

استفاده از رخشانی نوری پس از فروسرخ، به منظور اندازه‌گیری نرخ لغزش گسل گوک

مرتضی فتاحی^{۱*}، نسرین کریمی موید^۲، ریچارد واکر^۳ و مرتضی طالبیان^۴

^۱ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ استادیار، دپارتمان علوم زمین، دانشگاه آکسفورد، انگلستان

^۴ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۹/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

گسل امتدادلغز راست‌گرد گوک با طولی بیش از ۱۵۰ کیلومتر، طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ پنج زلزله مخرب تولید کرده است. این زلزله‌ها مجموعاً موجب شکافته شدن ۱۰۰ کیلومتر بخش شمالی این گسل شدند. سایت مورد بررسی در این تحقیق، گلباف جنوبی است، که در انتهای جنوبی بخش شمالی گسل واقع شده است. به منظور برآورد خطر زلزله ناشی از یک گسل منفرد، آگاهی از نرخ لغزش آن گسل می‌تواند کمک‌کننده باشد. جهت تعیین نرخ لغزش، به دو پارامتر جابه‌جایی و مدت زمان رویداد آن جابه‌جایی نیاز داریم. طی عملیات صحرائی میزان کل جابه‌جایی روی گسل گوک حدود ۳۰ متر اندازه‌گیری شد. یکی از بهترین روش‌های تعیین نرخ لغزش، استفاده از سن‌یابی رسوبات با به‌کارگیری رخشانی (لومینسانس) برانگیخته نوری (OSL) است. از این رو به دو پارامتر دُرمعادل دُزطبیعی و دُرسالانه نیاز است تا بتوان به روش رخشانی، سن نمونه‌ها را به‌دست آورد. به منظور اندازه‌گیری دُرمعادل از روش SAR استفاده شد. در این روش ضروری است تا ابتدا توانایی روش برای اندازه‌گیری و تصحیح تغییر حساسیت در اثر دُز، گرما و نور بررسی شود. همچنین لازم است تا با اجرای آزمایش‌هایی میزان پیش‌گرما مناسب و توانایی روش SAR برای بازیابی دُز مشخصی که در آزمایشگاه به نمونه داده می‌شود بررسی شود. با استفاده از آزمایش‌های صورت گرفته، بهترین دما برای پیش‌گرما 240°C و 280°C انتخاب شد. در این بررسی دُرمعادل دُزطبیعی نمونه‌های برداشت شده با تحلیل داده‌ها در برنامه آنالیست به روش بافت‌نگار (هیستوگرام) محاسبه شد. براساس نتایج به‌دست آمده از این برنامه، آخرین دوران رسوب‌گذاری ۲۵۰۰-۵۴۰۰ سال و نرخ لغزش گسل گوک در سطح حدود ۵/۵-۷/۱ میلی‌متر در سال به‌دست آمد که بیش از نرخ لغزش برآورد شده از سن‌یابی به روش رادیوکربن است. اگر فرض کنیم که نوعاً در هر زلزله ۳ متر لغزش رخ دهد، بیشینه دوره بازگشت بین زلزله‌ها با توجه به نرخ لغزش به‌دست آمده تقریباً ۲۸۰-۵۴۰ سال خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: گسل گوک، نرخ لغزش، رخشانی نوری

Determining the slip rate on the Gowk fault using POST-IR method

Fattahi, M.¹, Karimi Moayed, N.², Walker, R.³ and Talebian, M.⁴

¹Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc. Student in Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Earth Sciences, University of Oxford, UK

⁴Assistant Professor, Research Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran

(Received: 12 Dec 2012, Accepted: 14 May 2013)

Summary

Iran is one of the most tectonically active regions on the Alpi-Himalian earthquake belt (Figure 1). The Gowk fault located in Kerman Province, eastern Iran, is a part of Sabzevaran-Gowk-Nayband system of strike-slip faults that accommodate north-south

E-mail: mfattahi@ut.ac.ir

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۴۷۹

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۱۸۲۵۳

*نگارنده رابط:

right-lateral shear along the western margin of Dasht-e-Lut. Its length is more than 150 km. collectively; the northern part of the fault has been ruptured by five destructive earthquakes between 1981 and 1998. No activity has been seen in the southern segment of the fault. So the southern segment which is our site of study will remain a potential for further earthquakes.

Estimating the slip rate of a single fault is one of the most important parameters to assess the hazard of that fault. In order to determine the slip rate, two parameters, displacement and the duration of the displacement, are needed. In the south Golbaf basin the fault is composed of three main strike slip segments arranged in a right-stepping pattern (Figure 3). Field investigations illustrated around 30 m right-lateral displacement on the fault. We used two main approaches for dating, radiocarbon and optically stimulated luminescence. Two ^{14}C samples and three OSL samples were collected at a 3 m-high exposure of the lakebed on the eastern side of the fault at 29:47:30 N 57:46:28 E (Figure 4, Figure 5). The first quantitative estimate of the Holocene slip rate on the Gowk fault was provided using ^{14}C dating result of the two wood fragments which were taken with OSL samples (Walker et al., 2010).

In this study, we have tried to determine the slip rate of Gowk fault by means of luminescence dating. Luminescence dating is a chronological method that has been used extensively in the earth science. In this method, the event being dated is the last exposure of the sample to daylight. Hence the determined age is the time of the sedimentation which has covered the older sediments. As fault has displaced the rivers in the Golbaf Lake, and the rivers have cut the existing lake bed sediments, therefore last activity of the Gowk fault has occurred after the last sedimentation in the lake. If we date the age of last sedimentation of the Golbaf Lake, we will be able to calculate the fault slip rate, using the relevant age and displacement.

Luminescence dating is based on the emission of light (natural luminescence signal) by commonly occurring minerals, principally quartz and feldspar. These minerals act as a dosimeter in nature, recording the amount of radiation to which they have been exposed according to the decay of radioactive isotopes such as uranium (U), thorium (Th) and potassium (K).

To date a sample using one of the luminescence dating methods, two parameters, the equivalent dose and dose rate, are needed. Single aliquot regeneration (SAR) protocol was used to determine the equivalent dose (De). Ideally, after chemical preparation, we have a sample of just quartz grains. However, this is not always the case. We sometimes face feldspar contamination which means all the feldspar grains have not been removed. Underestimating the age would be a consequence since we are dealing with anomalous fading. This means that the size of the observed luminescence signal decreases as the sample is stored in nature or the laboratory. To identify the purity of quartz in the aliquot, we usually introduce a simple Post IR measurement in the end of SAR experiments. This is a problem if the infrared signal (emitted from feldspar) is more than 10% of the blue signal (emitted from quartz). To sort out this problem we reject the result of that aliquot. However, if the majority of aliquots show this problem, no reliable De can be calculated. For quartz samples that demonstrate such problem after sufficient time of HF etching, the alternative way would be to use POST-IR method. As Golbaf samples suffered from this problem we applied POST-IR method to find the De for these samples. However, some factors, such as the ability of SAR to correct the sensitivity change and recovering the given lab dose were checked in order to insure us that the age results achieved by SAR protocol are trustworthy. Equivalent doses were calculated by analyzing the data with Analyst software. The results are shown in table1. By considering the equivalent dose

calculated from the Histogram method and using the following formula, the age of the collected samples was determined:

$$\text{Age (ka)} = \text{equivalent dose (Gy)} / \text{dose rate (Gy/ka)} \quad (1)$$

The results of the dose rates and ages for the three samples (GB1, GB2 and GB3) are shown in table 2.

By considering the ages calculated for the three samples and their depths, and extrapolation diagram, we could find the age to be 2800-5400 yrs at the surface (diagram 1). So assuming the time of faulting to be close to the age of the lake surface, the slip rate of the Gowk fault would be 5.5-10.7 mm/yr. It should be mentioned that this age (2800-5400 yrs) is less than what can be predicted from ^{14}C and there is a possibility of the effect of fading, and as a result the slip rate is more than the estimated slip rate by Walker et al (2010). We suggest dating these samples using potassium feldspar grains, to enable us for comparison between dating result.

Because of the complexity of the fault zone in depth, estimating the average return period for the Gowk fault is difficult. However, by assuming a 3-meter slip in every earthquake according to the 1998 Fandogha earthquake, and considering the calculated slip rate, the maximum return period will be 280-540 years. According to this short return period and the fact that the southern part of the fault has not recently generated a destructive earthquake, it will remain a potential for making a destructive earthquake in the region.

Keywords: Gowk fault, Slip rate, Luminescence

۱ مقدمه

حاشیه سلسله کوه‌ها، جایی که خطر وقوع زلزله بیشتر است، متمرکز شده است، پرداختن به مسئله فعالیت گسل-های جنوبا در این مناطق حائز اهمیت است. گسل گوک واقع در استان کرمان جزء گسل‌های فعال منطقه محسوب می‌شود که به علت خاموش بودن بخش جنوبی این گسل در دهه‌های اخیر مورد توجه ما قرار گرفته است. در این مسیر اولین نرخ لغزش گسل گوک با استفاده از دو نمونه چوب استخراج شده از دریاچه گلباف به روش سن‌یابی مطلق رادیوکربن، برآورد شد (واکر و همکاران، ۲۰۱۰). اما اگر این نمونه‌های چوبی حاصل گیاهانی باشد که در خارج از دریاچه رشد کرده و سپس به دریاچه منتقل شده‌اند، از این‌رو سنی بیش از زمان مدفون بودن در دریاچه را نتیجه خواهند داد. لذا، در نظر گرفتیم تا به کمک روش سن‌یابی رخشانی (OSL) که مستقیماً سن خاک را به دست می‌دهد، به بررسی‌های کلی‌تر و دقیق‌تر

با توجه به اینکه ایران در محل همگرایی دو صفحه اصلی عربستان-اوراسیا واقع شده است، یکی از فعال‌ترین مناطق زمین‌ساختی روی کمربند زلزله‌خیز آلپ-هممالیا محسوب می‌شود (شکل ۱). نظر به اینکه گسلش فعال عاملی برای پیدایش کوه‌ها و تغییرات توپوگرافی و الگوی آبراهه‌ها روی سطح زمین است؛ زمین‌ریخت‌شناسی (Geomorphology) موجود حاوی اطلاعاتی ارزشمند در مورد تغییر شکل و سیر تکاملی گسل طی بازه زمانی نسبتاً طولانی است. گسل‌های زلزله‌زا ممکن است در مرز میان کوه و دشت، جایی که رودها و قنات‌ها با تولید آب و خاک حاصلخیز، شرایط زندگی و زراعت را فراهم می‌آورند، واقع شوند. از این‌رو با توجه به تغییر مسیر آبراهه‌ها و مدت‌زمان این تغییر می‌توان آخرین فعالیت گسل‌های موجود در امتداد مسیر رودها و آبراهه‌ها را بررسی کرد. از آنجا که شهرنشینی ایرانیان اغلب در امتداد

گوی گسل بیش از ۱۵۰ کیلومتر است که از انتهای جنوبی گسل ناینند در بخش شمالی تا رشته کوه‌های جبال بارز در قسمت جنوبی امتداد می‌یابد (واکر و همکاران، ۲۰۱۰). انتهای شمالی گسل (30.5°N) در جهت شمال‌غربی و انتهای جنوبی آن (29.3°N) در جهت جنوب‌شرقی تغییر جهت می‌دهد، به طوری که احتمال می‌دهند در هر دو این موقعیت‌ها مؤلفه معکوس ظاهر شده است (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). دره گوک و گسل خوردگی مربوط به آن، به طور تقریبی از مرز میان فلات کرمان و کویر لوت تبعیت می‌کنند (شکل ۲) ولی در پایین شیب توپوگرافی، دارای یک ساختار منفرد و مشترک نیستند (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱).

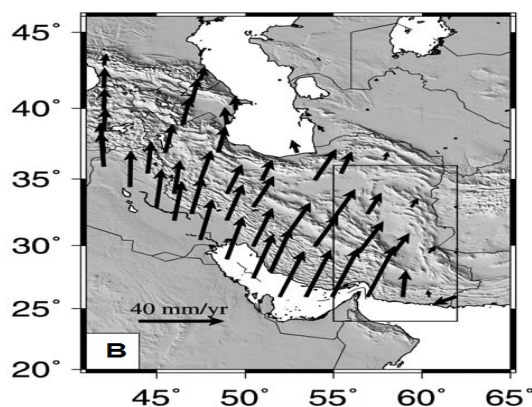
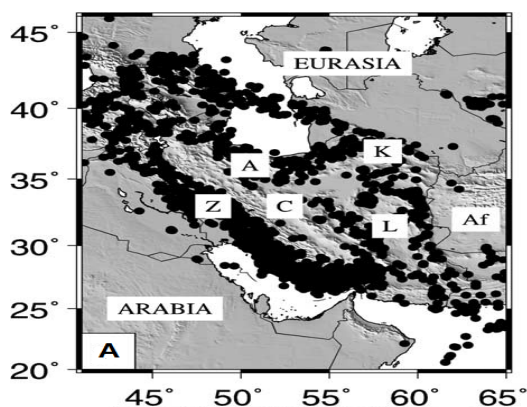
گسل خوردگی‌های جوان که احتمالاً مربوط به دوران هولوسن هستند در بخش شرقی دره، در شمال گلباف تمرکز یافته‌اند و شامل پرتگاه‌های گسلی رو به شرق و غرب که اغلب ناپیوسته‌اند، هستند. در بخش جنوبی فروافتادگی جنوب گلباف (شکل ۳) جوان‌ترین گسل خوردگی در قسمت غربی دره گوک، تمرکز یافته است (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱).

روی گسل گوک پردازیم.

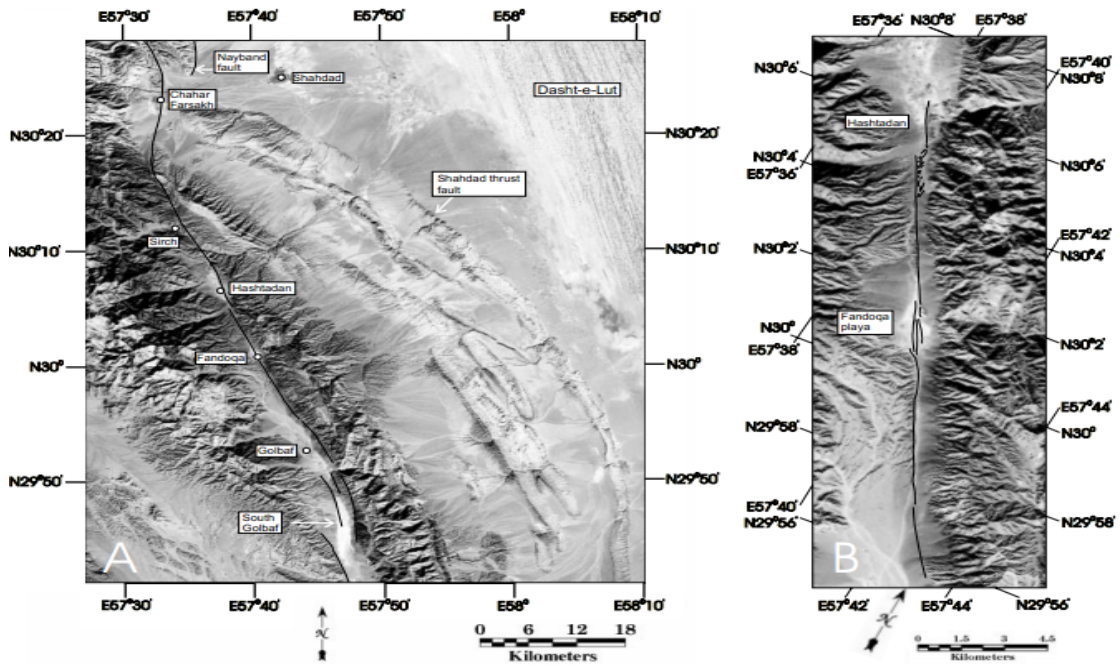
در این مقاله به ترتیب زمین‌شناسی پیرامون گسل گوک، اهمیت تعیین نرخ لغزش، معرفی سایت گلباف جنوبی و منطقه نمونه برداری، روش‌های سن‌یابی به طریق رخشانی نوری از جمله پس از فرورسرخ (Post IR) و آزمایش‌های صورت گرفته، شرح داده می‌شود. سپس روش آنالیز داده‌ها و نتایج سن‌یابی به روش رخشانی سه نمونه برداشت شده عرضه می‌شود و در نهایت با استفاده از جابه‌جایی‌های به دست آمده نرخ لغزش روی گسل محاسبه می‌شود.

۲ زمین‌شناسی گسل گوک

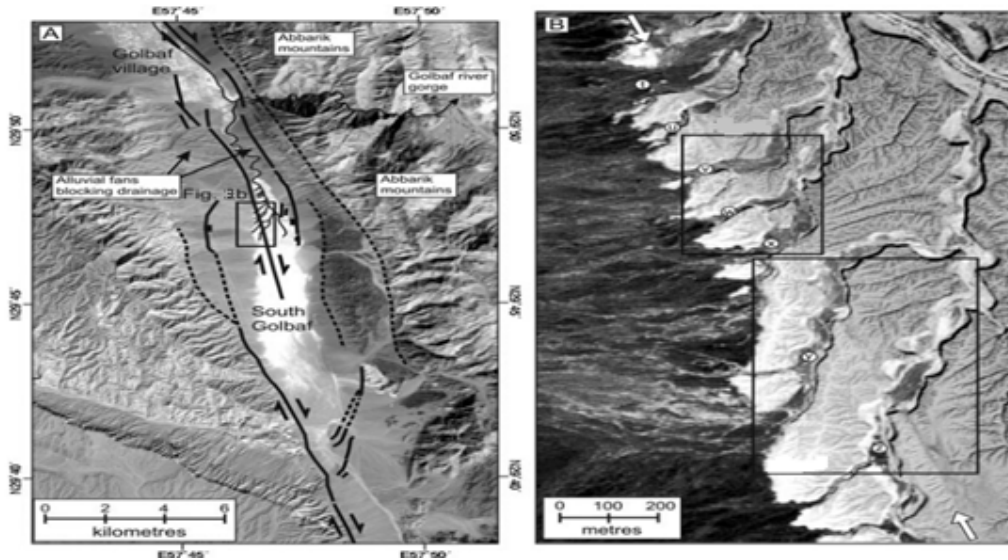
در ایالت ایران شرق مرکزی، بلوک نسبتاً هموار و غیرلرزه‌ای لوت قرار دارد. این بلوک در شرق و غرب با گسل‌های امتدادلغز بزرگ و لرزه‌زایی احاطه شده است. گسل گوک در همین ایالت و واقع در استان کرمان بخشی از سامانه گسلی امتدادلغز راست‌گرد ناینند-گوک-سبزواران است (بربریان و قریشی، ۱۹۹۴؛ واکر و جکسون، ۲۰۰۲؛ واکر، ۲۰۰۶). طول کلی سامانه گسلی



شکل ۱. A لرزه‌خیزی ایران بین سال‌های ۱۹۶۴-۱۹۹۰. رو مرکز زلزله‌ها از Engdahl و همکاران در ۱۹۹۸ گرفته شده است. فعالیت لرزه‌خیزی اساساً منطبق با مرزهای سیاسی ایران با اوراسیا و افغانستان است. ایران مرکزی و بلوک لوت بی‌لرزه با نمادهای L, C مشخص شده‌اند. B میدان سرعتی برآورد شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های GPS و نرخ استرین زلزله‌های رخ داده برگرفته از جکسون و همکاران ۱۹۹۵. به برش راست‌گرد در امتداد مرزهای سیاسی ایران در شرق ایران توجه شود (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱؛ واکر و جکسون، ۲۰۰۲؛ واکر، ۲۰۰۶).



شکل ۲. تصویر Landsat TM از ناحیه گسلی گوک. A. کل ناحیه مرکزی زون گسلی گوک از محل تقاطع آن با جنوبی ترین بخش گسل نایبند در شمال گسل گوک تا فرورفتگی گلباف جنوبی در جنوب آن که کل ناحیه شکستگی مربوط به پنج زلزله سالهای ۱۹۸۱-۱۹۹۸ را پوشش می دهد. توجه کنید که در شرق سامانه معکوس شهداد روی گسل های پنهان حاشیه های موازی از تاقدیس ها شکل گرفته اند. B تصویر جزئی از زون شکستگی زلزله ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندقا. خط مشگی واقع در دره گوک نشان دهنده گسل های سطحی همالرز هستند (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۳. A: تصویر ماهواره ای ASTER از فرورفتگی گلباف جنوبی؛ گسل های فعال با خطوط سیاه ضخیم و شاخه های اصلی رودها با خطوط سیاه نازک نشان داده شده اند. گسل های شرقی و غربی حوضه گلباف جنوبی، اصولاً شیب لغز با روند اصلی امتداد لغز هستند که در مرکز حوضه جابه جا می شوند. رسوبات هولوسنی (Holocene) بستر رودخانه در مرکز حوضه محدود شده اند (با زمینه روشن مشخص شده است). B: تصویر ماهواره ای SPOT5 از انشعاباتی از رودها که در جهت شرقی جریان دارند (شاخه های t-z) که رسوبات بستر رودخانه ای را بریده و در امتداد گسل گوک به صورت راست گرد جابه جا شده اند (واکر و همکاران، ۲۰۱۰).

۳ اهمیت تعیین نرخ لغزش گسل گوک

در دهه‌های اخیر گسل‌های غرب کویر لوت به‌ویژه گسل امتدادلغز راست گرد گوک فعالیت چشمگیری نشان داده‌اند. با توجه به اینکه این منطقه از ایران در نزدیکی مراکز پرجمعیت واقع شده است، بررسی دقیق‌تر پتانسیل لرزه‌زایی این گسل بسیار حائز اهمیت است. جنبش این گسل حداقل موجب ۵ زمین‌لرزه بزرگ در سه دهه گذشته شده است (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). راندگی شهادت در بخش شرقی گسل گوک واقع است و در دهه‌های اخیر جنبش لرزه‌زای قابل توجهی نداشته است و به نظر می‌رسد بیشترین جنبش آن به صورت خزش باشد. گسل‌های غربی این سامانه از جمله گسل رفسنجان نیز فعالیت لرزه‌زای قابل ملاحظه‌ای در چند دهه گذشته نداشته‌اند، اما بازدید‌های صحرائی نشان از فعال و جنبا بودن آنها دارد (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱).

در دست نداشتن داده‌های زمین‌لرزه‌ای دستگامی و تاریخی (تراکم کم جمعیت در حاشیه دشت لوت متاسفانه موجب بی‌توجهی داده‌ها و اطلاعات تاریخی از جنبش گسل‌های منطقه شده است)، همچنین کمبود اطلاعات ژئودتیک و ناشناخته بودن نرخ لغزش گسل‌ها (طالبیان و همکاران، ۱۳۸۸) در منطقه، ما را بر آن داشت تا روی سامانه گسلی گوک، به‌ویژه گلباف جنوبی، در حکم یک خطر بالقوه، بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تری را در زمینه تحلیل خطر به انجام برسانیم. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در رخداد زمین‌لرزه، نرخ لغزش گسل‌ها در آن منطقه است. بررسی نرخ لغزش از جمله مواردی است که با استفاده از آن می‌توان نرخ آزادسازی انرژی لرزه‌ای را در منطقه برآورد کرد. در این تحقیق روی سامانه گسلی گوک- نایبند در سمت غرب بلوک لوت متمرکز خواهیم شد. به خصوص به دو علت روی گسل گوک حساسیت ویژه‌ای خواهیم داشت. نخست زلزله‌های قابل توجهی که طی سی سال گذشته رخ داده‌اند و با شکستگی‌های

سطحی همراه بوده‌اند (بربریان و همکاران، ۱۹۸۴ و ۲۰۰۱)، که می‌توان با استفاده از آنها اطلاعاتی از ساختار زیرسطحی به دست آورد. دوم اینکه گسل گوک زمین‌ریخت‌شناسی چشمگیر و خاصی دارد که این امکان را می‌دهد تا بتوانیم جابه‌جایی‌ها و تغییرات با گذشت زمان را روی گسل بازسازی کنیم. این تحقیق همراه با سایر تحقیقات همچون تحقیق حاضر روی گسل درونه (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۶) شواهدی را فراهم می‌آورند که نشان می‌دهد چگونه سامانه‌های گسلی امتدادلغز روی آبراه‌ها و سامانه‌های خشک شده اثر دارند، و از این اثر می‌توان در برآورد خطر زلزله بهره گرفت و برای مناطق دیگر به کار برد.

۴ سایت گلباف جنوبی و منطقه نمونه برداری

با توجه به عدم فعالیت بخش جنوبی گسل گوک در سال‌های اخیر و احتمال وقوع زلزله‌ای مخرب همچون زلزله بم در سال ۲۰۰۳، سایت جنوبی گلباف را به طور خاص مورد بررسی قرار دادیم. حوزه گلباف جنوبی (واقع در حوزه کشش- جدایش بین بخش‌های شمالی و جنوبی گسل) از سه قطعه اصلی امتدادلغز راست گرد تشکیل شده است (شکل ۳). لغزش همالرزه‌ای (Coseismic) قطعه مرکزی در زلزله ۱۹۸۹ گلباف جنوبی (بربریان و قریشی، ۱۹۹۴؛ واکر و همکاران، ۲۰۱۰) منطقه‌ای به وسعت ۱۱ متر را پوشش داد که منطبق با بستر لغزش رسوبات رودخانه‌ای بود (واکر و همکاران، ۲۰۱۰). این رودخانه‌ها از کوه‌های اطراف نشأت گرفته و به این منطقه وارد می‌شوند. با این حال هیچ مسیر خروجی از جنوب گلباف به دشت لوت وجود ندارد، به همین دلیل خروج آب به سمت شمال و در راستای دره گسلی به سمت گلباف صورت گرفته است و از آنجا به سمت شرق جریان یافته و وارد دشت لوت می‌شود (بربریان و قریشی، ۱۹۹۴؛ بربریان و همکاران، ۱۹۸۴؛ ۲۰۰۱). رسوبات آبرفتی در زمانی در

صورت گیرد. از پرکاربردترین روش‌های سن‌یابی مطلق در یک منطقه، روش رادیوکربن (C^{14}) و رخشانی تحریک شده با نور (OSL) است (آیتکن، ۱۹۹۰؛ فتاحی، ۲۰۰۹). با وجود دقت روش رادیوکربن، به سبب دو محدودیت اساسی، اولاً نیاز به مواد آلی برای سن‌یابی و ثانیاً محدوده سنی کوتاه این روش که حدود ۴۰ تا ۵۰ هزار سال است، بهره‌گیری از آن در تحقیقات دیرینه‌زلزله‌شناسی بسیار محدود شده است (پرهاسکات و رابرتسون، ۱۹۹۷؛ پلاستینو، ۲۰۰۱؛ فتاحی، ۲۰۰۹). سن‌یابی به روش رخشانی نوری به علت خشک و نیمه‌خشک بودن ایران با شدت نور آفتاب زیاد روشی مناسب برای سن‌یابی خاک‌های مرتبط با زلزله است، زیرا اولاً به‌طور مستقیم خاک را بررسی و سن‌یابی می‌کند و ثانیاً محدوده سنی آن برخلاف روش رادیوکربن می‌تواند دوره کوتاه‌تری را پوشاند (امینی و فتاحی، ۱۳۹۰). بدین‌منظور در کنار تحقیقات به روش رادیوکربن (واکر و همکاران، ۲۰۱۰) در این منطقه، از روش سن‌یابی رخشانی نوری استفاده کردیم. در این روش، زمان سپری شده از آخرین باری که نمونه در معرض آفتاب بوده است، تعیین می‌شود. بنابراین سن به‌دست آمده در واقع بیانگر زمان جاری شدن سیلابی است که مواد خود را روی رسوبات قدیمی‌تر در دریاچه نهشته است و یا زمان تشکیل و فعال بودن دریاچه است.

این روش براساس سنجش میزان نور رخشانی ساطع شده از کانی‌ها، به‌ویژه کوآرتز و فلدسپار است (دالر، ۲۰۰۸). در طبیعت این کانی‌ها درحکم دُزی‌متر عمل می‌کنند، به‌طوری‌که می‌توانند مقدار تابشی که از پرتوایی ایزوتوپ‌های پرتوزا عنصرهایی چون اورانیم، توریم و پتاسیم ساطع می‌شود را در خود ثبت کنند (آیتکن، ۱۹۹۰-۱۹۹۸؛ رودز، ۱۹۹۸؛ دالر، ۲۰۰۸؛ فتاحی، ۲۰۰۹). این انرژی با به تله افتادن الکترون‌ها در نقایص موجود در ساختارهای بلوری این کانی‌ها ذخیره می‌شود

گذشته قسمت انتهایی شمالی حوزه گلباف جنوبی را بسته و همچون سد عمل کرده‌اند و موجب به وجود آمدن دریاچه شده‌اند.

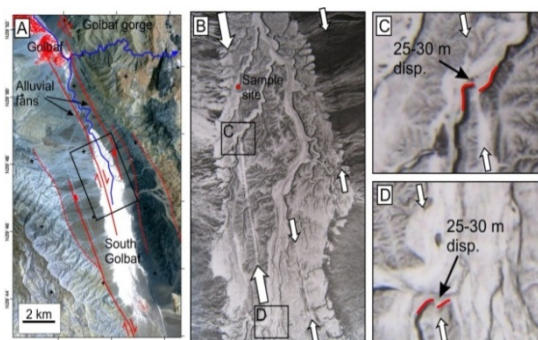
رسوبات بستر دریاچه در سطح حوضه (Basin) قابل‌رویت هستند. عکس‌های ماهواره‌ای و رسوبات دریاچه‌ای در قسمت جنوبی این گسل نشان می‌دهد که دریاچه‌ای قدیمی در این ناحیه وجود دارد که پس از خشک شدن، با رودخانه‌ها بریده شده است. انشعاب‌های بریده شده از اطراف تپه‌ها، هم در جهت شرقی و هم غربی جاری و به انشعاب اصلی مرکزی در بستر دریاچه قدیمی به یکدیگر ملحق می‌شوند. این رودخانه‌ها با گسل گوک به‌صورت جانبی جابه‌جا شده‌اند. این حوادث اقلیمی موجب شده است تا فعالیت‌های گسل از زمان تشکیل دریاچه تاکنون در دل طبیعت ضبط شود. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و تحقیقات صحرائی نشان داد که رودخانه با گسل به میزان حدود ۳۰ متر جابه‌جا شده است (شکل ۴) (واکر و همکاران، ۲۰۱۰). ناحیه‌ای در شرق گسل گوک که در آن رودخانه با گسل جابه‌جا شده و عمقی به اندازه ۳ متر دارد، لذا ارتفاع حدود سه متر از دریاچه در معرض دید واقع شده است؛ مناسب برای نمونه‌برداری، برای اندازه‌گیری نرخ لغزش گسل، تشخیص داده شد. از این دیواره رودخانه که دارای طول جغرافیایی ۵۷,۷۸ و عرض جغرافیایی ۲۹,۷۹ است، سه نمونه با لوله‌های فلزی برای سن‌یابی به روش رخشانی برداشت شد (شکل ۵). نمونه‌ها به روشی که در معرض نور قرار نگیرند بسته‌بندی و به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران منتقل شدند.

۵ روش سن‌یابی رخشانی نوری OSL

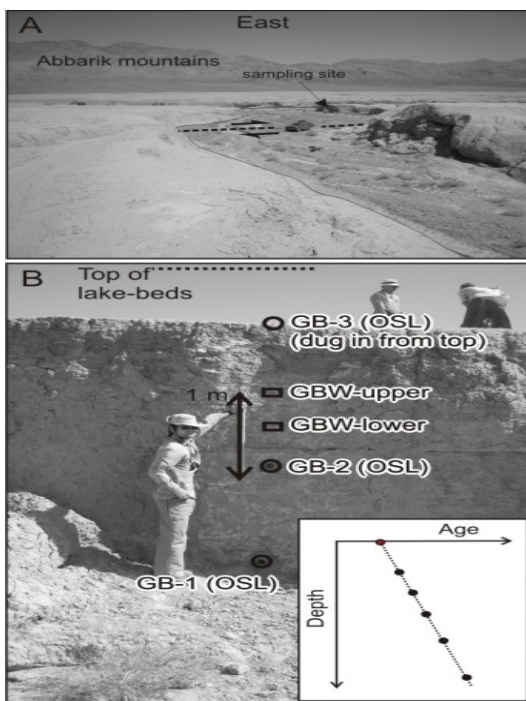
برای تحلیل پتانسیل لرزه‌خیزی گسل‌های منفردی چون گسل گوک، ضروری است عملیات سن‌یابی برای تعیین سن زلزله‌های دیرین، دوره فعالیت مجدد و نرخ لغزش

چون تعداد فوتون‌های حاصل معادل تعداد الکترون‌های جمع شده در تله طی زمان مدفون بودن در طبیعت است و چون الکترون‌ها رابطه مستقیمی با دُز پرتوزا محیطی که نمونه رسوبی در آن قرار داشته است، دارند؛ سیگنال رخشانی حاصل را سیگنال حاصل از دُز طبیعی (De) می‌نامند (فتاحی، ۲۰۰۹).

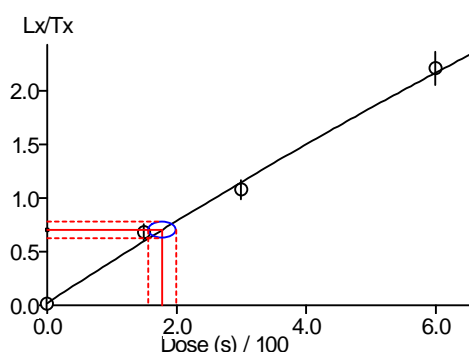
(باتر-جنسون، ۲۰۰۰). برای سن‌یابی، ذرات کوارتز و فلدسپار در آزمایشگاه جدا می‌شوند. این کانی‌ها با استفاده از لیزر با شدت و طول موج خاص تحریک می‌شوند تا تولید رخشانی کنند. سپس با استفاده از یک فتومولتی‌پلایر میزان این رخشانی (طبیعی) را اندازه‌گیری می‌کنند (تامسون، ۲۰۰۴؛ تامسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ دالر، ۲۰۰۸).



شکل ۴. جابه‌جایی حدود ۳۰ متری. سمت راست: تصویری از جابه‌جایی راست‌گرد مسیر رودخانه (خط زرد) که در اثر فعالیت گسل گوک ایجاد شده و هنگام حضور در محل پس از مطالعات تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شد. سمت چپ: تصاویر ماهواره‌ای از جابه‌جایی حدود ۲۵ - ۳۰ متر که به وضوح با تغییر مسیر آبراهه‌ها قابل مشاهده هستند.



شکل ۵. تصویر صحرایی ناحیه نمونه‌برداری. تصویر بالا نگاه به شرق داشته و رودخانه جابه‌جا شده با گسلش و محل نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. تصویر پایین محل دقیق سه نمونه رخشانی (GB-1 to GB-3) و دو نمونه کربن ۱۴ (GBW) را نشان می‌دهد.



شکل ۶. منحنی استاندارد رخشانی: خط سرخ افقی سیگنال تصحیح شده ناشی از دُزطبیعی دریافت شده از طبیعت و خط سرخ عمودی دُزمعادل دُزطبیعی محاسبه شده با این منحنی را نشان می‌دهد.

۶ اندازه‌گیری D_e

به منظور اندازه‌گیری دُزمعادل (D_e)، روش‌های متفاوتی وجود دارد و یکی از این روش‌ها پروتکل تولید مجدد تک‌الیکوتی (Single Aliquot Regeneration: SAR) است که ماری و وینتل (۲۰۰۰) معرفی کردند. در این پروتکل ضروری است پس از اندازه‌گیری سیگنال رخشانی طبیعی، نمونه را تحت دُزهای مشخص آزمایشگاهی قرار داده و سپس سیگنال رخشانی ناشی از آنها را اندازه‌گیری کرده. با استفاده از دُزهای داده شده و سیگنال اندازه‌گیری شده ناشی از آن دُزها، منحنی استاندارد را ساخت و به کمک آن دُزمعادل دُزطبیعی را به دست آورد (شکل ۶). اگر بتوانیم میزان دُزطبیعی حاصل، طی دورانی که نمونه تحت تابش پرتوهای پرتوزا در طبیعت بوده است را به دست آوریم و بر میزان دُزی که نمونه در هر سال دریافت کرده است (نرخ دُز) تقسیم کنیم، می‌توانیم سن آخرین صفرشدگی سیگنال رخشانی را به دست آوریم.

تا کوارتز خالص از نمونه استخراج و در سنیابی مورد استفاده قرار گیرد. لذا به صورت ایدئال پس از آماده‌سازی شیمیایی، انتظار داریم تا یک نمونه خالص از کوارتز به دست آید تا بتوانیم هرگونه تحلیلی روی آن عملی سازیم. اما در برخی از نمونه‌ها، به علت وفور فلدسپار پس از عملیات اسیدشویی HF آلودگی فلدسپار (Feldspar contamination) باقی می‌ماند؛ به این شکل که همه ذرات فلدسپار و کانی‌های دیگر در طی عملیات شیمیایی از بین نمی‌رود و لذا در سیگنال رخشانی اندازه‌گیری شده سهم هستند؛ به طوری که بخشی از سیگنال محاسبه شده حاصل از این ذرات است. آلودگی فلدسپار موجب برآورد کمتر سن نمونه می‌شود که ناشی از پدیده محوشدگی غیرعادی (Anomalous fading) است. در این پدیده بخشی از سیگنال (قبل از اندازه‌گیری) به طور ناخواسته از دست می‌رود. لذا در یک مرحله از آزمایش به روش تولید مجدد (SAR)، قبل از اندازه‌گیری سیگنال آبی کوارتز از راه تحریک با نور مرئی، نمونه تحت تابش فروسرخ قرار می‌گیرد. کوارتز تحت فروسرخ تحریک نمی‌شود و سیگنال رخشانی خود را از دست نمی‌دهد. اما فلدسپار به فروسرخ بسیار حساس است و سیگنال خود را از دست می‌دهد. آلودگی فلدسپار زمانی مشکل‌ساز

۷ روش لومینسانس تحریک شده بانور پس از فروسرخ (Post IR OSL)

به علت پایداری سیگنال رخشانی کوارتز، تلاش می‌شود

ترازهای حساس به گرما و مانند آن اشاره کرد که در ادامه به شرح آنها خواهیم پرداخت.

۷-۱ بررسی تکرارپذیری سیگنال رخشانی ناشی از دُز، برای تعیین و تصحیح حساسیت

دو روش متداول رخشانی نوری برای تعیین دُز معادل دُز طبیعی، روش‌های دُز اضافی (single aliquot additive dose) SAAD و تولید دُز مجدد ((SAR (single aliquot regenerative)) است (آیتکن، ۱۹۹۸؛ فتاحی، ۲۰۰۹). پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه پروتکل تولید دُز مجدد (Regenerative Dose) تک‌الیکوتی با ظهور مشکلاتی همچون تغییر حساسیت (تغییر دُز دریافت شده نسبت به دُز اعمال شده) رخ داده در حین آزمایش‌ها متوقف شد. مری و مجددهی (۱۹۹۹) اثبات کردند که از سیگنال OSL ناشی از یک مقدار دُز آزمایشی (Test Dose) ثابت، که پس از اندازه‌گیری سیگنال‌های طبیعی و دُز مجدد به نمونه داده می‌شود، می‌توان برای نمایش تغییر حساسیت استفاده کرد. همچنین با تقسیم سیگنال‌های طبیعی و دُز مجدد به سیگنال‌های OSL دُز آزمایشی (L_x/T_x) می‌توان حساسیت سیگنال OSL را تصحیح کرد. مهم‌ترین فرض در روش سار این است که اگر نموداری از دُز مجدد (L_x) برحسب دُز آزمایشی (T_x) خط مستقیمی که از مبدا عبور کرده است را نشان دهد، تصحیحات حساسیت به شکل صحیح و مناسبی اعمال شده است. همچنین با تابش دُز مشخص به نمونه و اندازه‌گیری سیگنال رخشانی آن در ابتدا و انتهای آزمایش‌ها انتظار می‌رود که اگر حساسیت به روش فوق تصحیح شده باشد، مقدار مشابهی برای (L_x/T_x) در ابتدای آزمایش و در انتهای آزمایش به دست آید، که نسبت بازیافت (Recycling Ratio) خوانده می‌شود (مری و وینتل، ۲۰۰۰).

می‌شود که سیگنال فروسرخ (فلدسپار) بیشتر از ۱۰٪ سیگنال آبی (کوارتز) باشد. برای همه نمونه‌ها این آزمایش صورت می‌گیرد و اگر نسبت سیگنال فروسرخ به آبی بیش از ۱۰٪ باشد، نتایج حاصل از سن‌یابی با نور آبی (که معمولاً برای کوارتز خالص به کار می‌رود) به تنهایی قابل قبول نیست و پروتکل نورآبی پس از فروسرخ (Post IR OSL) مورد استفاده قرار می‌گیرد (الکساندرسون، ۲۰۰۸). در این پروتکل پیش از اندازه‌گیری سیگنال OSL تحریک شده با نور آبی، در همه مراحل اندازه‌گیری، به منظور حذف کردن سهم سیگنال رخشانی (ناشی از فلدسپار)، نمونه را در معرض نور فروسرخ (IR) قرار می‌دهند (رابرت و وینتل، ۲۰۰۳). پروتکل پس از فروسرخ برای دُز معادل دُز طبیعی دو برآورد برای دُز معادل به دست می‌دهد؛ یکی با استفاده از فلدسپار (ناشی از اندازه‌گیری IRSL) و یکی با استفاده از کوارتز (ناشی از اندازه‌گیری (Post IR) OSL). یعنی در این روش ابتدا به کمک فروسرخ سیگنال ناشی از فلدسپار خالی می‌شود و آن‌گاه سیگنال رخشانی کوارتز با نور آبی اندازه‌گیری می‌شود. البته با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها روی یک الیکوت صورت می‌گیرد، نتایج مستقل از هم نیستند و مقایسه آنها ارزشمند است (دالر و باتر-جنسون، ۲۰۰۳).

ما نیز طی آزمایش‌های نمونه‌های برداشت شده از گلباف با مشکل آلوده بودن کوارتز به فلدسپار روبه‌رو شدیم، که برای رفع این مشکل از روش پس از فروسرخ (Post IR) OSL کمک گرفته و دُز معادل دُز طبیعی نمونه‌ها را با پروتکل سار محاسبه کردیم. برای اطمینان حاصل کردن از اینکه نتایج سن محاسبه شده به روش SAR صحیح و قابل اعتماد است لازم است تا عواملی مورد بررسی دقیق و موشکافانه قرار گیرد که از آن جمله می‌توان به تصحیح تغییر حساسیت، اثر پیش‌گرمایی در بازیابی دُز اعمال شده آزمایشگاهی و انتقال الکترون‌ها به

می‌شود. دماهای پیش‌گرمایی که موفق به بازیابی صحیح دژ شوند مناسب‌ترین دما برای سن‌یابی آن نمونه هستند.

۸ شرح آزمایش‌ها

نمونه‌های استخراج شده از منطقه نمونه‌برداری به آزمایشگاه موسسه منتقل شد. در تاریکی و تحت نور بسیار ضعیف سرخ دو طرف هر لوله باز شد و حدود ۱۰ سانتی‌متر از هر دو طرف که احتمال نور خوردگی داشت جدا شد و برای اندازه‌گیری رطوبت و دژسالانه مورد استفاده قرار گرفت. مابقی نمونه ابتدا با الک به صورت خشک و سپس با الک در زیر آب و به صورت خیس به اندازه‌های متفاوت تقسیم شد. یکی از اندازه‌ها در اسید کلریدریک قرار گرفت تا مواد آهنی آن از بین برود. سپس نمونه شستشو داده شد و در کوره قرار گرفت. پس از خشک شدن داخل کیسه پلاستیکی سیاه که امکان عبور نور از آن وجود ندارد قرار گرفت و به دانشگاه آکسفورد منتقل شد. پس از آن در آزمایشگاه رخشانی دانشگاه آکسفورد، نمونه در آب اکسیژنه قرار گرفت تا مواد آلی آن از بین برود. سپس شستشو داده شد و در کوره قرار گرفت. به کمک مایع سنگین پلی‌تنگستیت دانه‌ها به وزن‌های متفاوت تقسیم شدند و وزن بین ۲/۵۸gr تا ۲/۷۲gr حفظ شد. آن‌گاه نمونه با آب مقطر شسته شد و در کوره قرار گرفت. به منظور از بین بردن همه ناخالصی‌ها از جمله انواع فلدسپار، نمونه به مدت ۵۰ دقیقه در اسید فلوریدریک ۴۸٪ قرار گرفت. پس از شستشو با آب مقطر به مدت یک روز در اسید کلریدریک ۱۰٪ قرار گرفت. مجدداً با آب مقطر شستشو داده شد و در داخل کوره قرار گرفت. انتظار می‌رفت تا به این طریق، مقدار کافی کوارتز خالص حاصل شود. اما متأسفانه مقدار کوارتز به دست آمده کم بود و برای اجرای آزمایش‌های سن‌یابی کفایت نمی‌کرد. از این‌رو اندازه‌گیری دیگر از دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت و کلیه عملیات فوق عملی شد

۷-۲ بررسی اثر پیش‌گرمایی بر بازیابی دژ مشخص اعمال شده در آزمایشگاه

در ساختار بلوری ذرات کوارتز و فلدسپار تله‌هایی با انرژی‌های متفاوت وجود دارد. الکترون‌های موجود در این تله‌ها در صورت دریافت انرژی مناسب، از داخل تله خارج می‌شوند. برای مثال الکترون‌های به دام افتاده در مدت زمان رسوب‌گذاری موجود در تله TL، 110°C کوارتز، چنان‌چه بیش از ۸ ساعت در دمای محیط تهران قرار گیرند، به اندازه کافی انرژی کسب می‌کنند، از تله خارج می‌شوند و تولید رخشانی می‌کنند. برای حذف اثر سیگنال ناپایدار ناشی از این تله‌های کم‌عمق، نمونه قبل از اندازه‌گیری اصلی تا دمای خاصی گرم می‌شود. این دمای خاص به نمونه وابسته است و در برخی از کوارتزها، بعضی از این بارهای آزاد شده دوباره در تله‌های دیگر به دام می‌افتند (مری و اولی، ۲۰۰۲). برای مثال الکترون‌های موجود در تله‌های TL 320°C ، در دمای محیط پایدار هستند. اما اگر این الکترون‌ها در معرض نور خورشید، یا معادل آن به مدت بیش از حدود یک دقیقه در دمای مناسبی قرار گیرند، از تله خارج می‌شوند. لذا این تله حساس به نور است اما در دمای کم حساس به گرما نیست. متأسفانه یکی از پیامدهای پیش‌گرمایی نمونه، انتقال الکترون‌ها از تله‌های حساس به گرما به تله‌های حساس به نور است (آیتکن، ۱۹۹۸؛ رودز، ۲۰۰۰؛ فلاحی و همکاران، ۲۰۰۷). چنان‌چه این انتقال صورت گیرد خطا تولید می‌شود. لذا باید نمونه تا حدی گرم شود که تولید خطا نکند (الکساندرسون، ۲۰۰۸). از این‌رو برای بررسی و جلوگیری از اثرات منفی پیش‌گرمایی، در آزمایشگاه، ابتدا سیگنال طبیعی رخشانی نمونه پاک و سپس دژ مشخصی به نمونه داده می‌شود. آن‌گاه با اعمال دماهای پیش‌گرمایی (Preheat) (دمای اعمال شده پیش از دژ مجدد)؛ Cutheat (دمای اعمال شده پیش از دژ آزمایشی)) متفاوت دژ مشخص اعمال شده بازیابی

دژمعادل دژطبیعی حاصل برای سه روش وزنی و بافت‌نگار و شعاعی در جدول ۱ نشان داده شده است. در انتها نتایج دژمعادل به روش بافت‌نگار و نرخ دژسالانه محاسبه شده با استفاده از روش ICP MASS Spectrometry را در رابطه (۱) قرار دادیم تا سن فعالیت گسل مشخص شود.

$$(1) \quad \text{دژ معادل (گری)} \quad \left| \quad \text{نرخ دژ سالانه (گری)} \right. \\ \text{سن (سال)} = \frac{\text{دژ معادل (گری)}}{\text{نرخ دژ سالانه (گری)}}$$

براساس سن‌های به‌دست آمده برای عمق‌های متفاوت، نموداری رسم شد تا سن نمونه در سطح زمین به‌دست آید. به کمک سن به‌دست آمده در سطح و میزان کل جابه‌جایی صورت گرفته، نرخ لغزش گسل گوک محاسبه شد (شکل ۷). با توجه به کل جابه‌جایی محاسبه شده در برداشت‌های صحرائی (۳۰ متر) و میزان سن به‌دست آمده، بدون در نظر گرفتن خطاها، برای آخرین دوران رسوب‌گذاری (۴۱۰۰ سال)، نرخ لغزش گسل گوک در سطح معادل ۳/۷ میلی‌متر در سال به‌دست می‌آید. باین حال به‌منظور تعیین سن آخرین دوران رسوب‌گذاری و نرخ لغزش گسل، با توجه به اینکه خطاها مستقل بودند، محاسبات ریاضی برای تعیین این صورت گرفت و خطایی معادل ۱۳۰۰ سال به‌دست آمد. از این رو میزان سن برای آخرین دوران رسوب‌گذاری ۲۸۰۰ - ۵۴۰۰ سال و نرخ لغزش گسل گوک در سطح معادل ۵-۷/۱۰/۵ میلی‌متر در سال به‌دست می‌آید.

اما به‌جای قرار گرفتن نمونه به مدت ۵۰ دقیقه در اسید فلوریدریک، به مدت دو هفته در اسید هیدرو فلورسیلیسیک قرار گرفت. با مشاهده نمونه زیر میکروسکوپ، ملاحظه شد که نمونه دارای ناخالصی است. آزمایش صورت گرفته فرسوخ و نور آبی نیز حضور موثر فلدسپار را نشان داد، لذا تصمیم گرفتیم تا از روش رخشانی نوری پس از فرسوخ (post-IR) برای سن‌یابی نمونه‌ها استفاده کنیم.

۹ تعیین سن نمونه‌ها

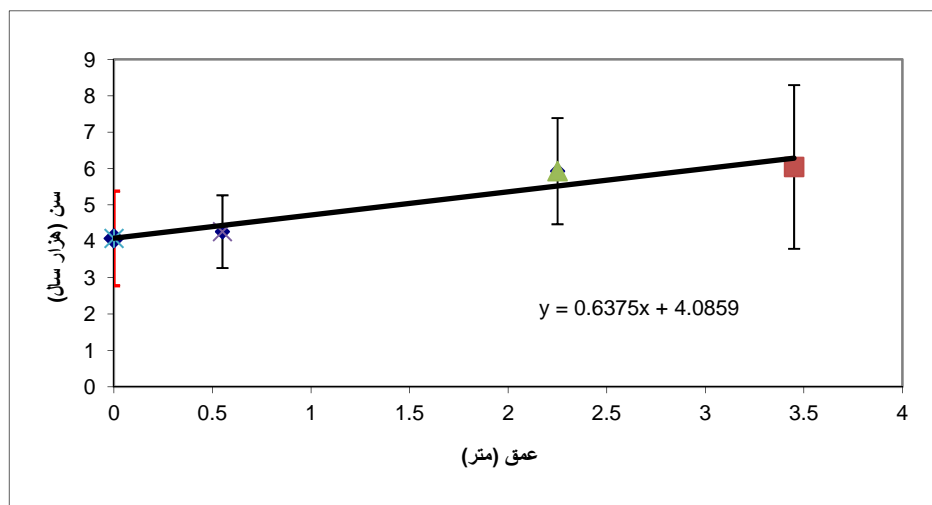
به‌منظور سن‌یابی به روش رخشانی، به دو پارامتر دژمعادل دژطبیعی (D_e)، و دژسالانه نیاز است. برای تعیین D_e ، از پروتکل تولید مجدد تک‌الیکوتی ماری و ویتل (۲۰۰۰) استفاده شد. با توجه به آنکه روش SAR یکی از روش‌های قابل اجرا در نرم‌افزار Analyst است؛ داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از ذرات کوارتز و فلدسپار (هر سه نمونه برداشت شده از دیواره رودخانه بریده شده با گسل گوک)، وارد برنامه Analyst شد. در ابتدا توانایی این روش در بازیابی دژ مشخصی که در آزمایشگاه به نمونه داده شد مورد بررسی قرار گرفت. سپس توانایی روش SAR برای اندازه‌گیری و تصحیح تغییر حساسیت در اثر دژ و گرما و نور بررسی شد. جزئیات این آزمایش‌ها و نتایج آنها، در مقاله اثر دژ پرتوزا و لیزر فرسوخ بر الیکوت‌های کناری (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۲) که هم‌زمان با این مقاله به مجله عرضه شده آمده است. نتایج

جدول ۱. نتایج دژمعادل دژطبیعی حاصل از الیکوت‌های استفاده شده در نرم‌افزار آنالیست به سه روش وزنی، بافت‌نگار (هیستوگرام) و شعاعی مربوط به نمونه‌های برداشت شده از دریاچه قدیم، گلباف.

نمونه های گلباف	خطا (Gy)	شعاعی (Gy)	خطا (Gy)	بافت‌نگار (Gy)	خطا (Gy)	وزنی (Gy)
GB1 POST IR	21.062	21.062	7.120	21.999	4.092	19.612
GB2 POST IR	22.767	22.341	4.519	22.767	4.690	21.318
GB3 POST IR	15.434	15.263	2.899	15.519	2.814	16.032

جدول ۲. با استفاده از نتایج دژمعادل دژطبیعی به روش بافت‌نگار و نرخ دژسالانه محاسبه شده سن نمونه‌های برداشت شده از سه عمق مختلف دریاچه حاصل شد.

نمونه‌های گلباف	دژمعادل دژطبیعی (Gy)	خطا (Gy)	عمق (m)	نرخ دژ سالانه (Gy/Ka)	خطا (Gy/Ka)	سن نمونه (Ka)
GB1 POST IR	21.999	7.120	3.45	3.639	0.176	6.045±2.25
GB2 POST IR	22.767	4.519	2.25	3.839	0.182	5.930±1.46
GB3 POST IR	15.519	2.899	0.55	3.638	0.177	4.267±1.00



شکل ۷. سن‌های محاسبه شده و خطای محاسباتی سه نمونه برداشت شده از سه عمق ۵۵/۰، ۲۵/۲ و ۴۵/۳ متر. با توجه به برون‌یابی نمودار، سن در سطح ۴۱۰۰ سال به دست آمد.

کردند که این مقدار نرخ لغزش در مقایسه با نرخ لغزش کلی در منطقه بسیار کم است. ریگارد و همکاران (۲۰۰۵)، نرخ لغزش دوران کواترنری پسین ۴-۴/۷ میلی‌متر بر سال را برای گسل سبزواران در بخش جنوبی گسل گوک و همچنین واکر و همکاران (۲۰۰۹) به روش سن‌یابی آرگون - آرگون نرخ لغزش ۹/۰-۹/۱ میلی‌متر بر سال را برای گسل ناینند در بخش شمالی گسل گوک تعیین کردند. سن‌یابی به روش رادیوکربن با استفاده از دو نمونه چوبی برداشت شده از دریاچه قدیم گلباف، از سوی واکر و همکاران در ۲۰۱۰ صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده سنی حدود ۸ هزار سال را برای عمق‌های

۱۰ نتیجه‌گیری

گسل گوک طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ مسبب پنج زلزله مخرب بوده است (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). از این رو به منظور تحلیل خطر در منطقه، تعیین نرخ لغزش آن مورد توجه قرار گرفته است. با تعیین سن نمونه و میزان جابه‌جایی، می‌توان نرخ لغزش یک گسل منفرد را محاسبه کرد. اولین بررسی‌ها روی این سامانه گسلی را واکر و جکسون (۲۰۰۲) عملی ساختند. این دو محقق با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های بلندمدت روی گسل گوک و سن‌یابی به روش پتاسیم - آرگون، نرخ لغزشی معادل ۴/۲-۵/۱ میلی‌متر بر سال را برآورد و در همان زمان اعلام

نمونه‌های چوبی برداشت شده نشان می‌داد که بر اساس آن نرخ لغزشی حدود $7/0 \pm 8/3$ میلی‌متر بر سال برآورد شد. در این مقاله به کمک روش سن‌یابی رخشانی (POST-IR OSL) و به‌کارگیری برنامه آنالیست به روش بافت‌نگار، حداقل نرخ لغزش $5/5-7/10$ میلی‌متر بر سال برای گسل گوک برآورد شد. این مقدار به‌دست آمده، در مقایسه با نرخ لغزش‌های تعیین شده و به‌منظور تحلیل خطر در منطقه نتیجه قابل‌توجهی محسوب می‌شود. نتایج اولیه سن‌یابی به روش سار حاکی از اختلاف بارزی بین نتایج رادیوکربن و رخشانی بود. سن رخشانی به مراتب کمتر از رادیوکربن به‌دست آمد. لذا تصمیم گرفتیم دقت آزمایش‌های رخشانی را بررسی کنیم. ابتدا توانایی روش سار در بازیابی دُز مشخص اعمال شده در آزمایشگاه به نمونه، مورد بررسی قرار گرفت. اگر پایین بودن سن رخشانی نسبت به رادیوکربن به علت این مهم بود، می‌بایست دُز بازیابی شده کمتر از مقدار دُز اعمال شده باشد، اما آزمایش‌ها، دُز بیشتر از دُز اعمال شده را نتیجه داد. به‌هرحال دُز واقعی به‌دست نیامد و این نتیجه گویای وجود خطا بود. بنابراین به توانایی روش برای تعیین سن نمونه مظنون شدیم اما با بررسی عوامل فنی و رفع آن (با تغییر چیدمان الیکوت‌ها) این اثر نامعقول حذف شد. لذا به‌لحاظ فنی، روش سار برای تعیین دُز مشخص آزمایشگاهی و متعاقباً سن نمونه درست عمل کرد و می‌توان براساس چینه‌شناسی موجود به صحت نتایج اعتماد داشت. لذا یا روش به‌کار رفته در این تحقیق به دلیلی که بر ما ناشناخته است سن را کمتر از واقعیت نشان داده است یا نمونه‌های استخراج شده برای استفاده از روش رادیوکربن زمان‌های زیادی قبل از انتقال و دفن شدن در دریاچه مرده بوده‌اند و لذا سن را بیش از واقعیت برآورد کرده‌اند. بنابراین با توجه به موقعیت خاص این گسل در منطقه، بررسی‌های دقیق‌تر و موشکافانه‌تر روی این گسل در تحقیقات بعدی را لازم می‌بینیم. محاسبه مقدار میانگین دوره بازگشت

زلزله‌ها برای گسل گوک به خاطر پیچیدگی زون گسلی در عمق پیچیده است؛ همان‌گونه که در امتداد روند گسلی گوک شکستگی‌های منفردی دیده می‌شود چنین شکستگی‌هایی به‌صورت قطعه گسلی را در عمق نیز حدس می‌زنند (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). گرچه، اگر براساس آخرین زلزله فندقا (زلزله ۱۹۹۸ فندقا، $M_w=6/6$) روی سامانه گسلی گوک فرض کنیم که نوعاً در هر زلزله ۳ متر لغزش رخ دهد، بیشینه دوره بازگشت بین زلزله‌ها با توجه به نرخ لغزش به‌دست آمده در این پژوهش، تقریباً ۲۸۰-۵۴۰ سال خواهد بود. با توجه به این دوره بازگشت کوتاه به‌دست آمده و نظر به اینکه بخش جنوبی گسل گوک (با طولی حدود ۹۰ کیلومتر و روندی نسبتاً بدون قطعه‌بندی) مسبب هیچ زلزله بزرگ گزارش شده‌ای نبوده است، از آن می‌توان درحکم یک پتانسیل بالقوه در ایجاد یک زلزله ویرانگر در منطقه یاد کرد. براساس نتایج به‌دست آمده در این مقاله و همچنین کارهای پیشین، این منطقه پرجمعیت از لحاظ لرزه‌خیزی از مناطق پرخطر محسوب می‌شود که می‌باید از لحاظ پیشگیری‌های اولیه و مهندسی زلزله مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از آقای رشیدی در دفتر سازمان زمین‌شناسی کرمان و آقای سلون به‌خاطر همراهی در نمونه‌برداری تشکر می‌کنیم. نویسنده دوم مقاله از سرکار خانم نینا عطایی و جناب آقای آیدین آقازاده و سرکار خانم حمیده امینی به‌خاطر همراهی‌ها و حمایت‌های علمی سپاسگزار است. آزمایش‌های سن‌یابی به روش رخشانی در مرکز مطالعات محیطی دانشگاه آکسفورد صورت گرفت.

مراجع

فتاحی، م.، عطایی، ن. کریمی مویذ، ن.، ۱۳۹۲، اثر دُز پرتوزا و لیزر فرسوخ بر الیکوت‌های کناری در

- Botter-Jensen, L., 2000, Development of optically stimulated luminescence techniques using natural minerals and ceramics, and their application to retrospective dosimetry, Riso national laboratory, Roskilde.
- Duller, G. A. T., 2008, Luminescence dating, guidelines on using luminescence dating in Archaeology, English Heritage, Swindon.
- Duller, G. A. T., 1991, Equivalent dose determination using single aliquots, Nuclear Tracks and Radiation Measurement, **18**, 371-378.
- Duller, G. A. T., Botter-Jensen, L., and Murray, A. S., 2003, Combining infrared and green-laser stimulation sources in single grain luminescence measurement in feldspar and quartz, Radiation Measurement, **37**, 543-550.
- Fattahi, M., Walker, R., Khatib, M. M., Dolati, A. and Bahroudi, J., 2006, Slip-rate estimates and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran, Geophysical Journal International. **168**, 691-709.
- Fattahi, M., and Walker, R., 2007. Luminescence dating of the last earthquake of the sabzevar thrust fault, NE IRAN, Quaternary Geochronology, **2**, 284-289.
- Fattahi, M., 2009, Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods, A review, Quaternary international **199**, 104-146.
- Fattahi, M., 2011, OSL as a bridge between paleoseismology, paleoclimatology and Archeology, Book of abstract, 13th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating, Torun, Poland, 10th- 14th July 2011.
- Fattahi, M., Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A. and Rasheedi, A., 2011. The structure and late Quaternary slip rate of the Rafsanjan strike-slip fault, SE Iran, Geosphere, **7**: 1159-1174.
- Murray, A. S., wintle, A. G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, Radiation Measurements, **32**, 57-73.
- Murray, A. S. and Olley, J. M. 2002, Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating sedimentary quartz, A statue review, Geochronometria, **21**, 1-16.
- Plastino, W., Kaihola, L., Bartolomei, P. and Bella, F., 2001, Cosmic background reduction in the radiocarbon measurement by scintillation spectrometry at the underground laboratory of grand sasso, Radiocarbon, **43**, 157-161.
- هنگام اندازه‌گیری سن نمونه های گلیاف به روش پس از فروسرخ، م. فیزیک زمین و فضا در حال بررسی است.
- فتاحی، م.، رستمی مهربان، س.، طالبیان، م.، بحرودی، ع.، هالینگورث، ج. و واکر، ر.، ۱۳۹۰، بررسی فعالیت گسل نیشابور در استان خراسان، م. علوم زمین، **۲۹**، ۵۵-۶۰.
- امینی، ح.، فتاحی، م. و قاسمی، م.، ۱۳۹۰، محاسبه نرخ لغزش در منطقه شش تراز گسل درونه به روش هیستوگرام و حداقل سن با استفاده از لومینسانس برانگیخته شده با نور، م. ژئوفیزیک ایران، **۵(۳)**، ۲۹-۱۴.
- طالبیان، م.، هاشمی طباطبایی، س.، فتاحی، م.، قرشی، م.، بیت‌الهی، ع.، قلندرزاده، ع. و ریاحی، م.، ۱۳۸۸، برآورد نرخ لغزش گسل‌های پیرامون بم و کاربرد آن در خطر زمین‌لرزه، علوم زمین **۷۴**، ۱۵۶-۱۴۹.
- Aitken, M. J., 1990, Science-based dating in archaeology, Lonhman, London.
- Aitken, M. J., 1998, An introduction to optical dating, Oxford University press, New York.
- Alexanderson, H., Johnsen, T., Wohlfarth, B., Naslund, J. and Ove, S., 2008, Weichselian glacial history of south and central Sweden, Reports from the Department of Physical Geography and Quaternary Geology Stockholm University.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Ghorashi, M. and Kajdar, M. H., 1984, Field and teleseismic observation of the 1981 Golbaf-Sirch earthquakes in SE Iran, Geophys, **77**, 809-838.
- Berberian, M. and Qorashi, M., 1994, Coseismic fault-related folding during the south Golbaf earthquake of November 20, 1989, in southeast Iran, Geology, **22**, p. 531-534.
- Berberian, M., Jackson, A. J., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, M., Wright, T. J., and Baker, C., 2001, The 1999 March 14 Fandoqa earthquake (Mw= 6.6) in kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone, Geophys. J. Int., **146**, 371-398.

- National Laboratory, Roskilde, Denmark, Phd Thesis, 1-176.
- Thomsen, K. J., Botter-Jensen, L., Denby, P. M., Moska, P., and Murray, A. S., 2006, Development in luminescence measurement techniques, *Radiation Measurement*, **41**, 768-773.
- Walker, R., and Jackson, J., 2002, Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike slip system, *Journal of Structural Geology*, **24**, 1677-1698.
- Walker, R. T., 2006. A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran, *Journal of Structural Geology*, **24**, 654-668 .
- Walker, R. T., Gans, P., Allen, M. B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N., and Zarrinkoub, M., 2009, Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran, *Geophysical Journal International*, **177**, 783-805.
- Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., Rasheedi, A., Fattahi, M., and Bryant, M., 2010, Holocene slip rate on the Gowk strike-slip fault implications for the distribution of tectonic strain in eastern Iran, *Geophys. J. Int.*, **181**, 221-228.
- Prescott, J. R., and Robertson, G. B., 1997. Sediment dating by luminescence, A review, *Radiation Measurements*, **27**, 893-922.
- Rhodes, E. J., 1988, Methodological considerations in the optical dating of quartz. *Quaternary Science Reviews*, **7**, 395-400.
- Rhodes, E. J., 2000, Observation of thermal transfer OSL signals in glacial quartz, *Radiation Measurements*, **32**, 595-602.
- Roberts, H. M., and Wintle, A. G., 2003, Luminescence sensitivity changes of polymineral fine grains during IRSL and [POST IR] OSL measurements, *Radiation Measurements*, **37**, 661-671.
- Regard, V., Bellier, O., Braucher, R., Gasse, F., Bourles, D., Mercier, J., Thomas, J. C., Abbassi, M. R., Shabanian, E., and Soleymani, Sh, 2005, ^{10}Be dating of alluvial deposits from Southeastern Iran (the Hormoz Strait area), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **242**, 36-53
- Thomsen, K. J., 2004, Optically stimulated luminescence techniques in retrospective dosimetry using single grains of quartz extracted from unheated materials, *Riso*