلوص ذرات کوارتز و نبود مؤثر ناخالصی فلدسپار است. بدین ترتیب ذرات کوارتز خالص برای هر دو نمونه رسوبی استحصال شد.

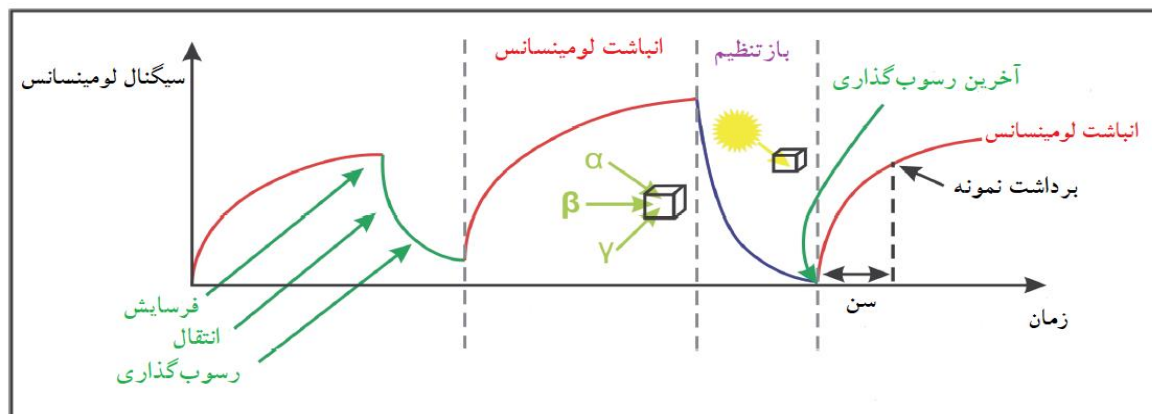
۳.۲.۲. لومینسانس تحریک‌شده با نور

روش‌های سن‌یابی مطلق همچون روش رادیوکربن (14C)، روش ایزوتوپ‌های کیهانی و روش لومینسانس تحریک‌شده با نور، از رهیافت‌هایی‌اند که امروزه به‌منظور تعیین زمان رویداد جابه‌جایی روی گسل استفاده می‌شوند. روش لومینسانس تحریک‌شده با نور در مقایسه با روش‌های دیگر، رهیافتی مناسب‌تر به‌منظور سن‌یابی رسوبات (به‌ویژه در ایران با اقلیمی خشک و نیمه‌خشک) است. در حقیقت این روش به‌صورت مستقیم رسوبات را سن‌یابی می‌کند و محدوده سنی آن می‌تواند دوره کواترنری را پوشش دهد. همچنین سن‌یابی در آن، مبتنی بر حضور گسترده کوارتز و فلدسپار در رسوبات است و به حضور مواد آلی در رسوبات وابسته نیست. ذرات کوارتز به‌دلیل پایداری زیاد سیگنال لومینسانس در آنها، بیشتر در سن‌یابی به روش لومینسانس استفاده می‌شوند. ذرات فلدسپار برخلاف ذرات کوارتز، در معرض پدیده محوشدگی غیرعادی سیگنال لومینسانس^۱ قرار می‌گیرند که استفاده از آنها در سن‌یابی به روش لومینسانس را با چالش‌هایی جدی همراه می‌سازد [۱۵، ۱۷]. از این‌رو در پژوهش حاضر، از سن‌یابی ذرات کوارتز با تکیه بر روش لومینسانس تحریک‌شده با نور استفاده شد.

مبانی حاکم بر سن‌یابی به روش لومینسانس، در شکل ۳ نشان داده شده است. رسوبات در گذر زمان و تحت اثر عواملی همچون فرسایش، انتقال و رسوبگذاری، روی هم انباشته و دفن می‌شوند. عناصر پرتوزای موجود در رسوبات و محیط پیرامون آنها (مانند اورانیوم، توریم و پتاسیم)، به‌صورت پیوسته با پدیده واپاشی مواجه می‌شوند. در نتیجه تابش پرتوهای آلفا، بتا و گاما، اتم‌ها را درون کانی‌های خود یونیزه می‌کنند و سیگنال لومینسانس در آنها شروع به انباشته شدن می‌کند. سپس با رخ دادن یک حادثه طبیعی (مانند زمین‌لرزه)، این ذرات در معرض نور خورشید قرار می‌گیرند و بازنشانی^۲ می‌شوند (سیگنال لومینسانس خود را از دست می‌دهند). سپس رسوبات بار دیگر در درون زمین دفن می‌شوند و فرایند ذخیره‌سازی و انباشت سیگنال‌های لومینسانس در آنها آغاز می‌شود. ذخیره‌سازی سیگنال‌های لومینسانس در آنها با گذشت زمان افزایش می‌یابد تا زمانی که عملیات نمونه‌برداری و جمع‌آوری نمونه‌ها صورت گیرد و نمونه مدنظر به‌منظور قرارگیری در معرض عوامل تحریک‌کننده و تعیین سن، به آزمایشگاه لومینسانس منتقل شود. چنانچه سیگنال لومینسانس نمونه با تحریک توسط نور مرئی در آزمایشگاه دریافت شود، لومینسانس تحریک‌شده با نور (OSL) نامیده می‌شود [۱۶].

اساس سن‌یابی به روش لومینسانس، مبتنی بر یافتن دو شاخص اساسی است: دز معادل دز طبیعی (De) و نرخ دز (Dt). دز معادل دز طبیعی، میزان دز تابشی است که در آزمایشگاه به نمونه داده می‌شود تا سیگنالی مشابه با سیگنال لومینسانس طبیعی (که نمونه رسوبی پس از آخرین صفرشدگی سیگنال لومینسانس تا زمان اجرای عملیات نمونه‌برداری به دست آورده است) را تولید کند. نرخ دز میزان دز تابشی کلی است که نمونه مدفون به‌صورت سالانه از تابش عناصر پرتوزای محیطی دریافت می‌کند. در نهایت با تعیین پارامترهای دز معادل دز طبیعی و نرخ دز و تقسیم این دو پارامتر بر یکدیگر (رابطه ۱)، می‌توان سن یک نمونه رسوبی را تعیین نمود [۱۳، ۲۲].

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{دز معادل دز طبیعی (گری)} = \frac{\text{نرخ دز (گری)}}{\text{سن نمونه (سال)}}$$

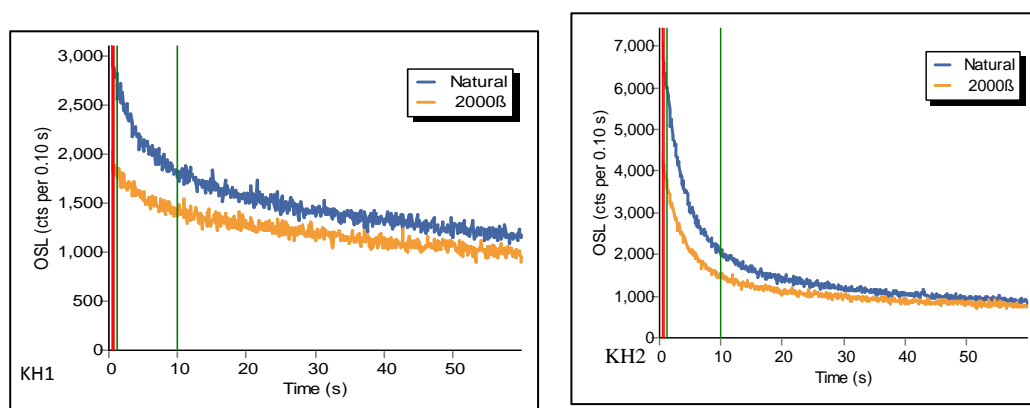


شکل ۳. مبانی حاکم بر سن یابی به روش لومینسانس [۱۶].

۳. یافته‌های پژوهش

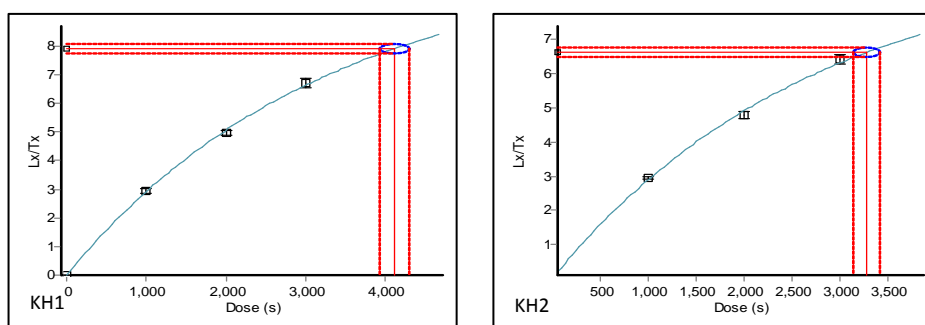
۳.۱. اندازه‌گیری دز معادل دز طبیعی

به منظور اندازه‌گیری دز معادل دز طبیعی، ابتدا تعداد زیادی دانه خالص کوارتز از نمونه مدنظر روی دیسک‌هایی آلومینیومی به نام الیکوت^۱ چسبانده شدند. سپس الیکوت‌های حاوی دانه‌های کوارتز، در دستگاه اندازه‌گیری Lexsyg Smart قرار گرفتند. کار این دستگاه، مبتنی بر روش بازتولید الیکوت منفرد (SAR^۲) است [۲۲]. مطابق با روش SAR، ابتدا الیکوت‌های حاوی نمونه با چشمه‌های نوری (با شدت و طول موج مشخص) تحریک شدند و سپس سیگنال‌های لومینسانس طبیعی برای هر یک از آنها اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس طبیعی، نمونه ابتدا در معرض دزهای آزمایشگاهی مشخصی قرار گرفت. سپس سیگنال لومینسانس حاصل از هر کدام از دزهای تابشی، اندازه‌گیری شد (شکل ۴). در ابتدا توانایی این روش در باز یابی دز تابشی مشخصی که در آزمایشگاه به نمونه داده شده بود بررسی شد. آن‌گاه با استفاده از دزهای آزمایشگاهی اعمال شده و سیگنال اندازه‌گیری شده حاصل از آنها، منحنی استاندارد لومینسانس ترسیم شد و دز معادل دز طبیعی به دست آمد (شکل ۵). در نهایت متوسط De‌های حاصل از مجموعه الیکوت‌های حاوی دانه‌های کوارتز از نمونه مدنظر، به سه روش وزنی، ستونی و شعاعی محاسبه شده [۹] (شکل‌های ۶ و ۷) و دز معادل دز طبیعی نهایی برای هر دو نمونه رسوبی KH1 و KH2 برآورد شد (جدول ۱).

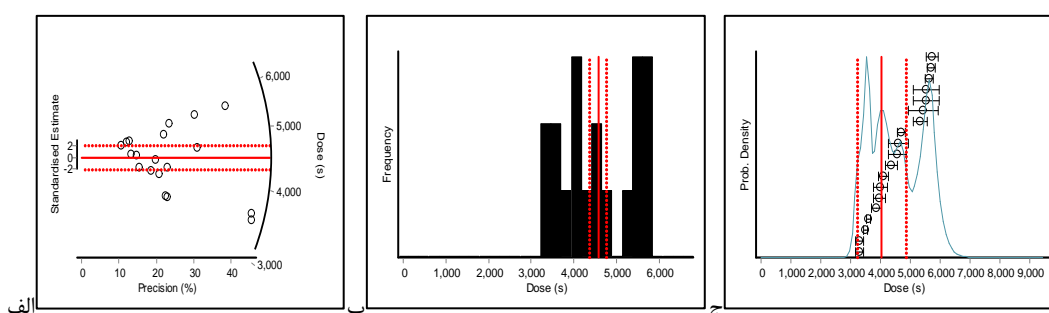


شکل ۴. نمونه‌ای از سیگنال لومینسانس طبیعی کوارتز برای نمونه‌های KH1 و KH2.

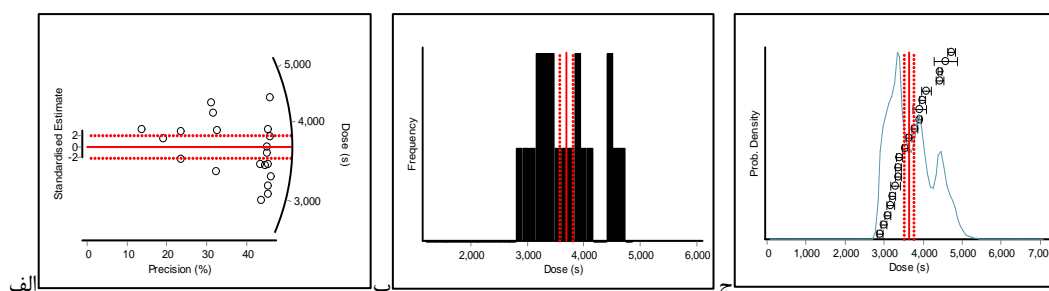
1. Aliquot
2. Single Aliquot Regeneration (SAR) method



شکل ۵. منحنی استاندارد لومینسانس. خط قرمز افقی، بیانگر سیگنال تصحیح شده حاصل از دز طبیعی دریافت شده از طبیعت و خط قرمز عمودی بیانگر دز معادل دز طبیعی اندازه گیری شده برای نمونه های KH1 و KH2 است.



شکل ۶. نتایج دز معادل دز طبیعی برای نمونه KH1؛ با استفاده از روش های الف) وزنی؛ ب) ستونی؛ ج) شعاعی.



شکل ۷. نتایج دز معادل دز طبیعی برای نمونه KH2؛ با استفاده از روش های الف) وزنی؛ ب) ستونی؛ ج) شعاعی.

۲.۳. تعیین سن و برآورد نرخ لغزش

با اندازه گیری دز معادل دز طبیعی (محاسبه شده با استفاده از روش SAR) و نرخ دز (تعیین شده توسط آنالیز ICP-MS) و با تقسیم این دو پارامتر بر یکدیگر، سن هر یک از نمونه های رسوبی برداشت شده از سایت خلیل آباد (KH1 و KH2) محاسبه شد (جدول ۱). سپس با توجه به کل جابه جایی اندازه گیری شده (260 ± 40 متر)، سن به دست آمده در سطح و بدون در نظر گرفتن خطاها، نرخ لغزش بخش مرکزی سامانه گسلی درونه در سایت خلیل آباد برای آخرین دوران رسوبگذاری (۱۰۲۸۰۰-۸۹۷۰۰ سال) در حدود ۲/۱-۳/۳ میلی متر در سال برآورد شد.

جدول ۱. نتایج دز معادل دز طبیعی، نرخ دز و سن مرتبط با نمونه های KH1 و KH2 که از دو عمق مختلف برداشته شده است.

نام نمونه	دز معادل دز طبیعی (Gy)	خطا (Gy)	عمق (m)	نرخ دز (Gy/Ka)	خطا (Gy/Ka)	سن نمونه (Ka)
KH1	۳۶۲/۵	۱۵/۹	۰/۳۵	۳/۷۷	۰/۱۵	۹۶/۳±۶/۵
KH2	۲۹۵/۵	۱۲/۹	۰/۳	۳/۲۷	۰/۱۴	۹۰/۳±۰/۵۶

۴. بحث و نتیجه‌گیری

قرارگیری در امتداد کمربند کوهزایی آلپ هیمالیا، همجواری با گسل‌های فعال و ساخت‌وساز در حریم گسل‌ها، گواه نامبارکی است مبنی بر اینکه کشور ایران میراثدار وضعیتی نامطلوب از دیدگاه خطر زمین‌لرزه بوده و به‌شدت آسیب‌پذیر است. در چنین شرایطی به نظر نمی‌رسد که با دانش کنونی بشر، جز طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، راهی برای مقابله با این پدیده طبیعی وجود داشته باشد. بدون شک گام اول برای تحقق این مهم نیز چیزی جز تحلیل خطر زمین‌لرزه نیست. از طرفی پیش‌نیاز بنیادین برای تحلیل خطر زمین‌لرزه، شناسایی گسل‌های فعال و تعیین شدت فعالیت روی آنهاست. امروزه به‌منظور پی بردن به شدت فعالیت گسل‌های فعال، شاخصی مهم با عنوان نرخ لغزش گسل بررسی می‌شود. یکی از چالش‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ها به‌ویژه در گستره‌هایی با داده‌های لرزه‌ای اندک و پیشینه لرزه‌خیزی ناکافی (مانند ایران مرکزی-خاور ایران)، ناشناخته بودن شدت فعالیت و نرخ لغزش گسل‌هاست. از این‌رو اهمیت شناسایی گسل‌های فعال و تعیین نرخ لغزش روی آنها در چنین گستره‌هایی دوچندان به نظر می‌رسد.

سامانه گسلی درونه در شمال خردقاره ایران مرکزی-خاور ایران، خاستگاه زمین‌لرزه‌های اندکی در سده بیستم بوده است و به‌لحاظ لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی چندان فعال به نظر نمی‌رسد، اما شواهد متعددی در آن مانند شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی شامل جابه‌جایی آبراهه‌ها [۳،۱۲،۲۹] و واحدهای زمین‌شناسی [۱،۳]، به فعالیت این سامانه گسلی در دامنه زمانی کواترنری پایانی اشاره می‌کنند. این سامانه گسلی پس از راندگی اصلی زاگرس، طولانی‌ترین گسل در ایران به شمار می‌رود که جنبش‌های احتمالی آن ممکن است بسیار ویرانگر باشد.

در پژوهش حاضر، نرخ لغزش بخش مرکزی سامانه گسلی درونه (سایت خلیل‌آباد) در دامنه زمانی کواترنری پایانی برآورد شد. در این زمینه با استفاده از تصاویر QuickBird، ابتدا میزان جابه‌جایی آبراهه‌ها روی یک نسل از مخروط‌افکنه قدیمی در سایت خلیل‌آباد که در اثر فعالیت سامانه گسلی درونه جابه‌جا شده است، در حدود ۲۶۰ متر اندازه‌گیری شد. سپس با اجرای عملیات نمونه‌برداری، دو نمونه رسوبی از سطح مخروط‌افکنه برداشته شد که با استفاده از روش لومینسانس تحریک‌شده با نور سن‌یابی شدند. در نهایت آخرین دوران رسوبگذاری و نرخ لغزش این بخش از سامانه گسلی درونه، به ترتیب در حدود ۱۰۲۸۰۰-۸۹۷۰۰ سال و ۲/۱-۳/۳ میلی‌متر در سال برآورد شد که با برخی از پژوهش‌های پیشین در بخش مرکزی این پهنه گسلی همخوانی دارد. نتایج این پژوهش، ضرورت پژوهش‌های بیشتر با استفاده از روش‌های دیگر به‌منظور تعیین نرخ لغزش روی بخش‌های مختلف سامانه گسلی درونه در دامنه‌های زمانی متفاوت را نشان می‌دهد. این در حالی است که اگر همخوانی مناسبی میان نرخ لغزش امروزی و متوسط نرخ لغزش در دوران گذشته روی سامانه گسلی درونه وجود نداشته باشد، اساساً تردیدهای بسیاری در زمینه استفاده از نتایج نرخ لغزش در پژوهش‌های ارزیابی خطر زمین‌لرزه روی این سامانه گسلی شکل خواهد گرفت.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم که با دقت نظر و پیشنهادهای سازنده خود سبب بهبود مقاله شدند بسیار سپاسگزاریم.

منابع

- [۱] امینی، حمیده؛ فتاحی، مرتضی؛ و قاسمی، محمدرضا (۱۳۸۹). آشکارسازی پویایی نوین گسل درونه با کمک داده‌های دورسنجی و اطلاعات زمین‌شناسی. *علوم زمین*، ۱۹(۷۶)، ۵۷-۶۲.
- [۲] امینی، حمیده؛ فتاحی، مرتضی؛ و قاسمی، محمدرضا (۱۳۹۰). محاسبه نرخ لغزش در منطقه شش‌تراز گسل درونه به روش هیستوگرام و حداقل سن با استفاده از لومینسانس برانگیخته‌شده با نور. *ژئوفیزیک ایران*، ۵(۳)، ۲۹-۱۴.
- [۳] جوادی کاریزکی، حمیدرضا (۱۳۸۵). زمین‌ساخت جنبه، لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل سامانه گسل درونه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، تهران، ایران.
- [۴] حقیقی، سبا؛ فتاحی، مرتضی؛ و امینی، حمیده (۱۴۰۰). استفاده از لومینسانس نوری فرورسرخ به منظور اندازه‌گیری نرخ لغزش گسل درونه در خلیل‌آباد. *کواترنری ایران*، ۶(۲)، ۳۰۰-۳۲۴.
- [۵] زارع، مهدی (۱۳۷۹). تحلیل لرزه‌زمین‌ساختی سیستم گسله درونه و بررسی زلزله‌های زمستان ۱۳۷۸ - بهار ۱۳۷۹ کاشمر. *پژوهش‌نامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*، ۳۲-۳۰-۴۰.
- [۶] فتاحی، مرتضی (۱۴۰۰). بررسی عوامل مؤثر در نمونه‌برداری برای سن‌یابی به روش لومینسانس نوری. *ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۳)، ۲۷-۴۶.
- [۷] مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۳). رویکرد جدید به مخاطرات محیطی و توسعه پایدار در ایران. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۷۳-۸۴.
- [8] Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia Eurasia collision and the comparison of short term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23.
- [9] Duller, G.A.T. (2015). Analyst v4.31.7 user manual. Technical report.
- [10] Farbod, Y., Bellier, B., Shabanian, E., & Abbassi, M. R. (2011). Geomorphic and structural variations along the Doruneh Fault System (central Iran). *Tectonics*, 30, TC6014, doi: 10.1029/2011TC002889.
- [11] Farbod, Y., Shabanian, E., Bellier, O., Abbassi, M., Braucher, R., Benedetti, L., & Hessami, K. (2016). Spatial variations in late Quaternary slip rates along the Doruneh Fault System (Central Iran). *Tectonics*, 35, 386 – 406.
- [12] Fattahi, M., Walker, R. T., Khatib, M. M., Dolati, A., & Bahroudi, A. (2007). Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, 168, 691-709.
- [13] Fattahi, M. (2009). Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods: A review. *Quat. Int.*, 199, 104-146, doi:10.1016/j. quaint.2008.06.015.
- [14] Foroutan, M., Nazari, H., Meyer, B., Sébrier, M., Fattahi, M., Le Dortz, K., Ghorashi, M., Hessami, Kh., Ghassemi, M. R., & Talebian, M. (2012). Late Pleistocene-Holocene Right- Slip Rate of The Dehshir Fault, Central Iran Plateau. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences. GSJ*. 1023-7429. <https://doi.org/10.22071/gsj.2011.54458>.
- [15] Karimi Moayed, N., Fattahi, M., Autzen, M., Haghshenas, E., Tajik, V., Shoaie, Z., Bailey, M., Sohbat, R., & Murray, A. S. (2024). *The sensitisation of quartz extracted from andesite, Radiation Measurements*. 170, 107048, ISSN 1350-4487, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2023.107048>.
- [16] Krapf, C. B. E., Werner, M., Questiaux, D., Spooner, N., Williams, F., & Dutch, R. (2018). Optically stimulated luminescence dating revealing new insights into the age of major regolith units of the eastern Musgrave Province, South Australia. Report Book 2018/00004. Department for Energy and Mining, South Australia, Adelaide.
- [17] Lamothe, M., Brisson, L. F., & Hardy, F. (2020). Circumvention of anomalous fading in feldspar luminescence dating using Post-Isothermal IRSL. *Quaternary Geochronology*, 57, 101062, ISSN 1871-1014, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101062>.
- [18] Masson, F., Chéry, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., & Ghafory-Ashtiani, M. (2005). Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data. *Geophysical Journal International*, 160(1), 217-226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02465.x>.
- [19] Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignières, M., Nankali, H., & Van Gorp, S. (2007). Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophysical Journal International*, 170(1), pp. 436-440. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03477.x>.
- [20] Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R.T., Tavakoli, F., Pathier, E., Nankali, H.R.E.A., Nilfouroushan, F., & Djamour, Y. (2013). Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. *Earth and Planetary Science Letters*, 377, 287-298.
- [21] Mousavi, Z., Fattahi, M., Khatib, M., Talebian, M., Pathier, E., Walpersdorf, A., et al. (2021). Constant slip rate on the Doruneh strike-slip fault, Iran, averaged over late Pleistocene, Holocene, and decadal timescales. *Tectonics*, 40, e2020TC006256. <https://doi.org/10.1029/2020TC006256>.

- [22] Murray, A. S., & Wintle, A. G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32: 57–73, DOI 10.1016/S1350-4487(99)00253-X.
- [23] Pezzo, G., Tolomei, C., Atzori, S., Salvi, S., Shabaniyan, E., Bellier, O., & Farbod, Y. (2012). New kinematic constraints of the western Doruneh fault, northeastern Iran, from interseismic deformation analysis. *Geophysical Journal International*, 190(1), 622–628, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05509.x>.
- [24] Tavakoli, F. (2007). Present-day deformation and kinematics of the active faults observed by GPS in the Zagros and east of Iran. Ph. D. Thesis, 313P.
- [25] Tchalenko, J. S., Berberian, M., & Behzadi, H. (1973). Geomorphologic and seismic evidence for recent activity on the Doruneh Fault, Iran. *Tectonophysics*, 19(4), 1973, Pages 333-341, ISSN 0040-1951, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(73\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(73)90027-9).
- [26] Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., & Chéry, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157(1), pp. 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>.
- [27] Walker, R. T., & Fattahi, M. (2011). A framework of Holocene and Late Pleistocene environmental change in eastern Iran inferred from the dating of periods of alluvial fan abandonment, river terracing, and lake deposition. *Quaternary Science Reviews*, 30(9–10), 1256-1271, ISSN 0277-3791, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.004>.
- [28] Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., & Nankali, H. (2014). Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1359-1383.
- [29] Wellman, H. W. (1966). Active wrench faults of Iran, Afghanistan and Pakistan. *Geol Rundsch* 55, 716–735 (1966). <https://doi.org/10.1007/BF02029650>.