

Determining the slip rate of Rafsanjan fault using the age of the samples taken from that fault and comparing the results of the two software analysts and R

Latif Seyed Mohammadi Emam¹, Nasrin Karimi Moaed², Morteza Fattahi^{3*} , Hamide Amini⁴

1. Master of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. PhD Student of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. *Corresponding Author*, Associate Professor of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Assistant Professor of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 04 January 2021

Revised: 09 August 2022

Accepted: 24 August 2022

Keywords:

Luminescence dating, Slip rate, Analyst Software, R Software.

Fault slip rate is the amount of displacement of one wall relative to another fault wall over a period of time. The duration of this shift can be measured using the luminescence dating method. To determine the age by luminescence dating method, two dose parameters equivalent to normal dose and annual dose are needed. By dividing the dose equivalent to the natural dose by the annual dose rate, the age value is determined per structural unit. To determine the dose equivalent to the normal dose, a protocol for measuring luminescence signals (data) and a program for analyzing the data are required. Data analysis was performed using R software. Because the usual international program to do this is analytics software. Data were also analyzed with analyst software. The results of these two softwares and their effect in determining the slip rate of Rafsanjan fault were compared. The amount of displacement measured on the Rafsanjan fault is 48 ± 4 meters. The age was estimated to be 97-118 thousand years using R software and 101-129 thousand years by analyst software. Slip rates were obtained by R software and analysts, 0.41 to 0.53 and 0.36 to 0.48 mm / year, respectively. Slip rates were obtained by R software and analysts, 0.41 to 0.53 and 0.36 to 0.48 mm / year, respectively.

Cite this article: Seyed Mohammadi Emam, L., Karimi moayed, N., Fattahi, M., & Amini, H. (2022). Determining the slip rate of Rafsanjan fault using the age of the samples taken from that fault and comparing the results of the two software analysts and R. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(33), 101-120.

DOI: 10.22111/jneh.2022.37020.1748



© Morteza Fattahi

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.37020.1748

* Corresponding Author Email: mfattahi@ut.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره یازدهم، شماره ۳۳، پاییز ۱۴۰۱

تعیین نرخ لغزش گسل رفسنجان با استفاده از سن نمونه های برداشت شده و مقایسه نتایج حاصل از دو نرم افزار آنالیز و آر

لطیف سید محمدی امام^۱، نسرین کریمی موید^۲، مرتضی فتاحی^{۳*}، حمیده امینی^۴

۱. دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی مقطع دکتری، گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)

۴. استادیار، گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نرخ لغزش گسل میزان جابجایی یک دیواره نسبت به دیواره دیگر گسل در مدت زمانی مشخص است. مدت زمان این جابجایی را می-توان با استفاده از روش سن-یابی لومینسانس اندازه گیری کرد. برای تعیین سن به روش سن-یابی لومینسانس به دو پارامتر دز معادل دز طبیعی و دز سالانه نیاز است. با تقسیم دز معادل دز طبیعی به نرخ دز سالانه، سن واحد ساختاری مشخص می-شود. برای تعیین دز معادل دز طبیعی، نیاز به پروتکلی برای اندازه گیری سیگنال های لومینسانس (داده ها) و برنامه ای برای آنالیز داده ها است. آنالیز داده ها با بهره گیری از نرم افزار آر انجام شد. از آنجا که برنامه رایج بین المللی جهت انجام این مهم، نرم افزار آنالیز است. داده ها با این نرم افزار نیز تحلیل گردید. نتایج حاصل از این دو نرم افزار و تاثیر آن در تعیین نرخ لغزش گسل رفسنجان مقایسه شد. مقدار جابجایی اندازه گیری شده بر روی گسل رفسنجان 4 ± 48 متر می باشد. سن بدست آمده با استفاده از نرم افزار آر، ۹۷-۱۱۸ هزار سال و توسط نرم افزار آنالیز ۱۰۱-۱۲۹ هزار سال برآورد شد. نرخ لغزش توسط نرم افزار آر و آنالیز به ترتیب، ۰/۴۱ الی ۰/۵۳ و ۰/۳۶ الی ۰/۴۸ میلیمتر بر سال به دست آمد. لذا تقریباً نتایج یکسانی برای نرخ لغزش گسل رفسنجان با استفاده از این دو نرم افزار بدست آمد. اما کیفیت گرافیکی و تحلیل آماری نرم افزار آر اطلاعات کامل تری نسبت به آنالیز ارائه داد.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲	
واژه های کلیدی:	
سن-یابی به روش لومینسانس، نرخ لغزش، نرم افزار آنالیز، نرم افزار آر.	

استناد: سید محمدی امام، لطیف، کریمی موید، نسرین، فتاحی، مرتضی، & امینی، حمیده. (۱۴۰۱). تعیین نرخ لغزش گسل رفسنجان با استفاده از سن نمونه های برداشت شده و مقایسه نتایج حاصل از دو نرم افزار آنالیز و آر. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۳)، ۱۰۱-۱۲۰.

DOI: 10.22111/jneh.2022.37020.1748



© لطیف سید محمدی امام، نسرین کریمی موید، مرتضی فتاحی*، حمیده امینی.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

گسل رفسنجان با طولی برابر با ۲۰۰ کیلومتر در ناحیه شرقی شهرستان رفسنجان و در منطقه‌ای با تراکم جمعیتی بالا و در نزدیکی شهرهای بزرگ (کرمان، رفسنجان، بردسیر، سیرجان) قرار دارد. بنابراین، مطالعه این گسل و تعیین میزان نرخ لغزش سالانه آن جهت تحلیل خطر زمین‌لرزه آینده اهمیت پیدا می‌کند (واکر، ۲۰۰۶)^۱. نرخ لغزش^۲ گسل پارامتری است که نشان‌دهنده میزان تغییرات سالانه در سرعت حرکت یک دیواره گسل نسبت به دیواره دیگر آن است و با توجه به مقدار آن، امکان برآورد توان رخداد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگ‌گای وابسته به آستانه‌های مختلف در زمان‌های مختلف در آن گسل، وجود خواهد داشت.

برآورد میزان متوسط نرخ لغزش گسل به دو روش کلی، روش‌های ژئودتیک و روش‌های زمین‌شناسی میسر است. روش‌های ژئودتیک خود به دو طریق، سیستم موقعیت یاب جهانی^۳ و سیستم تداخل‌سنج رادار دریچه مصنوعی^۴ و روش‌های زمین‌شناسی نیز به دو طریق، دوران طولانی مدت زمین‌شناسی، توسط سن‌یابی نسبی و دوران متوسط، توسط سن‌یابی مطلق می‌توانند صورت بگیرند. نرخ لغزش اندازه‌گیری شده توسط سیستم موقعیت یاب جهانی و سیستم تداخل‌سنج رادار دریچه مصنوعی با استفاده از اطلاعات دوره زمانی کوتاه مدت برآورد می‌شود و این سیستم همزمان دو مولفه نرخ لغزش، میزان جابجایی و زمان جابجایی، را اندازه می‌گیرد (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ گومز و همکاران، ۲۰۰۷). زمین‌شناسان برای تعیین سن طولانی مدت ساختارهای زمین‌شناسی اصولی پایه‌ریزی کرده‌اند (به عنوان نمونه چینه‌شناسی لایه‌های رسوبی) که با استفاده از آنها، سن واحدهای زمین‌شناسی به صورت نسبی ارائه می‌شوند (پپ و دینو، ۲۰۱۳). با تعیین میزان جابجایی در یک ساختار زمین‌شناسی، نرخ لغزش نسبی طولانی مدت محاسبه می‌شود. روش متوسط و کوتاه مدت تعیین نرخ لغزش نیز به روش سن‌یابی مطلق بدست می‌آید. در گذشته با استفاده از روش سن‌یابی لومینسانس نوری که یک روش مطلق سن‌یابی است نرخ لغزش برخی گسل‌های ایران با موفقیت بدست آمده است. به عنوان مثال می‌توان گسل درونه (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷؛ امینی و ۲۰۱۱؛ امینی و همکاران، ۲۰۱۶)؛ گسل سبزواری (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۶)؛ گسل نیشابور (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰)؛ گسل شمال نیشابور (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰)؛ گسل انار (لی درتزر و همکاران، ۲۰۰۹؛ فروتن و همکاران، ۲۰۱۱)؛ گسل دهشیر (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷؛ نظری و همکاران، ۲۰۰۹)؛ گسل پردیسان (طالبیان و همکاران، ۲۰۱۶)؛ گسل دشت بیاز (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ فتاحی و همکاران، ۲۰۱۵؛ فتاحی و همکاران، ۲۰۱۹)؛ گسل گوک (واکر و همکاران، ۲۰۱۰؛ فتاحی و همکاران، ۲۰۱۴؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۲)؛ گسل دهشیر (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷؛ فروتن و همکاران، ۲۰۱۲)؛ گسل مشاء (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۴)؛ گسل طبس (واکر و همکاران، ۲۰۱۵) را نام برد. در این مطالعه نیز، از روش تعیین سن لومینسانس نوری برای تعیین سن رسوبات برداشت‌شده از گسل رفسنجان و برآورد نرخ لغزش آن استفاده می‌شود. نرخ لغزش گسل رفسنجان در مطالعات گذشته با استفاده از نرم-افزار آنالیزت، و فلدسپار اندازه‌گیری شده است (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱)، در این بررسی نرخ لغزش این گسل با استفاده از نرم‌افزار آر و کوارتز و فلدسپار برآورد می‌شود. نرم‌افزار R (آر)، نرم‌افزاری است که به دلیل ویژگی آماری و

¹ Walker, 2006

² slip rate

³ Global Position System

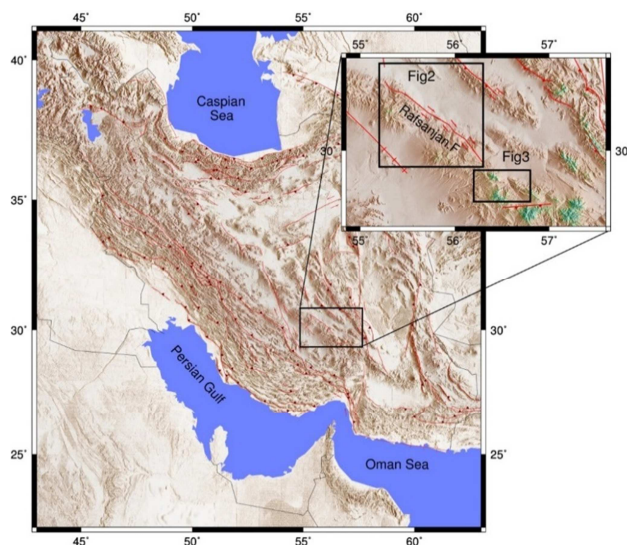
⁴ InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar

نتایج گرافیکی با کیفیت زیاد آن، کاربرد آن به سرعت در رشته‌های مختلف از جمله ژنتیک، کشاورزی، زیست-شناسی، مدیریت و ... در حال گسترش است. در علم دیرینه زلزله‌شناسی نیز به دلیل قابلیت خوب این نرم‌افزار چه از لحاظ آماری و چه از لحاظ نتایج گرافیکی آن، می‌توان برای سنجایی رسوبات به مانند نرم‌افزار آنالیست از آن استفاده کرد. تیم آر لومینسانس متشکل از دانشمندانی است که بر روی پکیجی با نام آر لومینسانس کار می‌کنند و با کدنویسی در نرم‌افزار آر به دنبال جایگزین مناسبی برای نرم‌افزار آنالیست هستند. با استفاده از این نرم‌افزار مطالعاتی انجام شده است که می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط کروتزر و همکاران (۲۰۱۲)، دیتز و همکاران (۲۰۱۳)، بارو و همکاران (۲۰۱۵)، فردریک و همکاران (۲۰۱۶) و کروتزر و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد. مقایسه نتایج حاصل از تخمین نرخ لغزش با استفاده از آر و آنالیست برای گسل رفسنجان و همچنین مزایا و معایب هر کدام از دو نرم‌افزار بحث کلی و اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

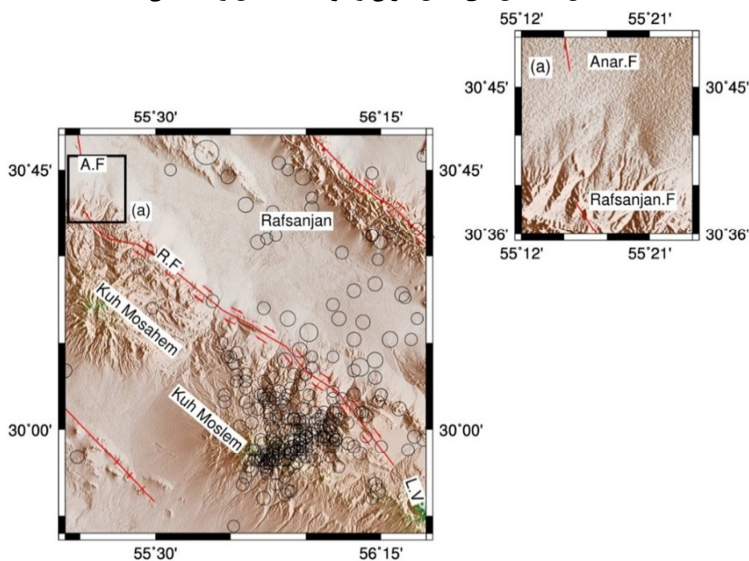
داده‌ها و روش‌ها

گسل رفسنجان و وضعیت لرزه خیزی منطقه:

گسل رفسنجان اولین بار توسط بربریان (۱۹۷۶) معرفی شد، او راستای گسله را شمال باختری- جنوب خاوری تعیین کرده است (شکل ۱). شیب این گسل به سمت جنوب باختر است. بربریان (۱۹۷۶)، طول این گسل را ۱۲۰ کیلومتر تعیین کرد که از انتهای جنوب شرقی دامنه کوه مزاحم شروع شده و ادامه آن از کوه مامسر و همچنین روستای باغ بزم عبور می‌کند و در قسمت شمال باختری توسط کوه مزاحم به گسل راستالغز راست بر انار می‌پیوندد و در قسمت جنوب باختری تا ابتدای دره لاله‌زار ادامه می‌یابد (شکل ۲). به عقیده بربریان، گسله رفسنجان یک گسله پی سنگی است که در بخشی از پهنه وسیع‌تر دگرشکلی کواترنری پسین واقع شده است که به نظر می‌رسد گسل راستالغز راست بر سبزواران (جیرفت) را به سامانه گسله‌های راستالغز در مرکز ایران پیوند می‌دهد (شیخ الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۱: گسل‌های فعال ایران و موقعیت گسل رفسنجان

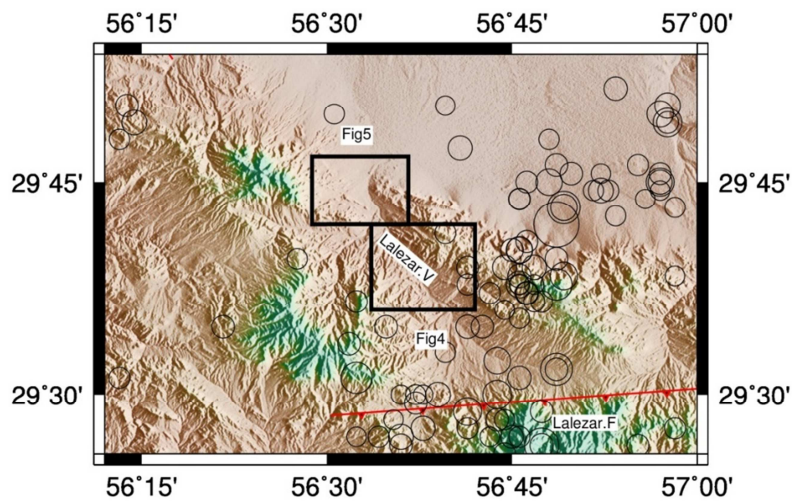


شکل ۲: نمایی از گسل رفسنجان همراه با زمین لرزه‌های رخ داده در اطراف آن از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ میلادی (استخراج شده از سایت لرزه نگاری ایران). در قسمت انتهایی شمال باختری گسل رفسنجان توسط کوه‌های کوه مسلم به گسل انار (A.F) می‌رسد و در قسمت انتهایی جنوب خاوری به دره لاله زار (L.V) می‌رسد.

بزرگ‌ترین زمین‌لرزه تاریخی ثبت‌شده در منطقه رفسنجان مربوط به ۲۲ سپتامبر ۱۹۲۳ است، که طی این رخداد روستاهای زیادی تخریب شدند. طبق گزارش ارائه‌شده توسط آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲)؛ پس لرزه‌ای بزرگ نیز هفت ساعت بعد از زمین‌لرزه اصلی خرابی‌های بسیار زیادی را به وجود آورد و نزدیک به ۲۰۰ نفر کشته برای این زمین‌لرزه گزارش شده است. موقعیت رومرکز زمین‌لرزه در داخل دره لاله زار (رودخانه آبه لاله زار- روستای چمن رنگ (شکل ۳)) مشخص شده است (شکل ۴). در این زمین‌لرزه روستاهای لاله زار، گوهر، خطیب، قلعه‌عسکر نابود و تخریب

شدند. تخریب تا شمال، تا روستاهای باغ بزم و گوک احمر گسترش داشته است. کمترین آسیب به رفسنجان و رایان و کرمان رسید. گزارش تخریب بدین صورت بود که نواحی عمود برگسل بیشترین تخریب بوجود آمده و در راستای گسل کمترین تخریب را داشته‌ایم (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱).

میزان شکستگی مشاهده شده در سطح زمین در روستای باغ بزم (این شکستگی در امتداد گسل رفسنجان بوده و به نظر بربریان (۱۹۷۶)، شکستگی موردنظر جزئی از گسل رفسنجان نیست) و رومرکز تعیین شده برای زمین‌لرزه ۱۹۲۳ (روستای چمن رنگ- داخل دره لاله‌زار) نظر فتاحی و همکاران (۲۰۱۱) را به این مهم جلب کرد که آیا شکستگی موردنظر ارتباطی با گسل رفسنجان دارد؟ (شکل ۳). آنها با فرض اینکه این شکستگی مرتبط با این زمین‌لرزه است، از رابطه میانگین جابجایی در سطح و ممان مغناطیسی برای گسل‌های راستالغز استفاده کرده و بزرگای ۷/۵ را برای این زمین‌لرزه به دست آوردند. همچنین از این روابط برای برآورد طول گسیختگی نیز استفاده کردند. بدین شکل که اگر بزرگای زلزله بین ۷/۲ تا ۷/۵ باشد طول گسیختگی ۶۵ تا ۱۲۵ کیلومتر خواهد بود و این نکته می‌تواند تعیین‌کننده این مهم باشد که دره لاله‌زار جزئی از گسل رفسنجان است، بر همین اساس واکر (۲۰۰۶) طول این گسل را ۲۰۰ کیلومتر برآورد کرد (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۳: موقعیت دره لاله‌زار و زمین‌لرزه‌های ثبت شده از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ توسط مرکز لرزه‌نگاری ایران

از نظر اطلاعات لرزه‌خیزی گسل رفسنجان به شدت با کمبود داده مواجه است. اما برش و جابجایی بر روی رسوبات کواترنری نشان از جنب بودن گسل دارد و این خود علامت و هشدار خطری برای ساکنان حاشیه بلوک لوت، به دلیل دوره بازگشت طولانی زمین‌لرزه‌ها است (واکر، ۲۰۰۶؛ فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱).

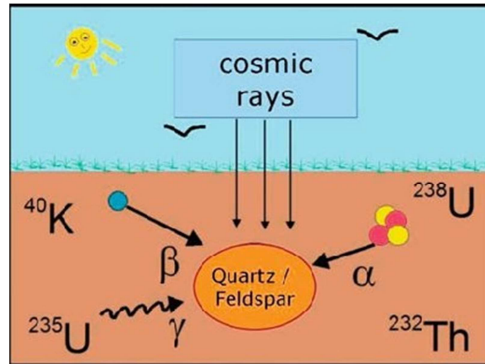
فتاحی و همکاران (۲۰۱۱) بر روی گسل رفسنجان جابجایی‌هایی را مشخص کردند. از جمله این موارد، در انتهای شرقی گسل رفسنجان، جایی که گسل به دره لاله‌زار وارد می‌شود، دو روند موازی گسل NW-SE بر روی دو

مخروطافکنه یکی جدید و آن یکی قدیمی تر دیده می‌شود. میزان کل جابجایی اندازه‌گیری شده برابر ۴۸ متر با عدم-قطعیت ۴ متر به‌دست آمده است.

اصول سن یابی به روش لومینسانس نوری:

رسوبات دوره‌های متفاوت زمین‌شناسی، طی گذر زمان روی هم انباشته شده و مواد پرتوزای موجود در رسوبات، با گذشت زمان دچار واپاشی می‌شوند (شکل ۷). تابش پرتوهای α و β و γ حاصل از واپاشی مواد پرتوزایی مانند $U238$ ، $Th232$ ، $K40$ و پرتوهای کیهانی، اتم‌ها را درون دانه‌های معدنی سیلیکاتی مانند کوارتز و فلدسپار (که در داخل رسوبات مدفون هستند) یونیزه می‌کنند. دانه‌های کوارتز و فلدسپار پتانسیل خوبی برای ذخیره‌سازی انرژی تابشی حاصل از واپاشی مواد پرتوزا دارند و از این رو، به عنوان دوزی متر (عناصر تعیین دوز جذبی) مورد استفاده قرار می‌گیرند (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰). در اثر یونش ناشی از تابش مواد پرتوزا، در کوارتز و فلدسپار، الکترون‌هایی که در باند ظرفیت قرار دارند، از اتم‌ها جدا شده، به باند هدایت می‌روند و در باند ظرفیت حفره‌ای (حفره: فضای خالی ایجاد شده در اتم طی خروج الکترون) ایجاد می‌شود؛ لیکن در باند هدایت، در حالت پایدار قرار ندارد و از این رو به تراز پایین‌تر انرژی سقوط می‌کنند و به تله می‌افتند. با گذر زمان یونش اتم‌ها ادامه می‌یابد و به تعداد الکترون‌های داخل تله افزوده می‌شود. زمانی که رسوبات طی یک حادثه طبیعی همانند زلزله، سیل و آتشفشان در معرض نور قرار می‌گیرند، سیگنال لومینسانس موجود در آنها به‌طور کامل یا ناقص تحت تأثیر نور از بین می‌رود و ساعت لومینسانس صفر می‌شود. به عبارتی دیگر، نور باعث تحریک الکترون‌های به تله افتاده می‌شود و به آنها انرژی کافی برای رهایی داده می‌شود، الکترون‌ها از تراز انرژی به باند هدایت انتقال می‌یابند؛ اما الکترون‌ها و حفره‌ها در حالت پایدار نیستند و در ساده‌ترین فرضیه الکترون‌ها با حفره‌ها ترکیب مجدد می‌شوند و اختلاف انرژی به صورت فوتون تابیده می‌شود. و از زمانی که دوباره رسوب در داخل زمین دفن می‌شود و دیگر نوری به آن نمی‌رسد ذخیره-سازی سیگنال‌های لومینسانس (طی واپاشی مواد پرتوزا موجود در رسوبات) در آنها مجدداً شروع می‌شود و ساعت لومینسانس دوباره فعال می‌شود. سپس رسوبات موردنظر که طی یک حادثه طبیعی سیگنال آنها خالی شده و سپس دفن شده‌اند به آزمایشگاه منتقل می‌شوند. در آزمایشگاه رسوبات تحت تابش نور قرار می‌گیرند و سیگنال آنها که ناشی از الکترون‌های ذخیره شده در تله‌ها است اندازه‌گیری می‌شود. نور حاصل لومینسانس نام دارد و به دلیل برانگیختگی توسط نور، آن را لومینسانس تحریک شده با نور^۱ می‌گویند. بنابراین، با اندازه‌گیری لومینسانس طبیعی می‌توان زمان آخرین نور خوردگی دانه های فلدسپار و کوارتز رسوبات ماده معدنی را تعیین کرد (حیدری و فتاحی، ۱۳۹۵).

¹ Optically Luminescence Dating



شکل ۴: تجمع سیگنال در دانه‌های کوارتز و فلدسپار (لبریتس و همکاران ۲۰۱۳)

بنابراین، هرگاه دانه‌های کوارتز و فلدسپار رسوبات، پس از خالص‌سازی تحریک شوند، میزان انرژی آزاد شده از آن‌ها می‌تواند مدت زمان دفن آنها در داخل زمین را نشان دهد. شدت سیگنال لومینسانس طبیعی (N)، با انرژی تابشی جذب‌شده پس از دفن‌شدگی متناسب است؛ مقدار انرژی جذب شده (دُز طبیعی^۱) با واحد گری^۲ ($\text{kg/J}=1\text{Gy}$) بیان می‌شود. برای اندازه‌گیری دُز طبیعی در آزمایشگاه، منحنی استاندارد تهیه می‌شود. با استفاده از اندازه‌گیری‌های مختلف آزمایشگاهی به کمک منحنی استاندارد، دُز معادل دُز طبیعی^۳ (De) نمونه‌های لومینسانس با آنالیز در برنامه‌های نرم افزاری، به دست می‌آید. سن آخرین صفرشدگی سیگنال لومینسانس به روش زیر قابل محاسبه است:

$$\text{سن نمونه} = \frac{\text{دُز معادل دُز طبیعی که نمونه در زمان دفن بودن دریافت نموده است (De)}}{\text{دُز سالانه؛ میزان رادیواکتیوی که نمونه از محیط ظرف یک سال دریافت نموده است}}$$

بنابراین در سن‌یابی به روش لومینسانس ضروری است دُز معادل دُز طبیعی و دُز سالانه^۴ محاسبه شود (آیتکن، ۱۹۷۰).

نمونه برداری:

مواد مخروط‌افکنه منطقه عمدتاً از سنگ‌های آذرین و آتشفشانی تشکیل شده است، که از ناحیه جنوبی کوه مامسر مشتق شده است. در شکل ۵ نقاط نمونه‌برداری شده، مشخص شده‌اند (نقاط A, B). نمونه‌ها از دو نقطه با ویژگی‌های مشابه بر روی مخروط‌افکنه مورد نظر توسط فتاحی و همکاران برداشت شده‌اند. از هر نقطه دو نمونه توسط لوله‌آهنی برداشت و در نهایت با کاغذ آلومینیوم، انتهای آنها پر شده و هر کدام در داخل پلاستیک‌های سیاه ضد نور پیچانده می‌شوند.

¹ Natural Dose

² Gray

³ Equivalent Dose

⁴ Dose Rate



شکل ۵: موقعیت جغرافیایی چاه های نمونه برداری (A(29:45:41.1 N 56:31:29.9E) و B(29:43:58.8 N 56:32:57.8E) (گوگل ارث). بر روی چاه A دو نمونه RA1 , RA2 به ترتیب در عمق های ۵۵ و ۸۵ سانتی متر و بر روی چاه B دو نمونه RB1 و RB2 به ترتیب از عمق های ۶۰ و ۹۰ برداشت شده است.

عملیات آزمایشگاهی:

در آزمایشگاه موسسه ژئوفیزیک، رسوبات دو سر لوله که احتمالاً نور خورده است جهت تعیین میزان رطوبت نمونه و دز سالانه از داخل لوله استخراج شده و رسوبات موجود در میانه لوله برای تعیین دُز معادل دُز طبیعی مورد استفاده قرار گرفتند. پس از الک کردن رسوبات، دانه‌هایی با اندازه ۹۰-۲۵۰ میکرون از نمونه‌ها برداشت، سپس برای حذف کربنات‌ها نمونه‌ها به مدت دو روز در اسید HCL قرار گرفتند. سپس به مدت دو روز برای حذف مواد آلی در داخل اسید 35% H₂O₂ قرار گرفتند.

در آزمایشگاه سن یابی لومینسانس دانشکده محیط زیست دانشگاه آکسفورد با استفاده از مایع سنگین سدیم پلی تنگستات (با چگالی > ۲/۵۸) نمونه‌های غنی از فلدسپار پتاسیم (KF) بدست آمد. برای حذف لایه بیرونی دانه‌های متاثر از اشعه آلفا، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در اسید HF 48% قرار گرفتند. این مرحله را که در آن از اسید HF استفاده می‌شود، مرحله خوردگی گویند. پس از مرحله خوردگی با HF، آلودگی فلوراند با استفاده از اسید HCL از بین رفت. در هر مرحله از روش جداسازی، نمونه‌ها با آب مقطر شستشو داده شد. از چهار نمونه برداشت شده از گسل رفسنجان، تنها در یک نمونه (RB1) دانه‌های کوارتز به اندازه کافی یافت شد. در حالیکه همه نمونه‌ها شامل مقدار قابل توجهی از فلدسپار بود. دانه‌های فلدسپار یا کوارتز استخراج شده با استفاده از چسب سیلیکونی، با اندازه متوسط (به قطر پنج میلیمتر) بر روی دیسک‌های آلومینیومی به قطر ۱۰ میلیمتر چسپانده شدند که به آن الیکوت می‌گویند.

برای بدست آوردن دُز معادل دُز طبیعی نمونه‌ها از هر کدام از نمونه‌ها تعدادی الیکوت^۱ ساخته شده و الیکوت‌ها وارد دستگاه اندازه‌گیری لومینسانس شد. اندازه‌گیری لومینسانس الیکوت‌ها در دانشگاه آکسفورد توسط دستگاه مجهز به سیستم خودکار TL/OSL ریزو، مدل Risø (Model TL/OSL-DA-15) انجام شد. از یک دیود لیزری نور سرخ با طول موج ۸۳۰ نانومتر به‌عنوان منبع تحریک‌کننده استفاده شد. لومینسانس تحریک‌شده توسط مادون قرمز با استفاده از یک لوله الکترونی بیالکالین شناسایی فوتومولتی پلیمر (PMT)^۲ آشکارسازی و لومینسانس آشکارسازی شده از طریق فیلترهای هفت میلیمتری Hoya U-340 اندازه‌گیری شد. دُز معادل دُز طبیعی پس از این مرحله

¹ Aliquot

² Photo Multiplayer Tube

توسط نرم افزار و با روش سار (SAR)^۱ قابل تخمین است. روش سار که روش باز تولید تک الیکوتی است بدین صورت است که پس از اندازه گیری سیگنال لومینسانس طبیعی، نمونه ها تحت دزهای مشخص آزمایشگاهی قرار داده می شوند و سپس سیگنال لومینسانس ناشی از آنها اندازه گیری می شود (جدول ۱). بدین ترتیب دز معادل دز طبیعی قابل تخمین است (فتاحی و مهرشاهی ۱۳۹۷). میزان دز سالانه برای هر نمونه با استفاده از غلظت های رادیو ایزوتوپ، عمق دفن و رطوبت نمونه ها، مطابق روش مشابه انجام شده توسط فتاحی و همکاران (۲۰۰۷) محاسبه شد. در جدول ۲ نرخ دز سالانه برای نمونه ها آمده است.

جدول ۱: مراحل پروتکل سار (تولید مجدد الیکوت منفرد) ماری و وینتل (۲۰۰۰)^۲

	Treatment	Observe
1	Give dose, D_i	
2	Preheat (160 – 300°C for 10 s)	
3	Optically stimulate for 40 s at 125°C	L_i
4	Give test dose, D_i	
5	Heat to 160°C (to <preheat in step 2)	
6	Optically stimulate for 40 s at 125°C	T_i
7	Optically stimulate for 40s at > preheat	
8	Return to 1	

جدول ۲: نرخ دز سالانه برای نمونه های فلدسپار

نمونه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق (متر)	پتاسیم (%)	اورانیوم (%)	توریم (%)	نرخ دز
RA1	29.45411	56.31	0.55	0.53±0.05	0.69±0.13	2.3±0.4	1.56±0.08
RA2	29.45411	56.31	0.85	0.84±0.05	1.23±0.13	4.1±0.4	2.09±0.08
RB1	29.45345	56.31	0.60	0.38±0.05	1.01±0.13	2.9±0.4	1.53±0.08
RB2	29.45345	56.31	0.90	0.95±0.05	1.37±0.13	3.8±0.4	2.21±0.08

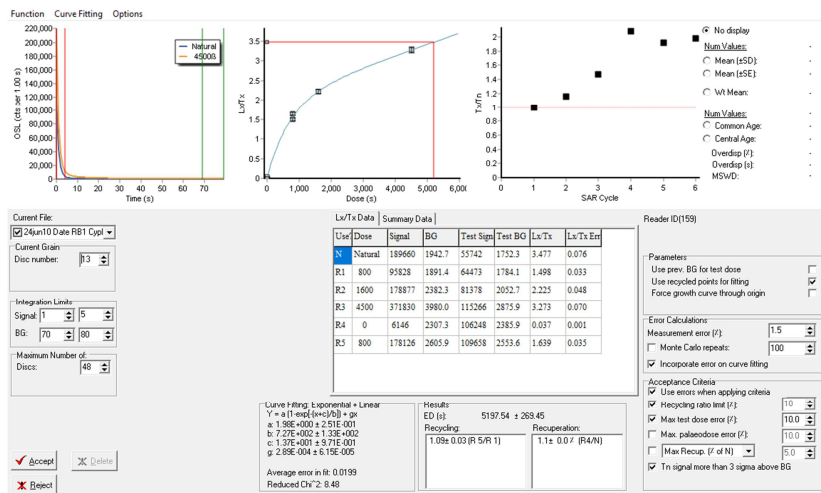
با روش باز تولید تک الیکوتی (که به روش SAR شناخته شده است)، داده های لازم جهت تعیین دز معادل دز طبیعی استخراج و برای تحلیل نرم افزاری بکار رفت.

محاسبه دز معادل دز طبیعی به کمک نرم افزار آنالیست و نرم افزار آر:

نرم افزار آنالیست، نرم افزاری است که به صورت معمول در تحلیل داده های لومینسانس استفاده می شود و تمامی تحلیل داده ها به صورت اتوماتیک انجام می شود (شکل ۶). برخلاف نرم افزار آنالیست، نرم افزار آر محیطی کدنویسی و تحلیلی است که می تواند وظایف آنالیست را به نحو احسن و با دقت و کیفیت بهتری انجام دهد.

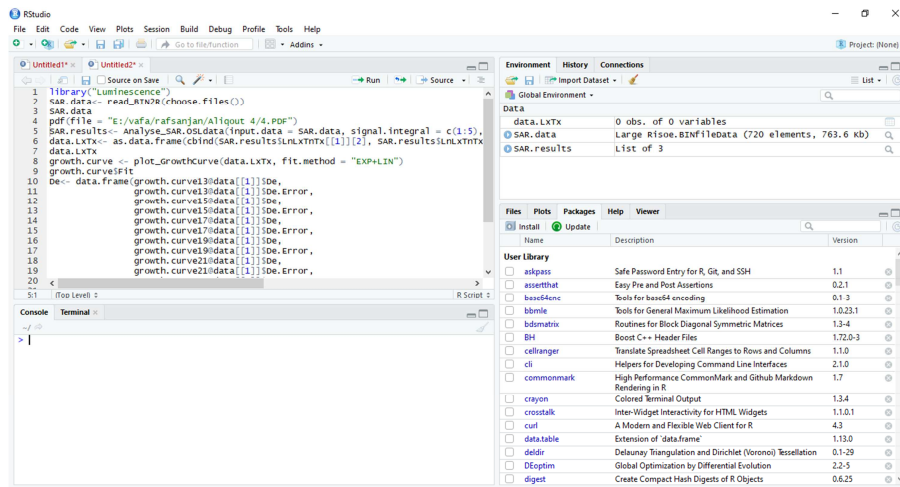
¹ Single Aliquot Regeneration

² Murry and Wintle, 2000



شکل ۶: محیط نرم‌افزار آنالیز

نرم‌افزار آر به دلیل وجود بسته‌های تحلیلی مختلف بر اساس موضوع مورد نیاز و این امکان که می‌توان بسته‌های جدیدی را در محیط رابط کاربری (آر استودیو)^۱ آن تولید کرد (شکل ۷)، ابزاری کاربردی برای رشته‌های وسیعی در علوم مختلف است. یکی دیگر از مزیت‌های این نرم‌افزار، توانایی کشیدن گراف‌ها و نمودارهای با کیفیت بالا و متنوع است که در کمتر نرم‌افزاری به آن توجه شده است.



شکل ۷. محیط نرم‌افزار آر استودیو

برای تحلیل داده‌های لومینسانس نیز در محیط آر استودیو بسته‌هایی ساخته شده‌است که کار را برای گرفتن خروجی مورد نیاز از داده‌های لومینسانس راحت‌تر می‌کند.

^۱ R Studio

از جمله بسته‌هایی که توسط تیم آر لومینسانس^۱ طراحی شده است بسته لومینسانس است که با هدف اندازه‌گیری سن نمونه‌ها در دسترس کاربران قرار گرفته است. این بسته هم شامل نمودارهای با کیفیت بالا و هم ویژگی‌های آماری بهتری نسبت به آنالیست است. فرمول‌های آماری مختلف و نوشتن کدهای دلخواه قدرت آماری بسته لومینسانس در نرم‌افزار آر را به نسبت نرم‌افزار آنالیست بیشتر می‌کند.

با استفاده از بسته لومینسانس و با ساخت وب اپلیکیشن مربوط به لومینسانس در محیط شاینی^۲، استخراج نتایج نهایی داده‌ها، اعم از گراف‌ها و نمودارها و سن هر نمونه بدست آمد. شاینی یک محیط کاربری ساخت وب اپلیکیشن در زبان آر است. این تکنولوژی در لومینسانس بنام آر لومینسانس شاینی^۳ شناخته می‌شود. از ویژگی‌های این محیط این است که هم برای داده‌های کوآرتز و هم برای دانه‌های فلدسپار کاربرد دارد. رسم نمودارهای شعاعی، هیستوگرام، چگالی دز مرکزی همچنین برآورد آنومالس فیدینگ نمونه فلدسپار، از دیگر قابلیت‌های محیط شاینی است.

در این پژوهش میزان دز و خطای اندازه‌گیری شده هر الیکوت مربوط به نمونه‌های مختلف توسط کدنویسی در محیط آر استودیو در بسته لومینسانس محاسبه شد. سپس با گرفتن خروجی حاصل از محاسبه در محیط آر استودیو، دز معادل دز طبیعی نمونه و در نهایت سن نمونه اندازه‌گیری شد.

توسط این دو نرم‌افزار می‌توان از روش‌های آماری مختلفی (روش سن وزنی، سن غیر وزنی، سن مرکزی و ...) برای اندازه‌گیری سن متوسط استفاده کرد. در این پژوهش نمونه‌ها به روش آماری سن مرکزی تعیین سن شد. سن مرکزی روشی است که سن با بیشترین احتمال در یک بازه را مشخص می‌کند. مزیت این روش آن است که نتایج پرت حاصل از تحلیل نرم‌افزاری را با کمترین احتمال و برعکس تجمع نتایج در یک بازه مشخص را با بیشترین احتمال در نظر می‌گیرد.

یافته‌های تحقیق

دو پارامتر اساسی به‌منظور محاسبه نرخ لغزش با استفاده از سن رسوبات در یک منطقه، میزان جابجایی و سن نمونه‌های جابجا شده هستند. جهت محاسبه سن به دو پارامتر دز سالانه و دز معادل نیاز است. میزان دز معادل دز طبیعی نمونه‌ها، با استفاده از روش لومینسانس نوری (که اصول آن در بخش ۳-۱ و روش آزمایشگاهی آن در بخش ۳-۲ ارائه شده است)، برآورد می‌شود و مطابق توضیحات ارائه‌شده در بخش ۳-۳ مقادیر سن نمونه‌ها برآورد می‌شوند و جهت تعیین میزان نرخ لغزش منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تحلیل نرم‌افزاری:

اطلاعات به‌دست آمده از دستگاه خوانش لومینسانس ریزو^۴ به‌صورت فایل بین (BIN). است که ورودی برنامه‌های نرم‌افزارهای آنالیست و آر است. خروجی‌های حاصل از به‌کارگیری نرم‌افزارهای آنالیست و آر مقایسه و نتایج حاصل

¹ R Luminescence Group

² shiny

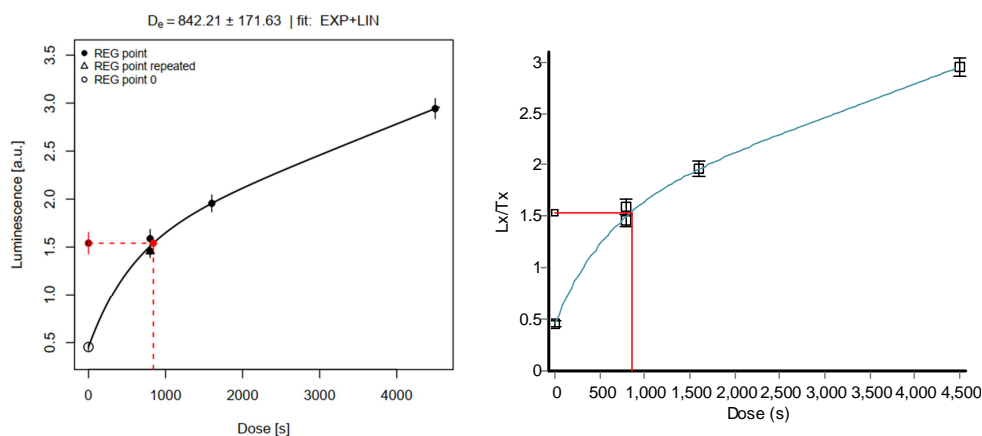
³ R Luminescence Shiny

⁴ RiSo TL/OSL Reader

از دو نرم افزار برای هر کدام از نمونه‌ها بدست آمد. در ادامه، ابتدا نمودارهای حاصل از دو نرم افزار بر روی دانه‌های کوارتز نمونه RB1 مقایسه و سپس نتایج حاصل از دو نرم افزار بر روی دانه‌های فلدسپار هر چهار نمونه بررسی می‌شود.

الف- مقایسه نمودارهای حاصل از دو نرم افزار برای دانه‌های کوارتز نمونه RB1:

نمودارهای ترسیم شده منحنی رشد^۱ توسط آنالیز R و در شکل ۸ نشان داده شده است. منحنی رشد، منحنی استاندارد ایست که با استفاده از آن، می‌توان دُز معادل دُز طبیعی (De) حاصل از هر الیکوت را برآورد کرد.



شکل ۸: سمت راست: منحنی رشد نمونه کوارتز RB1 در نرم افزار R و سمت چپ: منحنی رشد در نرم افزار آنالیز برای یک الیکوت واحد.

با نگاه به شکل ۸ می‌توان به برتری گرافیکی نمودار حاصل از نرم افزار R نسبت نرم افزار آنالیز پی برد. نرم افزار R به دلیل مشخص کردن نوع نقاط موجود در منحنی رشد که شامل نقاط دُز بازتولید^۲، دُز بازتولید تکرار شده^۳، دُز بازتولید صفر^۴ و تعیین مقدار عددی دُز اندازه‌گیری شده و خطای آن (که بالای نمودار درج شده) است اطلاعات کامل‌تری نسبت به همان نمودار در نرم افزار آنالیز می‌دهد.

در شکل ۹، نمودار مونت کارلو^۵ حاصل از هر دو نرم افزار نمایش داده شده است. علاوه بر اینکه کیفیت گرافیکی نمودار در R به مراتب واضح‌تر از آنالیز است این نمودار به ما می‌گوید که از ۱۰۰ برآوردی که نرم افزار انجام داده است احتمال حضور جواب در یک بازه مشخص (در شکل ۱۱ (از ۶۰۰ تا ۹۰۰) ۹۵٪/۰.۵ است و در این بازه مقدار ۸۰۴/۶۵ با بیشترین فراوانی بهترین جواب برای مقدار دُز این الیکوت خواهد بود. بنابراین، نمودار مونت کارلو حاصل از نرم افزار R کاربردی‌تر و قابل فهم‌تر از همان نمودار در آنالیز خواهد بود.

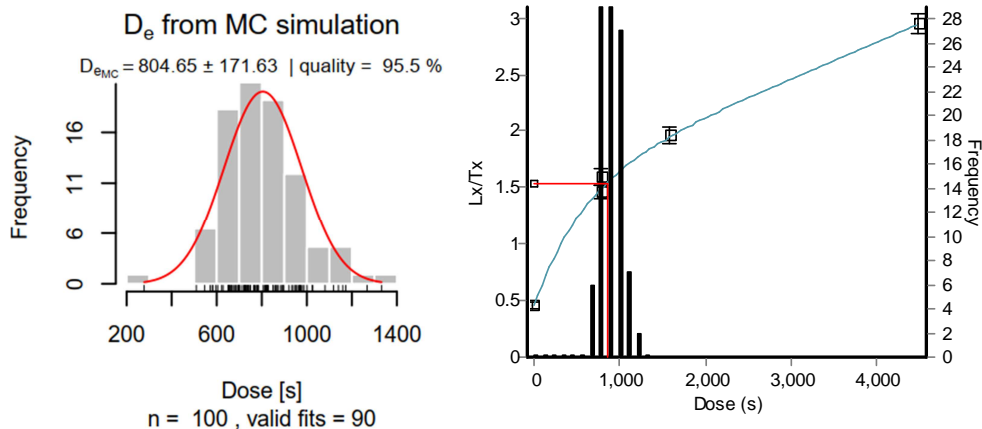
¹ Growth Curve

² REG point

³ REG point repeated

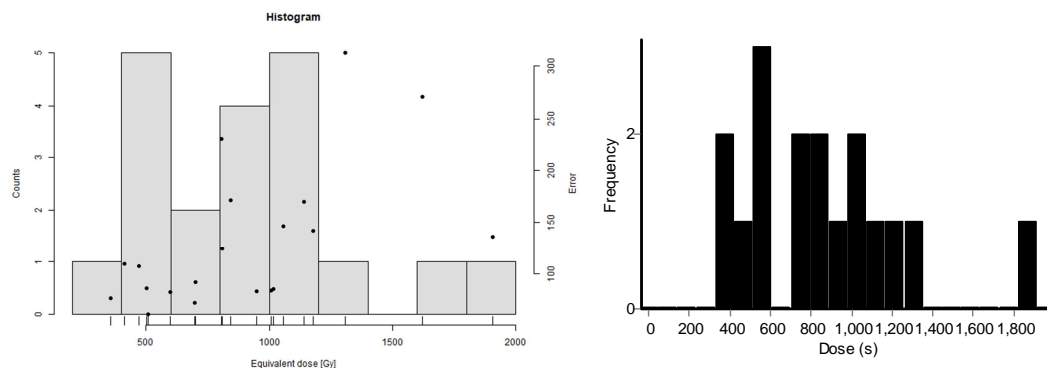
⁴ REG point 0

⁵ Monte Carlo



شکل ۹: نمودار مونت کارلو دانه های کوارتز نمونه RB1. سمت راست: در R و سمت چپ: در آنالیز برای ۱۰۰ تا برآورد

با مقایسه نمودارهای هیستوگرام می توان پی برد که نمودار هیستوگرام در R، علاوه بر اینکه خطای محاسبه شده برای هر الیکوت را نمایش می دهد (محور عمودی سمت راست شکل)، موقعیت و مقدار هر کدام را نیز بر روی نمودار نشان می دهد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: نمودار هیستوگرام دانه های کوارتز نمونه RB1. سمت راست: در نرم افزار R، سمت چپ: در نرم افزار آنالیز. نمودار ترسیم شده در R فراوانی و موقعیت هر الیکوت و دُز به دست آمده از آن را نشان می دهد.

برخی از الیکوت ها در شرایطی و به دلیل اشباع شدگی قابل اندازه گیری نیستند. یکی از این دلایل می تواند ناشی از سن زیاد نمونه و ظرفیت گم دانه های آن الیکوت باشد. در این پژوهش برای هر نمونه نرم افزار آنالیز و نرم افزار R دُز معادل دُز طبیعی تعدادی الیکوت را مشترک و تعدادی الیکوت را غیر مشترک اندازه گیری کردند. در مورد نمونه RB1 نمودارهای R و آنالیز به ترتیب تعداد ۲۰ و ۱۷ الیکوت را اندازه گیری کردند که در ۱۷ مورد مشترک بودند. هر چقدر تعداد الیکوت های اندازه گیری شده بیشتر باشد نتایج بهتری حاصل می شود.

با تقسیم دُز معادل دُز طبیعی بر نرخ دُز سالانه سن نمونه بدست می‌آید. نرخ دُز سالانه برای نمونه کوارتز ۱/۱۱ میلی گری بر سال است. در جدول ۳ سن نمونه RB1 نشان داده شده است.

جدول ۳: اطلاعات سنی دانه‌های کوارتز نمونه RB1 با استفاده از دو برنامه آنالیزت و R (تعداد ۲۰ الیکوت ساخته شده از نمونه که آنالیزت ۱۷ الیکوت و R ۲۰ الیکوت را اندازه‌گیری کردند و تعداد ۱۷ الیکوت مشترک داشتند)

سن (هزار سال)	نرخ دُز سالانه (هزار سال/گری)	دُز معادل (گری)	تعداد الیکوت مشترک	تعداد الیکوت اندازه‌گیری شده	آنالیزت
۱۶۲/۴ ± ۱۵/۷	۱/۱۱ ± ۰/۰۸	۱۸۰/۲ ± ۱۰/۶	۱۷	۱۷	آنالیزت
۱۶۰/۹ ± ۱۵/۰	۱/۱۱ ± ۰/۰۸	۱۷۸/۶ ± ۹/۵	۱۷	۲۰	R

ب- نتایج حاصل از دو نرم‌افزار بر روی دانه‌های فلدسپار:

سن دانه‌های فلدسپار همانند سن دانه‌های کوارتز اندازه‌گیری شد و در جداول ۴ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۴: سن بدست آمده برای دانه‌های فلدسپار نمونه RA1 با استفاده از دو برنامه آنالیزت و R

سن (هزار سال)	دُز معادل (گری)	تعداد الیکوت مشترک	تعداد الیکوت اندازه‌گیری شده	آنالیزت
۲۰۵/۷ ± ۳۴/۶	۳۲۱/۹ ± ۳۴/۷	۳	۶	آنالیزت
۱۷۷/۷ ± ۲۱/۴	۲۲۵/۷ ± ۸/۶	۳	۷	R

جدول ۵: سن بدست آمده برای دانه‌های فلدسپار نمونه RA2 با استفاده از دو نرم‌افزار آنالیزت و R

سن (هزار سال)	دُز معادل (گری)	تعداد الیکوت مشترک	تعداد الیکوت اندازه‌گیری شده	آنالیزت
۱۲۷/۱ ± ۱۵/۱	۲۶۶/۴ ± ۳۰/۰	۳	۵	آنالیزت
۹۴/۹ ± ۴/۰	۱۹۸/۱ ± ۳/۶	۳	۳	R

جدول ۶: سن بدست آمده برای دانه‌های فلدسپار نمونه RB1 با استفاده از دو برنامه آنالیزت و R

سن (هزار سال)	دُز معادل (گری)	تعداد الیکوت مشترک	تعداد الیکوت اندازه‌گیری شده	آنالیزت
۱۷۱/۹ ± ۱۴/۰	۲۶۵/۵ ± ۱۶/۵	۵	۷	آنالیزت
۱۷۱/۳ ± ۱۰/۷	۲۶۳/۴ ± ۹/۱	۵	۹	R

جدول ۷: سن بدست آمده برای دانه‌های فلدسپار نمونه RB2 با استفاده از دو برنامه آنالیزت و R

سن (مرکزی) (هزار سال)	دُز معادل (گری)	تعداد الیکوت مشترک	تعداد الیکوت اندازه‌گیری شده	آنالیزت
۱۱۵/۳ ± ۱۳/۶	۲۵۵/۴ ± ۲۶/۹	۶	۹	آنالیزت
۱۰۷/۶ ± ۱۰/۸	۲۰۶/۷ ± ۱۴/۰	۶	۹	R

نتایج و بحث

از مقایسه سن تخمین زده شده توسط نرم‌افزار آر و آنالیزت برای نمونه‌های مختلف می‌توان به این مهم پی برد که نتایج حاصل توسط نرم‌افزار آر و آنالیزت تا حدود زیادی به هم شبیه هستند. خطای حاصل از اندازه‌گیری توسط

نرم افزار آر برای همه نمونه ها مقدار کمتری را نشان می دهد که نقطه قوت این نرم افزار است. برای نمونه ی کوارتز (RB1) نرم افزار R تعداد سه الیکوت بیشتر نسبت به آنالیزت اندازه گیری کرده است. این مسئله باعث می شود که نرم افزار R به عنوان نرم افزار قابل اطمینانی شناخته شود. سن کوارتز نمونه (RB1) ظاهرا مقدار کمتری از سن فلدسپار نمونه (RB1) نشان می دهد اما با در نظر گرفتن خطا تقریبا سن حاصل از دانه های کوارتز و فلدسپار (RB1) برابرند.

در مورد سن محاسبه شده توسط دو نرم افزار برای نمونه فلدسپار RA2، اختلاف چشمگیری وجود دارد که دلیل اصلی آن تعداد کم الیکوت ها و اختلاف تعداد آنها در دو نرم افزار است (در آر ۳ الیکوت و در آنالیزت ۵ الیکوت). به نظر می رسد که نمونه RA2 به دلیل کمبود تعداد الیکوت و پراکندگی داده های سنی، قابل استناد نیست. برای نمونه فلدسپار RB1 نرم افزار R تعداد دو الیکوت بیشتر را اندازه گرفته است. علاوه بر موارد ذکر شده نتایج گرافیکی حاصل از نرم افزار R به دلیل اینکه اطلاعات کامل تر و نمودارهای با وضوح بالاتری را در اختیار می گذارد مناسب تر از نرم افزار آنالیزت است.

گرچه مقایسه ی دو نرم افزار، کارایی نرم افزار R را جهت سن یابی تأیید می کند با این وجود فارغ از نوع نرم افزار استفاده شده مسئله اصلی در این پژوهش این است که کدام سن اندازه گیری شده آغاز زمان جابجایی رسوبات توسط گسلش را نشان می دهد.

در مورد دانه های فلدسپار همانگونه که در شکل ۹ ملاحظه می شود نمونه های RA1 و RB1 به ترتیب از عمق های ۵۵ و ۶۰ سانتی متر و نمونه های RA2 و RB2 به ترتیب از عمق های ۸۵ و ۹۰ سانتی متری برداشت شده اند. انتظار می رود که سن نمونه های RA1 و RB1 جوانتر از سن نمونه های RA2 و RB2 باشند. اما اندازه گیری های انجام شده نشان می دهد که سن نمونه های RA2 و RB2 به دلایل نامشخصی کمتر هستند. دلایل مختلفی را می توان ارائه داد که چرا سن نمونه های کم عمق بیشتر از سن نمونه های با عمق بیشتر است.

یک عامل نرخ دز سالانه است. نرخ دز نمونه های با عمق کم RB1 و RA1 تقریبا مقدار ۱/۵ گری بر هزار سال و برای نمونه های عمیق تر RA2 و RB2 این عدد تقریبا ۲/۱ گری بر سال است. این تفاوت در نرخ دز یکی از عوامل اختلاف سن دو نمونه در یک چاله با عمق های متفاوت است که می تواند ناشی از تفاوت جنس رسوبات و نوع رسوب گذاری برای دو لایه باشد. میزان پرتوزایی مواد رادیواکتیو رسوبات در لایه های مختلف متفاوت از همدیگر است، که در نهایت منجر به تفاوت در نرخ دز می شود.

دلیل عمده دیگر می تواند ناشی از صفرشدگی ناقص رسوبات در زمان رسوب گذاری باشد. بنابر این اختلاف سن بین نمونه ها در اعماق مختلف در یک چاه (اختلاف سن بین نمونه RA1 و RA2 و اختلاف سن بین نمونه RB1 و RB2) می تواند ناشی از تفاوت در دُز معادل دُز طبیعی باشد؛ گاهی چنین مسئله ای برای نهشته های مخروط افکنه ای و رودخانه ای اتفاق می افتد. هنگامی که سرعت جابجایی مواد در رودخانه زیاد باشد (به عنوان مثال: هنگام سیلاب) امکان اینکه تعدادی از دانه های رسوبات تحت تاثیر نور قرار نگیرند یا به میزان کافی در معرض نور قرار نگیرند، وجود دارد. طی این حادثه سیگنال لومینسانس دانه ها کاملا خالی نمی شود و ساعت لومینسانس این دانه ها صفر نمی شود. از آنجایی که ساعت لومینسانس چنین رسوباتی صفر نشده است و سیگنال لومینسانس از گذشته در این رسوبات

باقی مانده است سن را بالاتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. تفسیری که در ارتباط با نمونه‌های فلدسپار می‌توان ارائه داد این است که احتمال دارد هر چهار نمونه متاثر از صفرشدگی ناقص سیگنال لومینسانس باشند؛ اما در مورد نمونه‌های عمیق‌تر احتمالاً رسوبات با سرعت کمتری جابجا شده یا در هنگام جابجایی این دانه‌ها زمان کافی در معرض نور قرار گرفته‌اند و امکان دارد سیگنال آنها صفر یا نزدیک به صفر باشد. رسوبات نمونه‌های کم عمق (RA1, RB1) امکان دارد در شرایطی جابجا شده باشند که رسوب‌گذاری بصورت سیلاب یا در تاریکی شب انجام گرفته باشد. با این تفاسیر برخی از دانه‌هایی که در داخل رسوبات هستند ممکن است قبل از رسوب سیگنالی از دست نداده باشند یا به میزان کمی از دست داده‌اند. بدین طریق ترکیبی از دانه‌هایی با سیگنال لومینسانس تخلیه نشده وجود خواهد داشت. به همین دلیل سنی که این نمونه‌ها نشان می‌دهند بسیار بیشتر از سن واقعی است. با این توجیه در واقع می‌توان گفت که در بین سن‌های بدست آمده برای چهار نمونه فلدسپار، کمترین سن به واقعیت نزدیک‌تر است چرا که این سن در حالتی بدست آمده است که دانه‌های رسوبات بیشترین صفرشدگی سیگنال لومینسانس در زمان رسوب‌گذاری را داشته‌اند.

جدول ۸: سن نمونه‌های فلدسپار در دو نرم‌افزار R و آنالیست

نرم‌افزار	نمونه	سن (هزار سال)	سن (هزار سال)
آنالیست	RA1	$205/7 \pm 24/6$	۲۳۰-۱۸۱
R		$177/7 \pm 21/4$	۱۹۸-۱۵۶
آنالیست	RA2	$127/1 \pm 15/1$	۱۴۲-۱۱۲
R		$94/9 \pm 4/0$	۹۵-۹۱
آنالیست	RB1	$171/9 \pm 14/0$	۱۸۶-۱۵۸
R		$171/3 \pm 10/7$	۱۸۲-۱۶۱
آنالیست	RB2	$115/3 \pm 13/6$	۱۲۹-۱۰۲
R		$107/6 \pm 10/8$	۱۲۸-۹۷

لذا در میان همه نمونه‌ها، سن نمونه جوانتر (RB2) می‌تواند به عنوان سن مخروط افکنه انتخاب شود، زیرا احتمال دارد سیگنال باقیمانده نمونه جوانتر، نسبت به نمونه‌های دیگر قبل از دفن شدگی کمترین مقدار (شاید صفر) باشد. بر طبق جدول زیر نرخ لغزش گسل رفسنجان، با توجه به سن‌های بدست آمده در جدول ۹ توسط برنامه R و آنالیست محاسبه شده است.

جدول ۹: نرخ لغزش محاسبه شده توسط دو نرم‌افزار R و آنالیست

نرم‌افزار	نمونه	نرخ لغزش (میلی‌متر بر سال)
آنالیست	RB2	$0/42 \pm 0/06$
R	RB2	$0/47 \pm 0/06$

نتیجه گیری

نرخ لغزش محاسبه شده با استفاده از سن برآورد شده با نرم افزار آنالیست، برای گسل رفسنجان تقریباً ۰/۴۲ میلیمتر در سال تخمین زده شد و این مقدار، همان مقداری است که توسط فتاحی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از آنالیست محاسبه شده است. در حالی که نرخ لغزش به دست آمده با استفاده از سن برآورد شده با نرم افزار R برابر ۰/۴۷ میلیمتر بر سال است. بنابر تقسیم گسل ها بر اساس نرخ لغزش آنها، که توسط کلر و پینتر (۱۹۹۶) انجام شده است؛ چنین مقدار نرخ لغزشی گسل رفسنجان را در مجموعه گسل های دارای درجه فعالیت متوسط دسته بندی می کند. بر روی این گسل به ندرت خرد زمین لرزه ثبت می شود. این نرخ لغزش پایین مربوط به زمان زمین شناسی اواخر کواترنری است؛ به این مفهوم که طول دوره مورد بررسی نزدیک به صد هزار سال (سن رسوبات مخروط افکنه ۱۱۵ هزار سال با آنالیست و ۱۰۸ هزار سال با R) است. بر روی گسل رفسنجان یک گسیختگی به اندازه سه متر مشخص شده است، در صورتی که کل این گسیختگی ناشی از زمین لرزه لاله زار در سال ۱۹۲۳ در نظر گرفته شود، این زمین لرزه باید رخدادی با بزرگی ۷ تا ۷/۵ بوده باشد. بنابراین برای رخداد چنین زمین لرزه ای باید به صورت بالقوه سه متر لغزش وجود داشته باشد. با نرخ لغزش به میزان ۰/۴۷ میلیمتر بر سال، سه متر تجمع لغزش تقریباً نیازمند مدت زمانی برابر با ۶۴۰۰ سال است. با توجه به اینکه این زمین لرزه در سال ۱۹۲۳ رخ داده است، در این صورت زمانی نزدیک به ۶۳۰۰ سال نیاز است که در همان قطعه از گسل زمین لرزه ای با چنین بزرگایی اتفاق بیفتد. لازم به ذکر است که این محاسبات با فرض صفر شدگی کامل سیگنال لومینسانس نمونه (RB2) انجام شده است. اگر نمونه (RB2) سیگنال لومینسانس خود را به صورت کامل در هنگام رسوب از دست نداده باشد، سن نمونه (RB2) جوانتر و نرخ لغزش بیشتر و دوره بازگشت کمتر خواهد بود. لذا توصیه می شود مطالعات بیشتری در این باب انجام شود.

منابع

- امینی، حمیده، فتاحی، مرتضی، قاسمی، محمدرضا (۱۳۹۰). محاسبه نرخ لغزش در منطقه شش تراز گسل دورونه به روش هیستوگرام و حداقل سن با استفاده از لومینسانس برانگیخته شده با نور، مجله ژئوفیزیک ایران، سال پنجم، شماره ۳، صص ۱۴-۲۹.
- شیخ الاسلامی، محمدرضا، جوادی، حمیدرضا، اسدی سرشار، مریم، آقا حسینی، احمد، کوه پیمان، میثم، وحدتی دانشمند، بهارک (۱۳۹۲). دانشنامه گسله های ایران، پژوهشگاه علوم زمین، جلد اول، ص ۶۰۰.
- فتاحی، مرتضی، رستمی مهربان، سمیه، طالبیان، مرتضی، بحرودی، عباس، هالینگورث، جیمز، واکر، ریچارد (۱۳۹۰)؛ بررسی فعالیت گسل نیشابور در استان خراسان، مجله علوم زمین، سال پنجم، شماره ۵، صص ۵۵-۷۹.
- فتاحی، مرتضی، رستمی مهربان، سمیه، طالبیان، مرتضی، بحرودی، عباس، هالینگورث، جیمز، واکر، ریچارد (۱۳۹۰)؛ بررسی فعالیت گسل شمال نیشابور، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۴، صص ۱۷۹-۱۹۳.
- فتاحی مرتضی، مهرشاهی داریوش. استفاده از روش لومینسانس نوری جهت تعیین سن رسوبات لسی اطراف شهر میبد و تفسیر شرایط تشکیل آنها. مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۴۴، صفحه ۳۰۷-۳۱۹، تابستان ۱۳۹۷. 10.22059/jesphys.2018.253856.1006986.
- حیدری، مریم، فتاحی، مرتضی (۱۳۹۰)؛ بررسی مجدد دو نمونه مهم از ترانشه ایرا، هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص ۱۸۵-۱۸۸.
- Aitken, M. J., (1970); Dating by archaeomagnetic and thermoluminescent methods. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A Mathematical and Physical Sciences, No. 269, pp. 77-88.
- Ambraseys, N. N., Melville, C. P., (1982); A History of Persian Earthquakes. Cambridge Univ Press, New York, pp. 199-212.
- Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, MR., (2011); Determination of the slip rate in the Shesh-Taraz river on the Doruneh fault using histogram and minimum age OSL methods. Iranian Journal of Geophysics, No. 5 (3), pp. 14-29.

- Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, MR., (2016); Offsets along the Doruneh fault; implications for dating sampling sites and slip rate determination. *Journal of Tethys*, No. 4 (1), pp. 69-87.
- Berberian M., (1976); Contribution to the seismotectonics of Iran (part II-III): in commemoration of the 50th anniversary of the Pahlavi dynasty. No. 39.
- Burow, Ch., Kehi, M., Hilgers, A., Weniger, G. Ch., Angelucci, D. E., Villaverde, V., Zapata, J., Zilhao, J., (2015); Luminescence dating of Fluvial deposits in the rock shelter of Cueva Anton, Spain. *GEOCHRONOMETRIA*, No. 42, pp. 107-125. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0010>
- Dietze, M., Kreutzer, S., Fuchs, M. C., Burow, C., Fischer, M., Schmidt, C., (2013); A practical guide to the R package Luminescence. *Ancient TL*, No. 31(1), pp. 11-18. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846155>
- Fattahi, M., Karimi Moayed, N., Walker, R., Talebian, M., (2013); Determining the slip rate on the Gowk fault using POST-IR method. *Journal of the EARTH AND SPACE PHYSICS*, No. 39(2), pp. 13-28. [10.22059/JESPHYS.2013.35179](https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2013.35179)
- Fattahi, M., Talebian, M., Khatib, MM., Aghazadeh, A., Amini, H., Ataei, N., (2011); Slip Rate Determination of Dasht-e Bayaz Fault Using Single Grain OSL Dating of Miam Qanat System in Eastern Iran. *Journal of Seismology & Earthquake Engineering*, No. 21 (1), pp. 1-9.
- Fattahi, M., Walker, R., Hollingsworth, J., Bahroudi, A., Talebian, M., Armitage, S. and Stokes, S., (2006); Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using Optically-stimulated Luminescence (OSL). *Earth and Planetary Science Letters*, No. 245, 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.027>
- 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. *Geophysical Journal International*, No. 168(2), pp. 691-709. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x>
- Fattahi, M., Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., Rasheedi, A., (2011); The structure and late Quaternary slip rate of the Rafsanjan strike-slip fault, SE Iran. *GEOSPHERE*, No. 7(5), pp. 1159-1174. <https://doi.org/10.1130/GES00651.1>
- Foroutan, M., Nazari, H., Meyer, B., Sebrier, M., Fattahi, M., Dortz, K., (2012); Late pleistocene-holocene right-slip rate of the Dehshir Fault, Central Iran Plateau. *GEOSCIENCES*, No. 21 (82), pp. 195-206. [10.22071/GSJ.2011.54458](https://doi.org/10.22071/GSJ.2011.54458)
- Friedrich, J., Kreutzer, S., Schmidt, Ch., (2016); Solving ordinary differential equations to understand luminescence: 'RLumModel', an advanced research tool for simulating luminescence in quartz using R. *Quaternary Geochronology*, No. 35, pp. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.05.004>
- Ghassemi, M. R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P., & Tabatabaei, S. H., (2014); Kinematic links between the Eastern Mofa Fault and the North Tehran Fault, Alborz range, northern Iran. *Tectonophysics*, 622, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.007>
- Gomez F., Karam, G., Khawlie M., McClusky, S., Vernant, Ph., Reilinger, R., Jaafar, R., Tabet, C., Khair, K., Barazangi, M., (2007); Global Positioning System measurements of strain accumulation and slip transfer through the restraining bend along the Dead Sea fault system in Lebanon. *Geophysical Journal International*, No. 168(3), pp. 1021-1028. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03328.x>
- Keller, E. A., Pinter, N., (1996); *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall, 359 pp.
- Kreutzer, S., Martin, L., Guerin, G., Tribolo, C., Selva, P., Mercier, N., (2018); Environmental Dose Rate Determination Using a Passive Dosimeter: Techniques and Workflow for alpha-Al₂O₃:C Chips. *Geochronometria*, No. 45, pp. 56-67. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0086>
- Kreutzer, S., Schmidt, C., Fuchs, M. C., Dietze, M., Fischer, M., Fuchs, M., (2012); Introducing an R package for luminescence dating analysis. *Ancient TL*, No. 30 (1), 1-8.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sebrier, M., Nazari, H., Braucher, R., Fattahi, M., Benedetti, L., Foroutan, M., Siame, L., Bourles, D., Talebian, M., Bateman, M.D., and Ghorashi, M., (2009); Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, central Iran. *Geophysical Journal International*, v. 179, pp. 700-710. [10.1111/j.1365-246X.2009.04309.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04309.x)
- Liritzis, I., Singhvi, A. K., Feathers, J. K., Wagner, G. A., Kadereit, A., Zacharias, N., & Li, S. H. (2013). Luminescence dating of archaeological materials. In *Luminescence Dating in Archaeology, Anthropology, and Geoarchaeology* (pp. 25-40). Springer, Heidelberg. [10.1007/978-3-319-00170-8-6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00170-8-6)
- Murray, A. S. and Wintle, A. G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurement*, 32, 57-73. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00253-X).
- Nazari, H., Fattahi, M., Meyer, B., Sébrier, M., Talebian, M., Foroutan, M., Le Dortz, K., Bateman, M.D., Ghorashi, M., (2009); First evidence for large earthquakes on the Deshir Fault, Central Iran Plateau. *Terra Nova*, 21(6), 417-426. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00892.x>
- Pepe, D. J., Deino, A. L., (2013); *Dating Rocks and Fossils Using Geologic Methods*. Nature Education Knowledge, No. 4(10):1.
- Talebian, M., Copley, A.C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J.A., Nazari, H., Sloan, R.A., Walker, R.T., (2016); Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. *Geophysical Journal International*, Volume 207(3), 1688-1699. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw347>
- Vernant, P., Nilfroushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., (2004); Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS

- measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, No. 157, 381-398 .
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>
- Walker R.T., (2006); A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. *Journal of Structural Geology*, No. 28(4), 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.12.014>
- Walker, R. T., Khatib, M. M., Bahroudi, A., Rodés, A., Schnabel, C., Fattahi, M., ... & Bergman, E., (2015); Co-seismic, geomorphic, and geologic fold growth associated with the 1978 Tabas-e-Golshan earthquake fault in eastern Iran. *Geomorphology*, 237, 98-118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.016>

References

References (in Persian)

- Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, MR., (2011); Determination of the slip rate in the Shesh-Taraz river on the Doruneh fault using histogram and minimum age OSL methods, Iranian Journal of Geophysics, Vol. 5, No. 3, pp. 14-29. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=201847>. [In Persian]
- Fattahi, M., Rostami Mehraban, S., Talebian, M., Bahroudi, A., Hollingsworth, J., Walker, R. T., (2011); An investigation into the activity of the Neyshabour fault, eastern Iran, in Khorasan province, Journal of Earth Sciences, Vol. 5, No. 5, pp. 55-79. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=165348>. [In Persian]
- Fattahi, M., Rostami Mehraban, S., Talebian, M., Bahroudi, A., Hollingsworth, J., Walker, R. T., (2011); An investigation into the activity of the North Neyshabour fault, eastern Iran, Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 37, No. 4, pp. 179-193. <https://www.magiran.com/paper/984819>. [In Persian]
- Fattahi, M., Mehrshahi, Darush., (2018); OSL Dating of Maibod Loess deposits and their formation interpretation, Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 44, No. 2, pp. 307-319. **10.22059/jesphys.2018.253856.1006986**. [In Persian]
- Heidari, M., Fattahi, M., (2011); Re-dating two important sample from Ira trench, 17th Iranian Geophysical Conference, pp. 185-188. <http://nigsconference.ir/data/cnf1477383530/uploads/56-3831.pdf>. [In Persian]
- Sheykholeslami, MR., Javadi, HR., Asadi Sarshar, M., Agha Hosseini, A., Kuh Peyma, M., Vahdati Daneshmand, B., (2013); Iran faults Encyclopedia, Research Institute for Earth Sciences, No. (1), 600 pp. [In Persian]

References (in English)

- Aitken, M. J., (1970); Dating by archaeomagnetic and thermoluminescent methods. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A Mathematical and Physical Sciences, No. 269, pp. 77-88.
- Ambraseys, N. N., Melville, C. P., (1982); A History of Persian Earthquakes. Cambridge Univ Press, New York, pp. 199-212.
- Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, MR., (2011); Determination of the slip rate in the Shesh-Taraz river on the Doruneh fault using histogram and minimum age OSL methods. Iranian Journal of Geophysics, No. 5 (3), pp. 14-29.
- Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, MR., (2016); Offsets along the Doruneh fault; implications for dating sampling sites and slip rate determination. Journal of Tethys, No. 4 (1), pp. 69-87.
- Berberian M., (1976); Contribution to the seismotectonics of Iran (part II-III): in commemoration of the 50th anniversary of the Pahlavi dynasty. No. 39.
- Burow, Ch., Kehi, M., Hilgers, A., Weniger, G. Ch., Angelucci, D. E., Villaverde, V., Zapata, J., Zilhao, J., (2015); Luminescence dating of Fluvial deposits in the rock shelter of Cueva Anton, Spain. GEOCHRONOMETRIA, No. 42, pp. 107-125. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0010>
- Dietze, M., Kreutzer, S., Fuchs, M. C., Burow, C., Fischer, M., Schmidt, C., (2013); A practical guide to the R package Luminescence. Ancient TL, No. 31(1), pp. 11-18. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846155>
- Fattahi, M., Karimi Moayed, N., Walker, R., Talebian, M., (2013); Determining the slip rate on the Gowk fault using POST-IR method. Journal of the EARTH AND SPACE PHYSICS, No. 39(2), pp. 13-28. [10.22059/JESPHYS.2013.35179](https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2013.35179)
- Fattahi, M., Talebian, M., Khatib, MM., Aghazadeh, A., Amini, H., Ataei, N., (2011); Slip Rate Determination of Dasht-e Bayaz Fault Using Single Grain OSL Dating of Miam Qanat System in Eastern Iran. Journal of Seismology & Earthquake Engineering, No. 21 (1), pp. 1-9.
- Fattahi, M., Walker, R., Hollingsworth, J., Bahroudi, A., Talebian, M., Armitage, S. and Stokes, S., (2006); Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using Optically-stimulated Luminescence (OSL). Earth and Planetary Science Letters, No. 245, 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.027>
- 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. Geophysical Journal International, No. 168(2), pp. 691-709. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x>
- Fattahi, M., Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., Rasheedi, A., (2011); The structure and late Quaternary slip rate of the Rafsanjani strike-slip fault, SE Iran. GEOSPHERE, No. 7(5), pp. 1159-1174. <https://doi.org/10.1130/GES00651.1>
- Foroutan, M., Nazari, H., Meyer, B., Sebrier, M., Fattahi, M., Dortz, K., (2012); Late pleistocene-holocene right-slip rate of the Dehshir Fault, Central Iran Plateau. GEOSCIENCES, No. 21 (82), pp. 195-206. [10.22071/GSJ.2011.54458](https://doi.org/10.22071/GSJ.2011.54458)
- Friedrich, J., Kreutzer, S., Schmidt, Ch., (2016); Solving ordinary differential equations to understand luminescence: 'RLumModel', an advanced research tool for simulating luminescence in quartz using R. Quaternary Geochronology, No. 35, pp. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.05.004>
- Ghassemi, M. R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P., & Tabatabaei, S. H., (2014); Kinematic links between the Eastern Mofa Fault and the North Tehran Fault, Alborz range, northern Iran. Tectonophysics, 622, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.007>
- Gomez F., Karam, G., Khawlie M., McClusky, S., Vernant, Ph., Reilinger, R., Jaafar, R., Tabet, C., Khair, K., Barazangi, M., (2007); Global Positioning System measurements of strain accumulation and slip transfer through the restraining bend along the Dead Sea fault system in Lebanon. Geophysical Journal International, No. 168(3), pp. 1021-1028. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03328.x>

- Keller, E. A., Pinter, N., (1996); *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall, 359 pp.
- Kreutzer, S., Martin, L., Guerin, G., Tribolo, C., Selva, P., Mercier, N., (2018); Environmental Dose Rate Determination Using a Passive Dosimeter: Techniques and Workflow for alpha-Al₂O₃:C Chips. *Geochronometria*, No. 45, pp. 56-67. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0086>
- Kreutzer, S., Schmidt, C., Fuchs, M. C., Dietze, M., Fischer, M., Fuchs, M., (2012); Introducing an R package for luminescence dating analysis. *Ancient TL*, No. 30 (1), 1-8.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sebrier, M., Nazari, H., Braucher, R., Fattahi, M., Benedetti, L., Foroutan, M., Siame, L., Bourles, D., Talebian, M., Bateman, M.D., and Ghorashi, M., (2009); Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, central Iran. *Geophysical Journal International*, v. 179, pp. 700–710. [10.1111/j.1365-246X.2009.04309.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04309.x)
- Liritzis, I., Singhvi, A. K., Feathers, J. K., Wagner, G. A., Kadereit, A., Zacharias, N., & Li, S. H. (2013). Luminescence dating of archaeological materials. In *Luminescence Dating in Archaeology, Anthropology, and Geoarchaeology* (pp. 25-40). Springer, Heidelberg. [10.1007/978-3-319-00170-8-6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00170-8-6)
- Murray, A. S. and Wintle, A. G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurement*, 32, 57-73. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00253-X).
- Nazari, H., Fattahi, M., Meyer, B., Sébrier, M., Talebian, M., Foroutan, M., Le Dortz, K., Bateman, M.D., Ghorashi, M., (2009); First evidence for large earthquakes on the Deshir Fault, Central Iran Plateau. *Terra Nova*, 21(6), 417-426. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00892.x>
- Peppe, D. J., Deino, A. L., (2013); *Dating Rocks and Fossils Using Geologic Methods*. Nature Education Knowledge, No. 4(10):1.
- Talebian, M., Copley, A.C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J.A., Nazari, H., Sloan, R.A., Walker, R.T., (2016); Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. *Geophysical Journal International*, Volume 207(3), 1688–1699. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw347>
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., (2004); Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, No. 157, 381-398 . <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>
- Walker R.T., (2006); A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. *Journal of Structural Geology*, No. 28(4), 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.12.014>
- Walker, R. T., Khatib, M. M., Bahroudi, A., Rodés, A., Schnabel, C., Fattahi, M., ... & Bergman, E., (2015); Co-seismic, geomorphic, and geologic fold growth associated with the 1978 Tabas-e-Golshan earthquake fault in eastern Iran. *Geomorphology*, 237, 98-118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.016>.