

بررسی پتانسیل لومینسانس تحریک شده با اشعه مادون قرمز جهت سن‌یابی سنگ‌های واریزه‌ای زمین‌لغزش فتلک

نسرین کریمی موید^{۱*}، مرتضی فتاحی^۲، رضا صحبتی^۳، ابراهیم حق شناس^۴، وحید تاجیک^۵، ضیاء الدین شعاعی^۶ و اندرو ماری^۷

۱. دانشجوی دکتری، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه زلوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه زلوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. پژوهشگر، آزمایشگاه ریزو، دانشکده فنی دانمارک، رزکیله، دانمارک

۴. استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۵. کارشناس، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۶. دانشیار، مؤسسه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و تربیت کشاورزی، تهران، ایران

۷. استاد، آزمایشگاه سن‌یابی لومینسانس نوردیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه آرهوس، رزکیله، دانمارک

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰)

چکیده

طی دهه گذشته روش نوینی جهت سن‌یابی سطوح سنگی با استفاده از سیگنال لومینسانس تحریک شده با اشعه مادون قرمز ارائه شد. این روش بر پایه نمودار لومینسانس-عمق است که در آن با افزایش مدت زمانی که سنگ در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد عمق نفوذ نور به داخل سنگ افزایش و سیگنال لومینسانس موجود در سنگ کاهش می‌یابد. با استفاده از این رویکرد، سایت‌های مختلفی از جمله در ایتالیا و دانمارک با موقیت سن‌یابی شده‌اند. لذا در این پژوهش امکان سن‌یابی نمونه‌های سنگی واریزه‌ای ناشی از زمین‌لغزش فتلک به کمک این روش مورد بررسی قرار گرفت. اما متأسفانه نتایج حاصل از نمونه فتلک منطبق با مدل ارائه شده نبود و تعیین سن انجام نشد. از این رونمونه‌های سنگی از سایتی در اسپانیا برداشت شد تا با همان روش‌های آزمایشگاهی که نمونه فتلک مطالعه شد مورد سن‌یابی قرار گیرند که نتایج با مدل همخوانی داشت. اطلاعات حاصل از این پژوهش نشان داد که مراحل نمونه‌برداری و انجام آزمایشات به طور صحیح انجام شده است و روش به درستی عمل می‌کند اما مشکل اصلی در ذات و حساسیت نمونه‌های برداشت شده از منطقه فتلک جهت تولید لومینسانس است.

واژه‌های کلیدی: سن‌یابی سنگ، لومینسانس نوری مادون قرمز، نمودار لومینسانس-عمق، زلزله رودبار-منجیل، زمین‌لغزش فتلک.

۱. مقدمه

میلی‌متر از سطح سنگ به صورت کامل از بین می‌رود. مرگ‌استین و همکاران (۲۰۰۳) از لومینسانس تحریک شده با مادون قرمز جهت تعیین سن فلدسپارهای چند ده میکرونی که از سطح یک سنگ نقاشی شده برداشت شده بود، استفاده کردند اما سن‌های به دست آمده با سن‌های مستقل همخوانی نداشت. آنها دلیل عدم همخوانی سنی را وجود محوش‌گی غیرعادی (Anomalous fading) و صفرشدن گی ناکامل دانه‌های فلدسپار در داخل سنگ عنوان کردند. در تلاشی دیگر گریلیچ و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از یک دوربین مخصوص سنگ‌های گرانیتی برداشت شده از یک قلعه بازمانده از قرون وسطی در آلمان را سن‌یابی کردند. آنها با استفاده از تابش زرد ایجاد شده توسط فلدسپار که با

از حدود ۲۵ سال پیش متخصصین لومینسانس تلاش کردند تا روشی جهت سن‌یابی سنگ‌ها پیدا کنند. لیریتز (۱۹۹۴) پیشنهاد کرد تا از ترمولومینسانس جهت تعیین سن زمان ساخت ساختمان‌هایی که با سنگ ساخته شده‌اند، استفاده شود و کوشش‌هایی نیز در این جهت انجام داد اما ملاحظه کرد که سیگنال ترمولومینسانس باقی‌مانده بسیار زیاد بوده، لذا تعیین سن سنگ امکان‌پذیر نبود. هابرمن و همکاران (۲۰۰۰) وسیله اندازه‌گیری جدیدی جهت اندازه‌گیری لومینسانس تحریک شده با مادون قرمز ساختند تا بتواند سیگنال ناشی از سنگ‌های گرانیتی را آشکار کنند. با استفاده از این دستگاه آنها نشان دادند که اگر سنگ در حدود چند دقیقه در معرض نور خورشید قرار گرفته باشد، سیگنال لومینسانس در حداقل عمق دو

*نگارنده رابط:

سنگ‌فرش‌های جاده‌ای در یک محوطه باستانی در پرتفاعل را سن‌یابی کردند. آنها برای رسیدن به این هدف مدل خود را گسترش داده و شامل اندازه‌گیری نرخ دوز محیطی کردند. از کارهای مهم صحبتی و همکاران (۲۰۱۲c) این بود که برای اولین بار نشان دادند که اولاً در داخل عمق سنگ، دوره‌هایی که سنگ در معرض نور خورشید بوده است و سیگنال لومینسانس خود را ازدست داده است، ثبت و ضبط شده است؛ ثانیاً با ترسیم نمودار (Profile) لومینسانس با عمق می‌توان حوادث گذشته را که چندین بار اتفاق افتاده و در اثر آن حوادث سنگ در معرض نور خورشید بوده است را سن‌یابی کرد. صحبتی و همکاران (۲۰۱۲c) در مدل‌شان فرض کردند که هنگامی که سنگ در طول روز در داخل تله‌های اتم‌های آن گیرد، نرخ جمع‌شدن بارها در داخل تله‌های اتم‌های آن سنگ (که ناشی از تابش‌های یونیزاسیون‌های طبیعی است) در مقایسه با نرخ کاهش سیگنال لومینسانس (در اثر تحریک با نور خورشید) قابل صرف‌نظر کردن است. البته آنها توضیح دادند که این فرض فقط برای سنگ‌هایی که در دوران‌های کوتاه تحت تأثیر نور خورشید بوده‌اند و همین‌طور در محیط‌هایی که دارای نرخ دوز محیطی کوتاه می‌باشند، قابل قبول است. آنها مدل خود را بهبود دادند و تأثیر همزمان قرار گرفتن سنگ در معرض نور خورشید و تابش‌های رادیواکتیو را در مدل گنجاندند. صحبتی و همکاران اعلام کردند که مدل آنها تقریباً مدلی کامل است و پتانسیل لازم برای سن‌یابی اسکارپ‌ها و سنگ‌هایی که توسط زمین‌لغزش‌ها جابه‌جا شده‌اند (مثل سنگ واریزه‌ها) و محدوده سنی آنها بین ۱۰ تا ۱۰۰ هزار سال می‌باشد، را دارد. با توجه به موفقیت مدل پیشنهادی صحبتی و همکاران در سن‌یابی سنگ‌ها و سطوح سنگی هنری در مناطق باستان‌شناسی تصمیم گرفتیم تا پتانسیل این روش را جهت سن‌یابی سنگ‌های واریزه‌ای ناشی از زمین‌لغزش‌ها بررسی کنیم.

بیشتر زمین‌لرزه‌های متوسط تا سترگ سبب زمین‌لغزش‌ها می‌شوند. از پارینه زمین‌لغزش‌هایی که در بیشتر محیط‌ها و

مادون‌قرمز تحریک شده بود، سن‌هایی را به دست آوردند که با سن‌های مستقل برابری می‌کرد. وافیادو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از سیگنال ماورای بنفش (ایجاد شده در اثر تحریک با نور آبی اسلایس‌های جداسده از سنگ‌های گرانیتی)، موفق شدند میزان صفرشدن‌گی سیگنال لومینسانس در عمق را بررسی کنند و به این نتیجه رسیدند که پس از چهارده روز در معرض نور خورشید بودن سیگنال لومینسانس تا عمق پنج میلی‌متر پاک شده است. لیریتز و همکاران طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ و لیریتز در سال ۲۰۱۱، تلاش‌های زیادی جهت سن‌یابی سنگ‌های باستان‌شناسی انجام دادند ولی هیچ‌یک از نتایج آنها با سن‌های مستقل تطبیق نداشت. پولیکرتی و همکاران (۲۰۰۳) و پولیکرتی (۲۰۰۷) پیشنهاد کردند که می‌توان از لومینسانس جهت تخمین مدت‌زمانی که سطح سنگ در معرض نور خورشید بوده است استفاده کرد، روش آنها به‌واقع اطلاعاتی مشابه روش سن‌یابی بهروش پرتوهای کیهانی (Cosmogenic) به دست می‌داد.

در سال ۲۰۱۱ صحبتی و همکاران، وابستگی پاک‌شدگی سیگنال لومینسانس تحریک شده با مادون‌قرمز در اثر نور خورشید با عمق را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مدلی را برای مطالعات خود ارائه دادند که برای توصیف لومینسانس باقی‌مانده در سطح سنگ‌های طبیعی که در معرض نور خورشید بودند مناسب به نظر می‌رسید. بر اساس مدل آنها با افزایش مدت‌زمانی که سنگ در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد عمق نفوذ نور به داخل سنگ افزایش یافته و سیگنال لومینسانس موجود در سنگ کاهش می‌یابد، اما به کمک این مدل نتوانستند سن سنگی را محاسبه کنند. صحبتی و همکاران (۲۰۱۲a) برای اولین بار در جامعه لومینسانس موفق به سن‌یابی سنگ‌های با سن مشخص شدند و سپس سنگ‌هایی با سن نامشخص را سن‌یابی کردند و روشهای منطقی و با اعتبار جهت سن‌یابی سطوح سنگی توسط روش لومینسانس نوری ارائه کردند. صحبتی و همکاران (۲۰۱۲b) به کمک روش جدید سن‌یابی لومینسانس نوری برای سطوح سنگی،

مشرف به شهر رودبار واقع شده است (شکل ۱). سنگ‌های مرتبط با حرکت‌های توده‌ای یا واریزه‌ای برداشت شده از فتلک انتخاب شد تا با روش لومینسانس نوری سن یابی شود.

۲. روش پژوهش

در این پژوهش از روش جدید سن یابی سنگ به وسیله لومینسانس نوری استفاده شد.

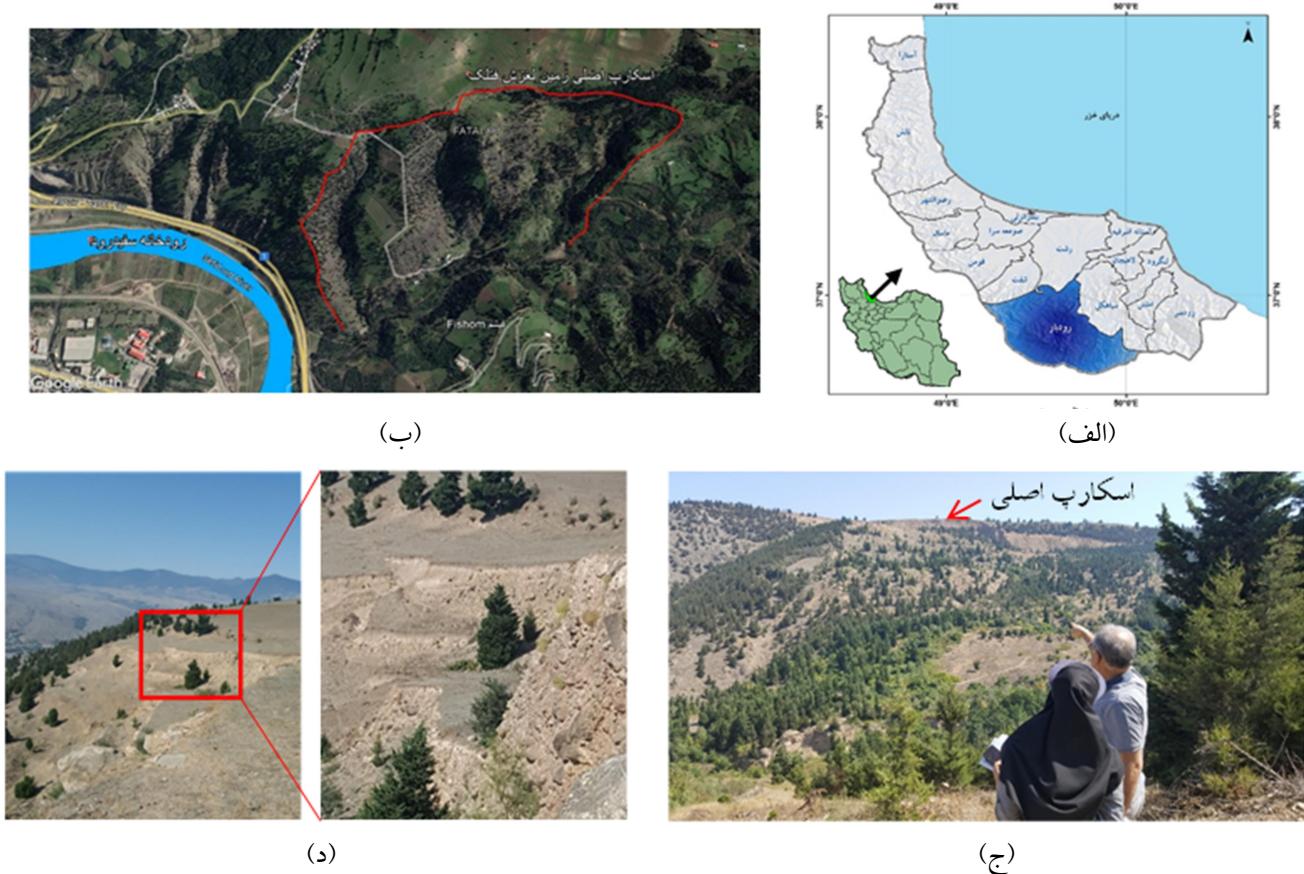
۱-۱. مبانی سن یابی به روش لومینسانس نوری

در سن یابی به روش لومینسانس نوری، زمان آخرین نورخوردگی نمونه مشخص می‌شود. نمونه می‌تواند طبیعی (همچون رسوبات، سنگ و مواد آتش‌فشاری) و یا ساخته دست بشر (همچون سرامیک، خشت و آجر) باشد که در هردو حالت، معمولاً حاوی کانی‌های کوارتز و فلدسپار است. این کانی‌ها هنگامیکه در زمین دفن می‌شوند در معرض تشعشعات رادیواکتیو ناشی از مواد رادیواکتیو موجود در محیط اطراف و داخل نمونه از جمله اورانیوم، توریوم و پتاسیم و همچنین تشعشعات کیهانی قرار می‌گیرند. با گذرا زمان انرژی تابشی محیطی در شیکه بلوری کوارتز و فلدسپار افزایش و برای مدت‌های طولانی حتی چند صد هزار سال حفظ و نگهداری می‌شود. این ذرات در قالب نمونه‌های رسوبی و یا سنگی مرتبط با رویداد مربوطه همچون رویداد طبیعی زمین‌لغزش و تحت شرایط نمونه‌برداری خاص (فتاحی، ۱۴۰۰) از دل زمین استخراج شده و به آزمایشگاه لومینسانس انتقال داده می‌شوند. میزان انرژی ذخیره شده با زمان نسبت مستقیم دارد از این‌رو از آن به عنوان فاکتوری جهت تعیین زمان سپری شده از آخرین نوردیدگی نمونه استفاده می‌شود. در سن یابی به روش لومینسانس نوری، انرژی ذخیره شده در کانی بر اثر تحریک کانی با نور به صورت لومینسانس آزاد می‌شود. با اندازه‌گیری کل انرژی ذخیره شده و تقسیم آن بر انرژی ذخیره شده در واحد زمان سن نمونه به دست می‌آید.

در بین رکوردهای زمین‌شناسی محفوظ می‌مانند می‌توان برای بررسی پارینه لرزه‌شناسی (زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله) استفاده کرد. با مطالعه پارینه زمین‌لغزش‌های زمین‌لرزه‌ای می‌توان تاریخچه لرزه‌ای یک منطقه خاص را بدون در نظر گرفتن چشمۀ لرزه‌ای خاص تعیین کرد (مک‌کالپین، ۲۰۰۹). مطالعات پارینه زمین‌لغزش‌های زمین‌لرزه‌ای شامل سه مرحله اصلی است: اولاً یک رویداد به عنوان یک زمین‌لغزش مشخص می‌شود. ثانیاً زمین‌لغزش سن یابی می‌شود. و در نهایت سرچشمۀ زمین‌لرزه‌ای زمین‌لغزش مورد نظر نشان داده می‌شود.

۱-۱. اهمیت سن یابی زمین‌لغزش‌ها در منطقه فتلک

رویداد زمین‌لرزه ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ رودبار-منجیل با بزرگی ($M_w = 7/7$ و $M_s = 7/3$) موجب بالغ بر ۱۴۵ زمین‌لغزش و حرکت‌های واریزه‌ای متعدد (خوشه‌ای) شد (بربریان و واکر، ۲۰۱۰؛ زارع، ۱۹۹۳). این لغزش‌ها با طول قابل توجه، موجب بروز خسارات زیاد از جمله قطع لوله سراسری انتقال نفت قزوین-رشت، انهدام ده‌ها هکتار باغات زیتون، تخریب شبکه‌های آبیاری و مفقود شدن چند دهنه چشمۀ شد. مشاهده این پدیده می‌بین این واقعیت است که چنان‌چه در گذشته زلزله‌ای رخ داده باشد حرکت‌های توده‌ای مشابهی را به صورت خوشه‌ای به همراه داشته است. یعنی در این منطقه به احتمال زیاد علاوه‌بر زمین‌لغزش‌های خوشه‌ای اخیر، زمین‌لغزش‌های خوشه‌ای دیرین نیز موجود است. مطالعات میدانی اولیه در مناطق لغزشی فتلک، گلستان، تکابن، کیاباد، دشتگان، بیورزان و نصفی، آثار زمین‌لغزش‌های دیرین و جدید را نشان داد. لذا این منطقه به عنوان محل مورد مطالعه انتخاب شد. در این میان، زمین‌لغزش فتلک همزمان با شوک اصلی زلزله رودبار-منجیل رخ داد و روستای فتلک را زیر توده عظیمی از خاک مدفون کرد و موجب مرگ کلیه اهالی روستا با جمعیت حدود ۱۷۵ نفر شد. این منطقه لغزشی به وسعت ۲/۵ کیلومتر طول و ۳۵۰ متر عرض، در حاشیه شرقی دره سفید رود و در ارتفاعات



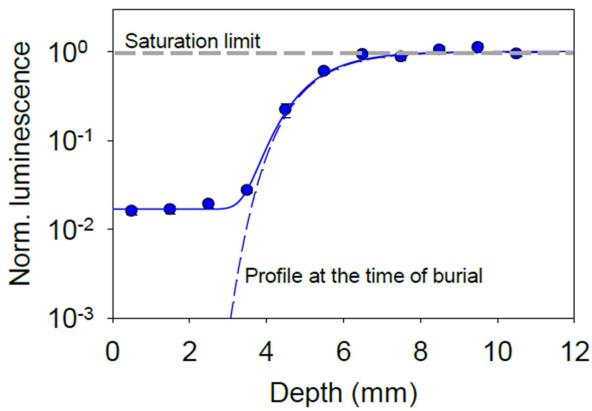
شکل ۱. (الف) موقعیت شهرستان رودبار واقع در استان گیلان (برگرفته از سایت سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشوری). (ب) نمایی از وسعت زمین‌لغزش فتلک و موقعیت منطقه مورد مطالعه به کمک Google Earth. (ج) اسکارپ زمین‌لغزش فتلک. (د) موقعیت نمونه برداشته از اسکارپ زمین‌لغزش را نشان می‌دهد.

۱-۲-۲. صفرشدگی از سطح تا عمق (نمودار لومینسانس-عمق)

زمانی که یک سطح سنگی در اثر یک حادثه در معرض نور روزانه قرار می‌گیرد (در مورد مطالعه‌ای ما منظور سطح اسکارپ واریزه است که در اثر حرکت تودهای مواد سنگی-رسوبی ایجاد شده است)، سیگنال لومینسانس موجود در کانی‌های آن (کوارتز و فلدسپار) که در مدت بازه زمین‌شناسی ذخیره شده بود شروع به کاهش می‌کند. واضح است که نرخ کاهش سیگنال لومینسانس به دلیل میرایی نور روزانه به داخل سطوح سنگی با عمق کاهش می‌یابد. این اختلاف در نرخ صفرشدگی سیگنال لومینسانس با عمق منجر به ایجاد یک نمودار لومینسانس-عمق می‌شود (شکل ۲ برگرفته از صحبتی و همکاران، ۲۰۱۲a).

۲-۲. سن‌یابی سنگ به روش لومینسانس نوری اصول سن‌یابی لومینسانس در سنگ، مشابه رسوب است. یکی از فرضیه‌های بنیادی در سن‌یابی رسوبات صفر بودن سیگنال لومینسانس دانه‌های رسوب در هنگام دفن است که برای رسوبات به راحتی قابل بررسی نیست. بر خلاف رسوبات، در سنگ‌ها میزان صفرشدگی سیگنال لومینسانس ثبت شده است. یعنی سنگ‌ها حاوی رکوردهایی هستند که میزان کاهش سیگنال لومینسانس پیش از مدفون شدنگی دراثر نور خورشید را در خود ضبط کرده‌اند. میزان سیگنال لومینسانس مربوط به حوادث گذشته از طریق نمودار لومینسانس-عمق قابل آشکارسازی و اندازه‌گیری است.

می دهد آیا سطوح سنگی موردنظر مناسب برای سن یابی با این روش هستند یا خیر. در صورتی که نمودار واضحی همچون نمونه مدل شده در شکل های ۲ و ۳ حاصل نشود، نمایان است که سیگنال نمونه سنگی کاملاً در طبیعت صفر نشده است و نمی توان با اطمینان از لایه سطحی سنگ جهت سن یابی به روش لومینسانس نوری استفاده کرد.

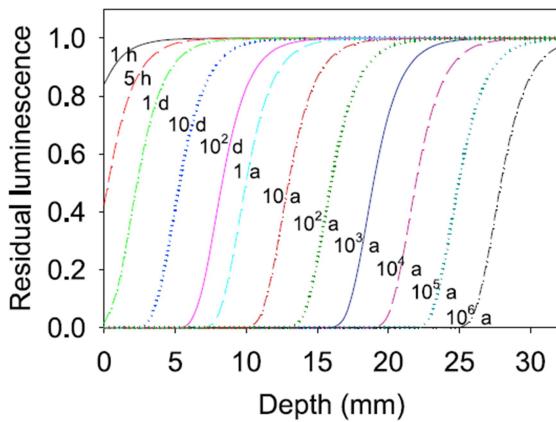


شکل ۳. سیگنال لومینسانس نرمال‌بازشده با عمق برای نمونه سنگ‌ریزشی از Utah آمریکا. خط خاکستری حد اشباع را نشان می‌دهد و خط‌چین آبی نمودار پیش‌بینی شده در زمان دفن شدگی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که لومینسانس از عمق حداقل ۳ میلی‌متری قبل از دفن شدگی کاملاً صفر شده است. این مقدار سیگنال لومینسانس ثبت شده در عمق حدود ۳ میلی‌متری بعد از صفر شدگی کامل و در طول دفن شدگی پس از حادثه ریزش سنگ به دست آمده است (صحبته، ۲۰۱۲a).

۳-۲. مشاهدات، اندازه‌گیری و آزمایشات

۳-۲-۱. نمونه‌برداری

در ابتدا نمونه‌های سنگی در ابعاد کوچک و متوسط از دیواره (تاج زمین‌لغزش) و پنجه واریزه‌های مرتبط با زمین‌لغزش‌ها (در بعضی موارد از جمله منطقه فتلک دسترسی به پنجه زمین‌لغزش بسیار دشوار و غیرممکن بود از این رو از نواحی نزدیک به دیواره یا راس زمین‌لغزش نمونه‌برداری انجام شد) به کمک اسپری مشکی نشانه‌گذاری شد تا (در زمان آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه تاریک لومینسانس) سمت رو به نور از سمت دفني قابل شناسایی باشد. سپس نمونه‌های



شکل ۲. نمودار لومینسانس-عمق. میزان سیگنال لومینسانس باقی‌مانده در سنگ بعد از مدت‌زمانی که در مععرض نور خورشید قرار گرفته است را نشان می‌دهد. هر اندازه سنگ مدت‌زمان بیشتری را در مععرض نور سپری کند، در عمق بیشتری از سنگ صفر شدگی کامل رخ خواهد داد (صحبته و همکاران، ۲۰۱۲a).

ممکن است سیگنال لومینسانس در سطح به‌طور کامل صفر شده باشد اما با افزایش عمق به داخل سطوح سنگی این سیگنال افزایش و در عمق به حد اشباع خود می‌رسد (لاسکاریس و لیریتز، ۲۰۱۱؛ صحبتی و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲a-c). در صورتی که سطح در مععرض نور قرار گرفته مجدداً دفن شود (در مورد مطالعه‌ای ما منظور سطوح سنگی هستند که در پنجه توده واریزای مدفون شده‌اند) سیگنال لومینسانس موجود در بخش صفر شده نمودار مجدداً شروع به افزایش می‌کند تا به حالت اشباع برسد (شکل ۳ برگرفته از صحبتی و همکاران (۲۰۱۲a)). با اندازه‌گیری مقدار سیگنال لومینسانس تجمع یافته در سطح سطوح سنگی در مدت‌زمانی که مدفون بوده‌اند و اندازه‌گیری فعالیت رادیواکتیویته محیط می‌توان مدت‌زمانی را که سطوح سنگی مدفون بوده‌اند و در نتیجه زمان رخداد حرکت توده‌ای را محاسبه کرد (چاپوت و همکاران، ۲۰۱۲؛ صحبتی و همکاران، (۲۰۱۲a-c)). به علاوه در شرایط خاص امکان تعیین زمان دفن‌های مکرر قبلی (در اثر وقایع قبلی) نیز میسر است. نکته اصلی در کاربرد لومینسانس نوری برای سطوح سنگی که از برتری‌های این روش نسبت به مواد رسوبی محسوب می‌شود این است که نمودار لومینسانس-عمق نشان

شده بود، استفاده شد. برای سادگی در ک آزمایشات ونتایج آنها، نام گذاری زیر صورت گرفت:

UV-IRSL₅₀ معادل سیگنال لومینسانس فرابنفش که توسط تحریک نمونه با اشعه مادونقرمز در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد حاصل شده است.

Blue-IRSL₅₀ معادل سیگنال لومینسانس نور آبی که توسط تحریک نمونه با اشعه مادونقرمز در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد حاصل شده است.

UV-IRSL₂₂₅ معادل سیگنال لومینسانس فرابنفش که توسط تحریک نمونه با اشعه مادونقرمز در دمای ۲۲۵ درجه سانتی گراد حاصل شده است.

Blue-IRSL₂₂₅ معادل سیگنال لومینسانس نور آبی که توسط تحریک نمونه با اشعه مادونقرمز در دمای ۲۲۵ درجه سانتی گراد حاصل شده است.

۲-۲-۳-۲. بررسی سیگنال لومینسانس لایه سطحی سنگ‌ها، تعیین سن آخرین زمان نورخوردگی سطح سنگ فتلک

از سطحی‌ترین لایه، اسلامی‌سی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر برش داده شد و به کمک دست به قطعات ریز شکسته شد تا سیگنال لومینسانس طبیعی و سپس پاسخ به یک تست دز ۳۲ گری لایه سطحی (به عمق ۱/۵ میلی‌متر) اندازه‌گیری شود اما سیگنال موردنظر حاصل نشد.

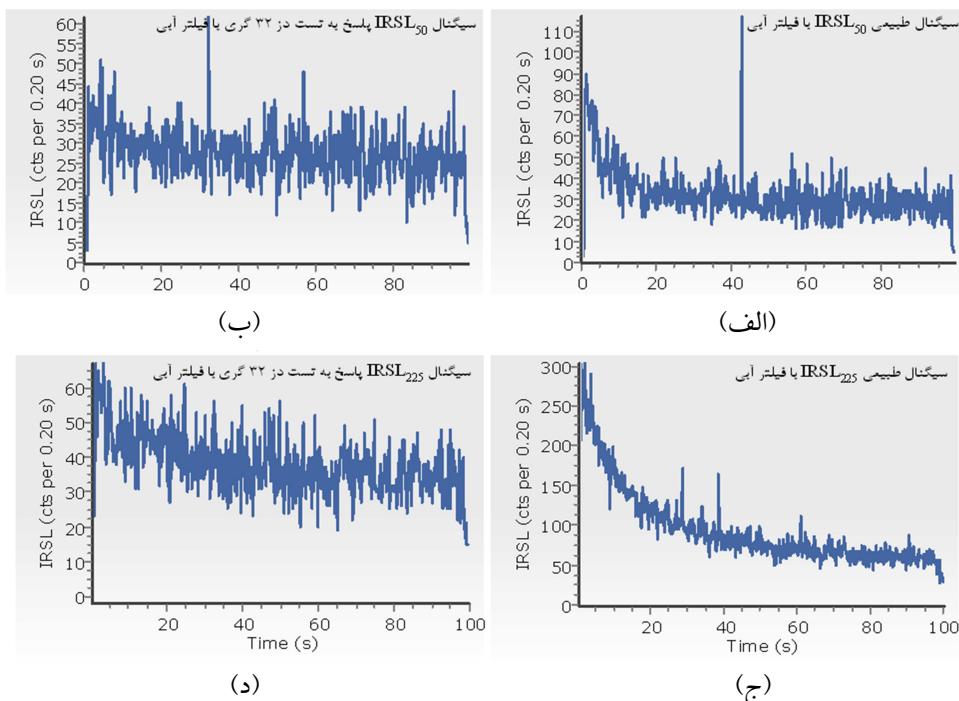
شكل‌های ۴-الف و ب به ترتیب سیگنال طبیعی و سیگنال پاسخ به تست دز ۳۲ گری لومینسانس Blue-IRSL₅₀ و شکل‌های ۴-ج و د به ترتیب سیگنال طبیعی و سیگنال پاسخ به تست دز ۳۲ گری لومینسانس Blue-IRSL₂₂₅ برای نمونه سنگی از فتلک را نشان می‌دهند.

سنگی تحت شرایط کنترل شده و زیر برزنیت ضخیم (به منظور جلوگیری از صفرشدن سیگنال ناشی از در معرض قرار گرفتن نمونه در مقابل نور خورشید) برداشت و داخل کیسه‌های مشکی ضدنور قرار داده به کمک نوار چسب‌های برزنیتی بسته‌بندی و به آزمایشگاه لومینسانس ریزو در کشور دانمارک ارسال شد.

۲-۳-۲. مراحل آزمایشگاهی

۲-۳-۲-۱. اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس

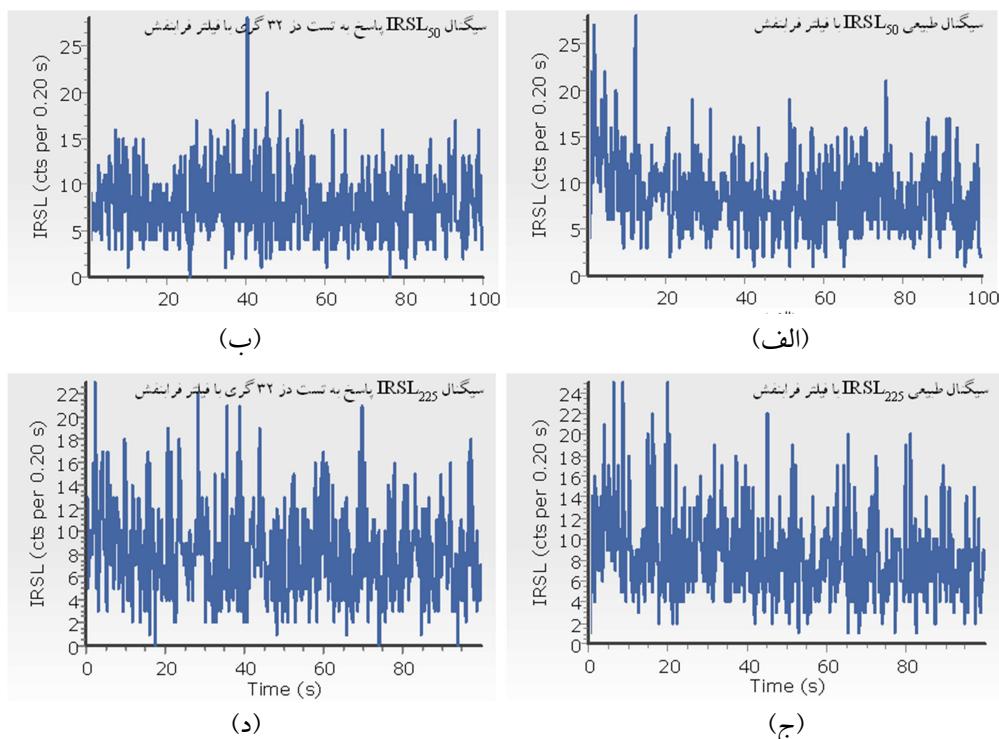
کلیه آزمایشات و اندازه‌گیری‌های سیگنال لومینسانس توسط دستگاه اتوماتیک TL/OSL ریزو (مدل DA-20) و مستقیماً توسط نویسنده اول مقاله انجام شد. دیودهای تابش‌کننده مادونقرمز (با طول موج ۸۵۰ نانومتر و انرژی بالای 300 mw.cm^{-2}) جهت تحریک فلدسپارها و تولید سیگنال لومینسانس تحریک‌شده با مادونقرمز (IRSL) به کار رفت. سپس نور آبی از سیگنال لومینسانس تابش‌شده توسط فیلترهای نوری (ترکیبی از عدسی‌های اسکات شات BG39/BG3) جدا شد. دیودهای تابش‌کننده نور آبی (با طول موج ۴۷۰ نانومتر) جهت تحریک کوارتزها و تولید سیگنال لومینسانس تحریک‌شده با نور آبی (Blue OSL) به کار رفت. پس از آن تابش فرابنفش از سیگنال OSL توسط فیلتر نوری ۷/۵ میلی‌متری Hoya U340 جدا شد. منبع کالیبره شده رادیواکتیو $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ جهت تابش دز مصنوعی در آزمایشگاه استفاده شد (هانسن و همکاران، ۲۰۱۵). به منظور سن‌یابی سنگ‌ها از نور آبی و تابش فرابنفش لومینسانس که توسط دو روش IRSL₅₀، IRSL₂₂₅ تولید



شکل ۴. (الف و ب) به ترتیب سیگنال IRSL طبیعی و سیگنال پاسخ به یک تست دز ۳۲ گری با فیلتر آبی نمونه سنگی فتلک را نشان می‌دهد. (ج و د) اطلاعاتی مشابه شکل‌های الف و ب برای سیگنال IRSL₂₂₅

طبیعی و سیگنال پاسخ به تست دز ۳۲ گری لومنسانس UV-IRSL₂₂₅ برای نمونه سنگی از فتلک را نشان می‌دهند.

شکل‌های ۵-الف و ب به ترتیب سیگنال طبیعی و سیگنال پاسخ به تست دز ۳۲ گری لومنسانس UV-IRSL₅₀ و شکل‌های ۵-ج و د به ترتیب سیگنال



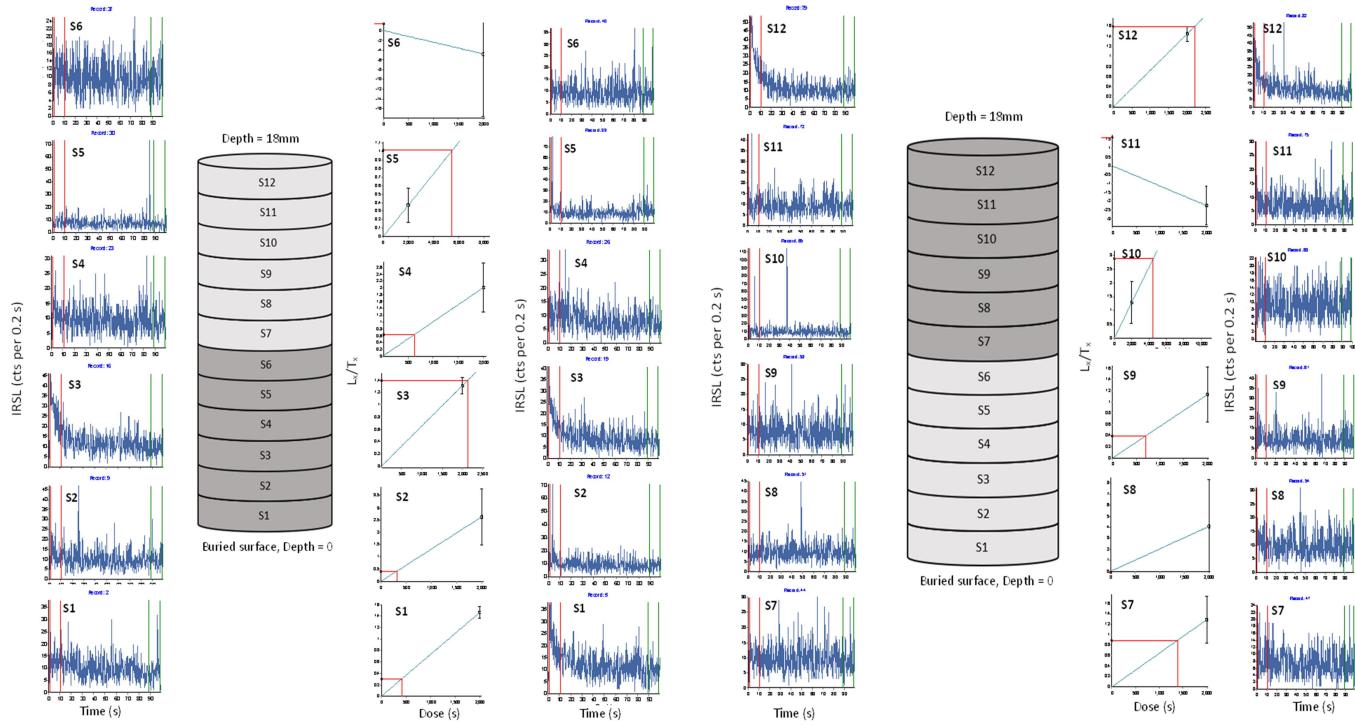
شکل ۵. (الف و ب) به ترتیب سیگنال IRSL طبیعی و سیگنال پاسخ به یک تست دز ۳۲ گری با فیلتر فربخش برای نمونه سنگی فتلک را نشان می‌دهد. (ج و د) اطلاعاتی مشابه شکل‌های الف و ب برای سیگنال IRSL₂₂₅

محاسبه شد تا نمودارهای لومینسانس-عمق را تشکیل دهد. شکل های ۶ و ۷ منحنی های نزولی سیگنال طبیعی، پاسخ نمونه به یک تست دز ۵۰۰ ثانیه معادل ۳۲ گری (نمایش داده شده در سمت راست مغزه) و منحنی های رشد را برای دو مغزه استخراج شده از سنگی از فتلک که سیگنال لومینسانس مادون قرمز (IRSL₅₀) آنها با فیلتر فرابنفش (UV-IRSL₅₀) و با استفاده از مراحل اجرایی جدول ۱ به دست آمد را نشان می دهند. شکل های ۸ و ۹ منحنی های نزولی سیگنال طبیعی، پاسخ تست دز و منحنی های رشد (با اندازه گیری سیگنال طبیعی برای این نمونه به علاوه پاسخ به دو دز ۲۰۰۰ ثانیه (۱۳۰ گری) و دز صفر) را برای دو مغزه استخراج شده از سنگی از فتلک که سیگنال لومینسانس مادون قرمز (IRSL₅₀) آنها با فیلتر نور آبی (Blue-IRSL₅₀) و با استفاده از مراحل اجرایی جدول ۱ به دست آمد را نشان می دهند؛ منحنی های رشد برای سطح در معرض نور خورده ایجاد نشده است. مقادیر L_x/T_x طبیعی برای هر عمق اندازه گیری شد و نمودار لومینسانس بر حسب عمق برای این نمونه از فتلک رسم شد.

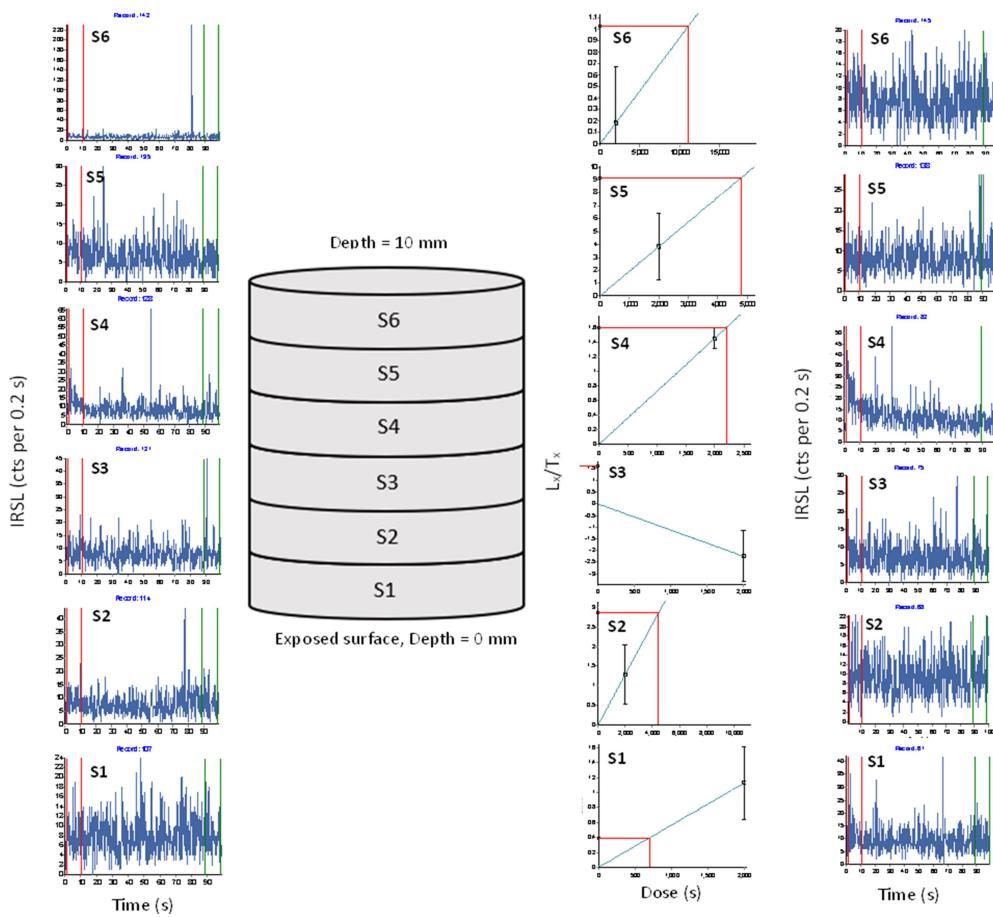
۲-۳-۲. تهیه نمودار لومینسانس-عمق سنگ فتلک در اتاق تاریک و تحت نور قرمز از سطح دفنی و سطح نور خورده نمونه فتلک (با ابعادی به قطر تقریبی ۲۰-۱۵ سانتی متر) مغزه هایی با قطر ۲ سانتی متر و به طول بیشینه ۱۰ سانتی متر به کمک دریل الماسی مجهز به خنک کننده آب از سنگ ها استخراج شد (بر اساس دستورالعمل صحبتی و همکاران، ۲۰۱۷). سپس این مغزه ها به کمک برش دهنده الماسی مجهز به خنک کننده آب و با تیغه کم سرعتی به ۱/۵ ضخامت 0.3 میلی متر به لایه های نازک با ضخامت ۱۲ میلی متر برش داده شدند. از هر مغزه بین ۶ تا ۱۲ لایه نازک (اسلاس) از سطح به عمق برش داده شد. از هر اسلاس جزء کوچکی جدا شده و بدون هیچ گونه عملیات شیمیابی داخل کاپ های مخصوص استیلی به قطر ۱۰ میلی متر قرار داده شد و در داخل سیستم اندازه گیری لومینسانس قرار گرفت. طی مراحل تعریف شده در جدول ۱، سیگنال لومینسانس طبیعی با فیلترهای فرابنفش و آبی، منحنی های رشد و پاسخ نمونه به یک تست دز ۳۲ گری برای هر اسلاس اندازه گیری شد و L_x/T_x طبیعی نیز

جدول ۱. مراحل اجرایی جهت اندازه گیری سیگنال IRSL

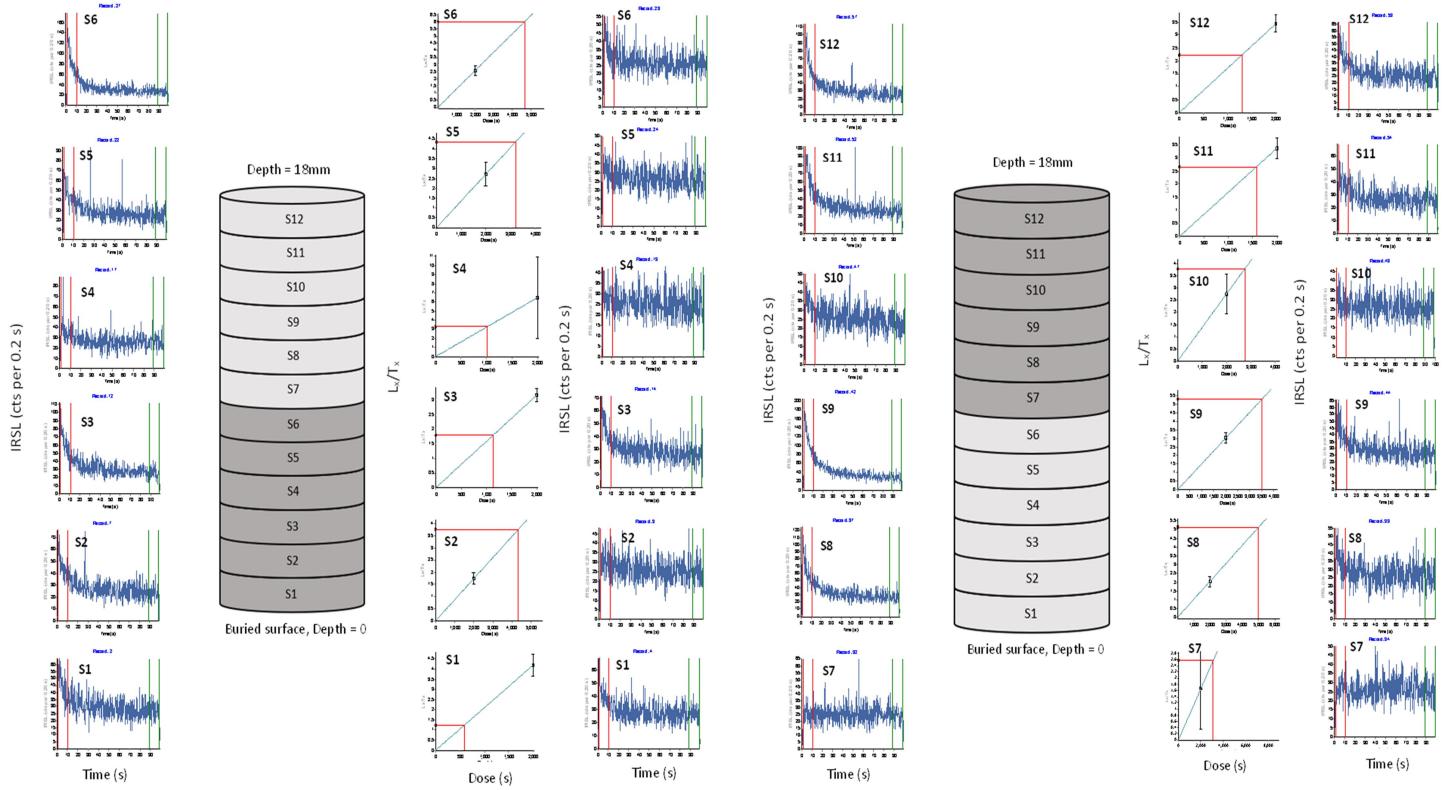
| شماره | مرحله | رفتار |
|-------|--|---|
| ۱ | پیش حرارت | ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰۰ ثانیه |
| ۲ | با فیلتر آبی یا فرابنفش IRSL اندازه گیری سیگنال مادون قرمز | ۱۰۰ IR ₅₀ ثانیه مادون قرمز در ۵۰ درجه سانتی گراد |
| ۳ | با فیلتر آبی یا فرابنفش IRSL اندازه گیری سیگنال مادون قرمز | ۱۰۰ IR ₂₂₅ ثانیه مادون قرمز در ۲۲۵ درجه سانتی گراد |
| ۴ | تست دز | ۳۲ گری |
| ۵ | پیش حرارت | ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰۰ ثانیه |
| ۶ | با فیلتر آبی یا فرابنفش IRSL اندازه گیری سیگنال مادون قرمز | ۱۰۰ IR ₅₀ ثانیه مادون قرمز در ۵۰ درجه سانتی گراد |
| ۷ | با فیلتر آبی یا فرابنفش IRSL اندازه گیری سیگنال مادون قرمز | ۱۰۰ IR ₂₂₅ ثانیه مادون قرمز در ۲۲۵ درجه سانتی گراد |
| ۸ | صفرشدگی با حرارت بالا | ۲۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰۰ ثانیه |
| ۹ | بازگشت به مرحله ۱ | با اعمال دزهای ۱۳۰ گری و صفر گری |



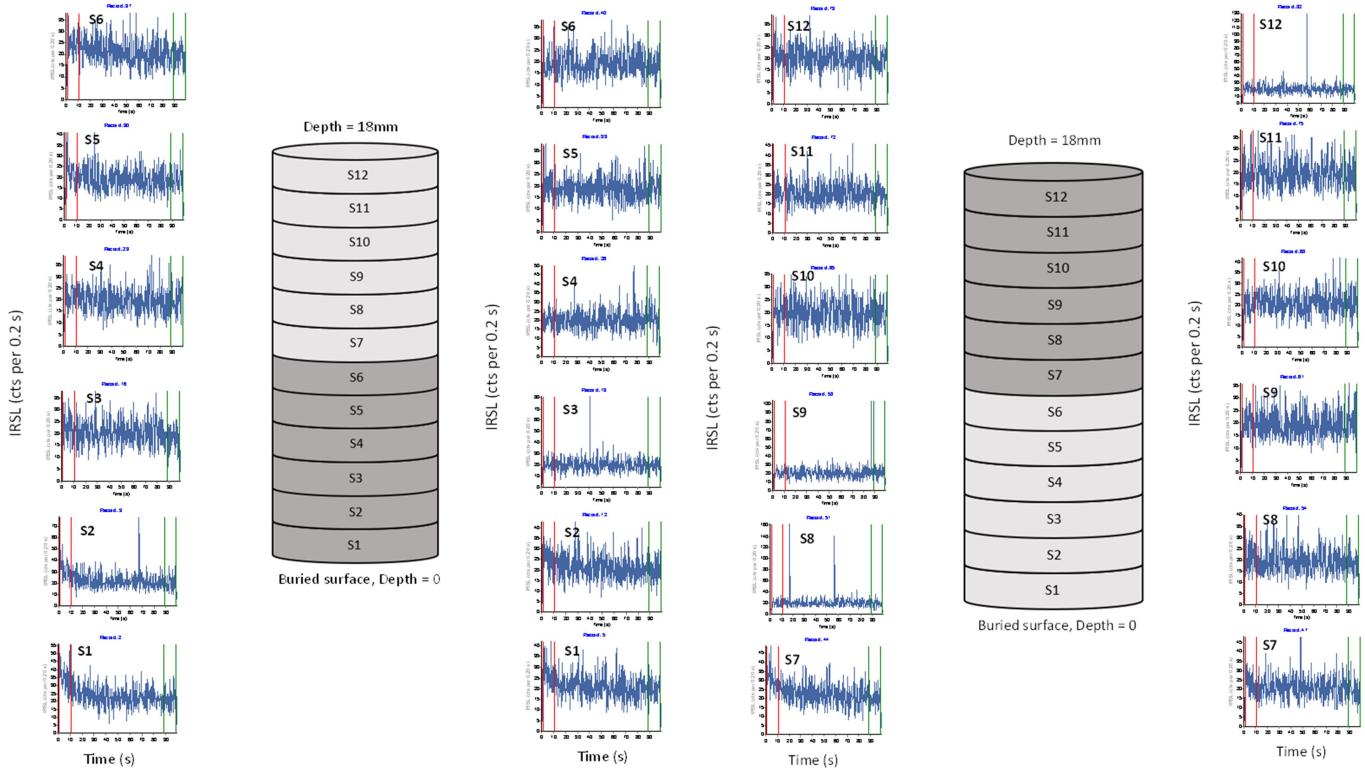
شکل ۶. منحنی های نزولی سیگنال طبیعی (فیلتر فرایندهش)، پاسخ تست دز و منحنی های رشد را برای یک مغزه از سطح دفنی نمونه فتلک نشان می دهد.



شکل ۷. منحنی های نزولی سیگنال طبیعی (فیلتر فرایندهش)، تست دز و منحنی های رشد را برای یک مغزه از سطح در معرض نور نمونه فتلک نشان می دهد.



شکل ۸. منحنی های نزولی سیگنال طبیعی (فیلتر آبی)، پاسخ تست دز و منحنی های رشد را برای یک مغزه از سطح دفنی نمونه فتلک نشان می دهد.

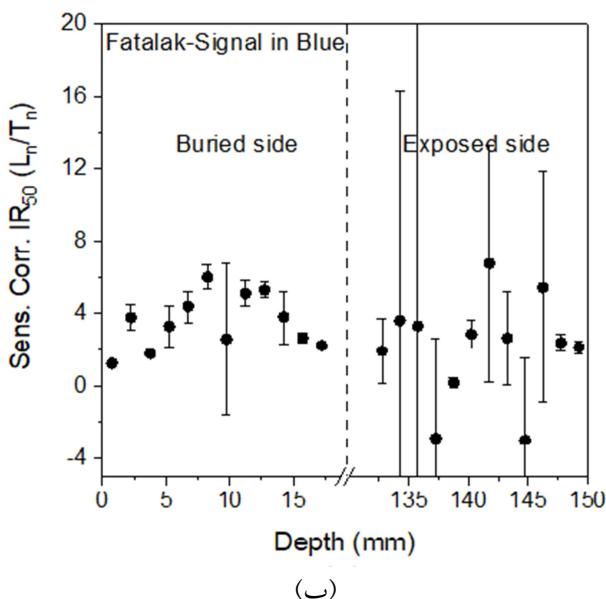


شکل ۹. منحنی های نزولی سیگنال طبیعی (فیلتر آبی)، پاسخ تست دز و منحنی های رشد را برای یک مغزه از سطح نور خورده نمونه فتلک نشان می دهد.

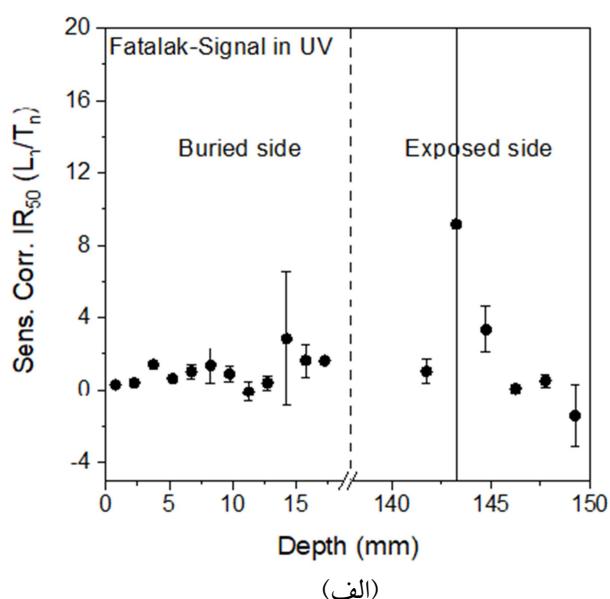
۳. تهیه نمودار لومنیسانس-عمق سنگ هنری اسپانیا
یک نمونه سنگی از یک سایت باستان‌شناسی در اسپانیا به کمک روش سن یابی لومنیسانس سطوح سنگی مورد بررسی جداگانه قرار داده شد. یک مغزه از سطح دفی (شکل ۱۱) و یک مغزه از سطح نورخورده (شکل ۱۲) این نمونه سنگی تهیه و ۱۲ اسلاسیس برای هر مغزه جدا شد تا سیگنال‌های لومنیسانس آنها اندازه‌گیری شود. سیگنال IRSL₅₀ با فیلتر نور آبی قابل توجهی برای این نمونه سنگی مشاهده شد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منحنی‌های نزولی سیگنال آبی (IRSL) طبیعی و پاسخ به تست دز را به ترتیب از سطح دفی و نورخورده نمونه اسپانیا نشان می‌دهند. منحنی‌های رشد تنها برای لایه سطحی (لایه اول) و آخرین لایه عمقی (لایه ۱۲) نشان داده شده است.

شکل ۱۳ نمودارهای لومنیسانس آبی-عمق حاصل از اندازه‌گیری سیگنال طبیعی IRSL₅₀ با فیلتر برای دو وجه دفی و نورخورده از نمونه اسپانیا را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نمودارهای لومنیسانس عمق برای دو وجه دفی و نورخورده از نمونه فتلک حاصل از اندازه‌گیری سیگنال طبیعی IRSL با فیلتر فرابنفش (الف) و IRSL با فیلتر آبی (ب) را نشان می‌دهند. این شکل‌ها نمایانگر آن است که سیگنال مناسبی در سایت فتلک برای این نمونه‌ها دریافت نشد. نتایج مشابهی برای سیگنال IRSL₂₂₅ حاصل شد که در این مقاله نشان داده نشده است. در این روش انتظار ما داشتن نموداری مشابه نمودار صحبتی و همکاران ۲۰۱۱ بود (مشابه شکل ۲) که در آن سیگنال اسلاسیس سطحی تقریباً صفر و سپس با عمق افزایش می‌یابد. اما در نمودار بدست آمده برای نمونه فتلک (شکل ۱۰) تفاوت مشخصی بین سیگنال لومنیسانس حاصل از اسلاسیس سطحی و عمقی وجود ندارد. بهمنظور تحلیل این که آیا این مهم ناشی از خصلت نمونه‌های برداشت شده از ایران می‌باشد یا ایرادی در دستگاه یا در مراحل آزمایش وجود داشته است، تصمیم گرفته شد تا مشابه این آزمایشات برای سنگی از کشور دیگر انجام شود.

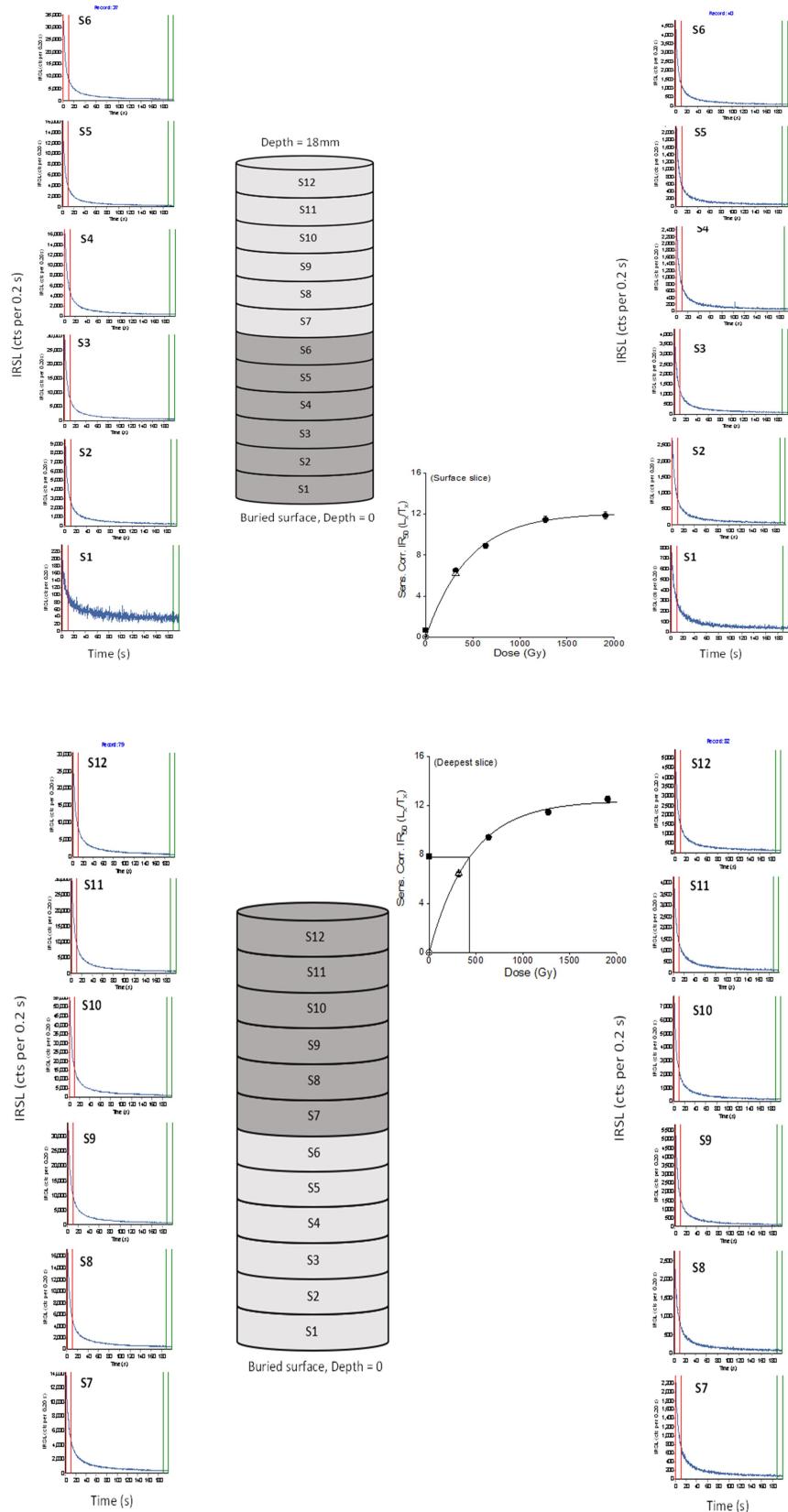


(ب)

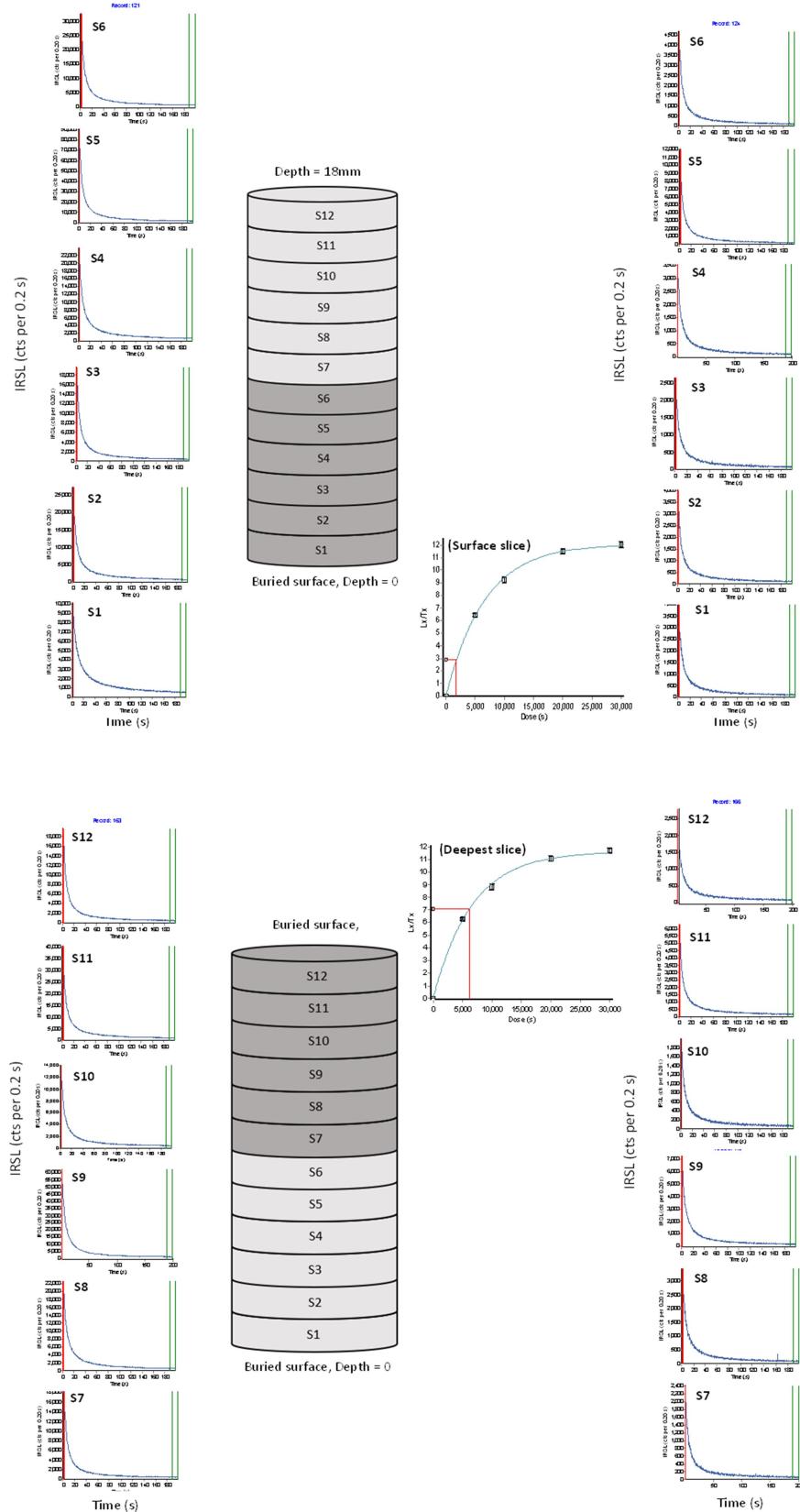


(الف)

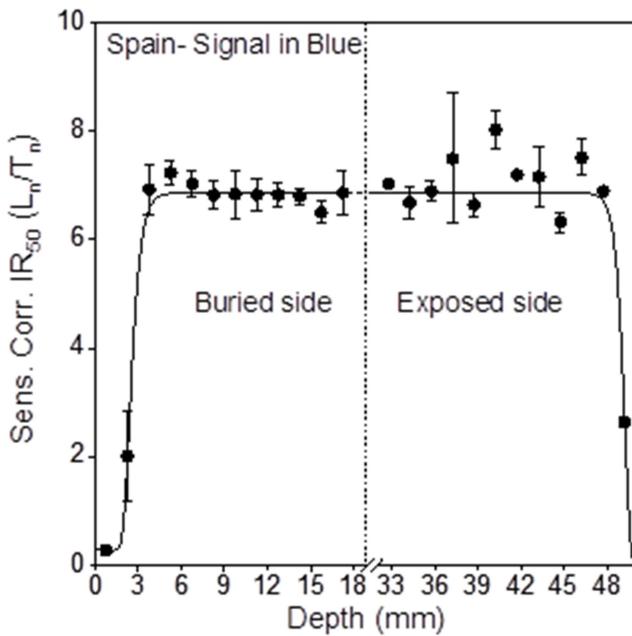
شکل ۱۰. نمودارهای لومنیسانس عمق حاصل از اندازه‌گیری سیگنال طبیعی IRSL با فیلتر فرابنفش (الف) و فیلتر آبی (ب) برای دو وجه دفی و نورخورده از نمونه فتلک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. منحنی‌های نزولی سیگنال طبیعی (سمت چپ مغزه) و پاسخ تست دز (سمت راست مغزه) برای یک مغزه از سطح دفنی نمونه اسپانیا را نشان می‌دهد. منحنی رشد تنها برای اولین و آخرین اسلاپس اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱۲. منحنی های نزولی سیگنال طبیعی (سمت چپ مغزه) و پاسخ تست دز (سمت راست مغزه) برای یک مغزه از سطح نورخورد نمونه اسپانیا را نشان می دهد. منحنی رشد تنها برای اولین و آخرین اسلایس اندازه گیری شده است.



شکل ۱۳. نمودارهای لومینسانس عمق حاصل از اندازه‌گیری سیگنال طبیعی IRSL با فیلتر آبی برای دو وجه دفنی و نورخورده از نمونه اسپانیا را نشان می‌دهد.

شدت سیگنال فلدسپارها کمتر وابسته به منع زمین‌شناسی و تاریخ فرسایش سنگ می‌باشد، لذا نمی‌توان نداشتمنع سیگنال مناسب برای نمونه‌های سنگ‌های فتلک را به آسانی تحلیل کرد. شاید این امر ناشی از ذات سنگ‌های فتلک باشد و نمونه‌های این منطقه توانایی تولید سیگنال IRSL مناسب ندارند.

با توجه به این که با رفتن به عمق، میزان صفرشدن کاهش و شدت سیگنال لومینسانس افزایش می‌یابد و همچنین سیگنال لومینسانس توسط درصد اندکی (تقرباً ۱۰ درصد) از دانه‌های ذی‌زمترهای داخل اسلاسیس (عمدتاً کوارتز و فلدسپار) ایجاد می‌شود، این امکان وجود دارد که اسلاسیس‌های متفاوت سیگنال‌های (پاسخ به ذی‌یکسان) با شدت و خصوصیات متفاوت ایجاد کنند. لذا پتانسیل کلیه اسلاسیس‌ها جهت تولید سیگنال (شکل‌های ۸ و ۹) و نهایتاً جهت تهیه نمودار بررسی و نمودار لومینسانس-عمق تهیه شد (شکل ۱۰). متأسفانه این نمودارها بی‌نموداری که توسط صحبتی و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۵ ارائه شد (شکل‌های ۲ و ۳) همخوانی نداشت.

به منظور تحلیل این که آیا این مهم ناشی از خصلت نمونه‌های برداشت‌شده از ایران می‌باشد یا ایرادی در

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پیرو موقیت صحبتی و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۵ در سن‌یابی سنگ‌های باستان‌شناسی، تصمیم گرفته شد تا آن روش جهت سن‌یابی سنگ‌های واریزه‌ای فتلک مورد استفاده قرار گیرد. لذا نمونه‌های برداشت شده از منطقه فتلک به ریزو منتقل شد و مغزه‌هایی از نمونه‌های سنگی جدا و اسلاسیس‌هایی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر تهیه شد. اسلاسیس‌های سطحی استخراج شده از سنگ‌های برداشت‌شده از فتلک در منطقه رودبار-منجیل با نور مادون‌قرمز در دماهای ۵۰ و ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد (IRSL₂₂₅) و (IRSL₅₀) تحریک شد، ولی برخلاف انتظار سیگنال لومینسانس آبی طبیعی قوی و هیچ سیگنال پاسخ به تست دز ۳۲ گری قابل توجهی برای این نمونه سنگی تولید نشد (شکل ۴). علاوه‌بر این نمونه سنگی فتلک توانایی تولید سیگنال لومینسانس فرابنفس را نیز نداشت (شکل ۵).

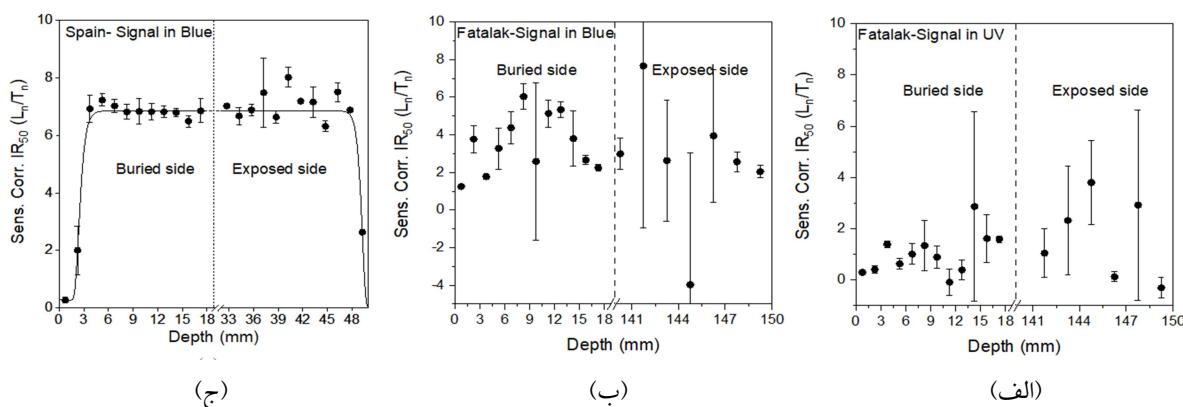
لازم به ذکر است با توجه به مطالعات پیشین توسط فتاحی و همکاران (برای مثال فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ و فتاحی، ۲۰۱۵)، تقریباً تمام نمونه‌های روسی برداشت‌شده از ایران تولید سیگنال IRSL کرده‌اند، و

ایران نمودار مناسب جهت سن‌بایبی را ایجاد نکرده است. در حالی که نمونه اسپانیا (شکل ۱۳) مشابه نمودار موردناظار (شکل‌های ۲ و ۳) را ایجاد کرده و لذا مناسب سن‌بایبی می‌باشد. بهمنظور مقایسه آسان؛ نمودارهای دفني و نورخورده حاصل از دو نمونه فتلک و اسپانیا در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

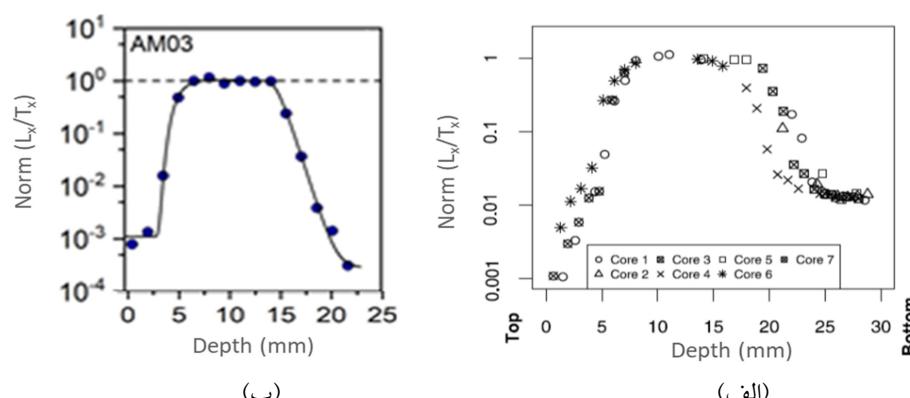
در ادامه نمودارهای این پژوهش با نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین از جمله نتایج منتشرشده توسط آگبی و همکاران (۲۰۲۱) برای نمونه‌های سنگی دفني در ایتالیا (شکل ۱۵-الف) و سوزا و همکاران (۲۰۱۹) در سواحل دانمارک (شکل ۱۵-ب) مقایسه شد. در حالی که نمودار لومنیسانس عمق نمونه دفني اسپانیا (شکل ۱۴ ج) مشابه نمودارهای نمونه‌های ایتالیا و دانمارک (شکل ۱۵) می‌باشد نمونه فتلک (شکل‌های ۱۴-الف و ب) هیچ گونه تشابهی با این نمودارها ندارد.

دستگاه یا در مراحل آزمایش وجود داشته است، مشابه این آزمایشات برای سنگی از کشور اسپانیا انجام شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). مقایسه شکل‌های مربوط به سیگنال‌های نمونه‌های دفني (شکل‌های ۸ و ۱۱) و همچنین مقایسه شکل‌های مربوط به سیگنال‌های نمونه‌های نورخورده (شکل‌های ۹ و ۱۲) بهوضوح نشان می‌دهد که اولاً نمونه‌های فتلک تولید سیگنال مناسب جهت سن‌بایبی نکرده است در حالی که نمونه اسپانیا سیگنال‌های قوی را نشان می‌دهد؛ دوماً در نمونه اسپانیا همان‌طور که از مدل انتظار می‌رود شدت سیگنال حاصل از اسلاسیس‌ها از سطح به عمق افزایش می‌یابد در حالی که چنین پدیده‌ای در اسلاسیس‌های ایران مشاهده نمی‌شود.

مقایسه نمودارهای لومنیسانس عمق برای نمونه فتلک (شکل ۱۰) با مدل صحبتی و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۵ (شکل‌های ۲ و ۳) نمایانگر آن است که نمونه



شکل ۱۴. مقایسه نمودارهای لومنیسانس عمق حاصل از اندازه‌گیری سیگنال طبیعی IRSL برای دو وجه دفني و نورخورده از نمونه‌های فتلک (الف و ب) و اسپانیا (ج) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. نمودارهای لومنیسانس عمق سیگنال IRSL برگرفته از آگبی و همکاران (۲۰۲۱) (الف) و سوزا و همکاران (۲۰۱۹) (ب) به عنوان نمونه‌هایی که روش لومنیسانس سطوح سنگی با موفقیت در موردشان عمل کرده است و بهمنظور مقایسه به دو نمونه فتلک و اسپانیا.

اقامت نویسنده اول تشکر می‌نمایند. همچنین نویسنده‌گان اول و دوم از همکاری‌های صمیمانه سرکار خانم دکتر حمیده امینی، جناب آقایان مهندس مهدی ترابی و سید لطیف محمدی قدردانی می‌کنند. نویسنده‌گان از آزمایشگاه ریزو جهت تأمین امکانات آزمایشگاهی کمال تشکر را دارند.

مراجع

سایت سازمان زمین شناسی و اکتشافات کشوری.
<https://gsi.ir/fa>
 فتاحی، م.، ۱۴۰۰، بررسی عوامل مؤثر در نمونه‌برداری
 جهت سن‌یابی به روش لومینسانس نوری، مجله
 ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۳)، ۴۶-۲۷.

- Ageby, L., Angelucci, D. E., Brill, D., Carrer, F., Rades, E. F., Rethemeyer, J., Brückner, H. and Klasen, N, 2021, Rock surface IRSL dating of buried cobbles from an alpine dry-stone structure in Val di Sole, Italy. Quaternary Geochronology. Volume 66, October 2021, 101212.<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2021.101212>.
- Berberian, M. and Walker, R., 2010, The Rudbar Mw 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western ‘High-Alborz’, Iran. *Geophys. J. Int.*
- Chapot, M. S., Sohbati, R., Murray, A. S., Pederson, J. L. and Rittenour, T. M. 2012, “Constraining the Age of Rock Art by Dating a Rockfall Event Using Sediment and Rock-Surface Luminescence Dating Techniques.” *Quaternary Geochronology* 13, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.08.005>.
- Fattah, M., Walker, R. T., Khatib, M. M., Dolati, A. and Bahroudi, A., 2007, Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 168(2), 691–709. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x>.
- Fattah, M., Nazari, H., Bateman, M. D., Meyer, B., Sébrier, M., Talebian, M., Dortz, K. L., Foroutan, M., Givi, F. A. and Ghorashi, M., 2010., Refining the OSL age of the last earthquake on the Dheshir fault, Central Iran. *Quaternary Geochronology*, 5(2–3), 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.04.005>.
- Fattah, M., Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A. and Rasheedi, A., 2014., Late

از این مهم می‌توان نتیجه گرفت که سنگ‌های برداشت شده از فلک با روش ارائه شده توسط صحبتی و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۵ قابل سن‌یابی نمی‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از اسپانیا با ایتالیا و دانمارک نشان داد که کلیه مراحل نمونه‌برداری و آزمایشات به صورت صحیح انجام شده است اما مشکل اصلی شاید در ذات و حساسیت نمونه‌های کوارتز و فلدسپار برداشت شده از منطقه روبار-منجل باشد.

تشکر و قدردانی

نویسنده‌گان اول و دوم از بنیاد ملی علوم ایران (پژوهه شماره ۹۶۰۲۲۲۵) جهت تأمین هزینه‌های نمونه‌برداری، ارسال نمونه‌ها به دانمارک و کلیه هزینه‌های سفر و

Quaternary active faulting and landscape evolution in relation to the Gowk Fault in the South Golbaf Basin, S.E. Iran. *Geomorphology*, 204, 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.017>.

Fattah, M., 2015, OSL dating of the Miam Qanat (KĀRIZ) system in NE Iran. *Journal of Archaeological Science* Volume 59, July 2015, Pages 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.04.006>.

Greibich, S., Glasmacher, U. A. and Wagner, G. A., 2005, Optical dating of granitic stone surfaces. *Archaeometry*, 47, 645–665.

Habermann, J., Schilles, T., Kalchgruber, R. and Wagner, G. A., 2000, Steps towards surface dating using luminescence. *Radiation Measurements*, 32, 847–851.

Hansen, V., Murray, A. S., Buylaert, L. P., Yeo, E.Y. and Thomsen, K., 2015, A New Irradiated Quartz for Beta Source Calibration. *Radiation Measurements* 81 (October): 123–127. <https://doi.org/10.1016/J.RADMEAS.2015.02.017>.

Laskaris, N. and Liritzis, I., 2011, A new mathematical approximation of sunlight attenuation in rocks for surface luminescence dating. *Journal of Luminescence*, 131, 1874–1884.

Liritzis, I., 1994, A new dating method by thermoluminescence of carved megalithic stone building. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences-Série II*, 319, 603–610.

Liritzis, I., Kitis, G., Galloway, R. B., Vafiadou,

- A., Tsirliganis, N. C. and Polymeris, G., 2008, Probing luminescence dating of archaeologically significant carved rock types. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 8, 61–79.
- Liritzis, I., Zacharias, N. and Polymeris, G., 2010, Surface luminescence dating of 'Dragon Houses' and Armena Gate at Styra (Euboea, Greece). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 10, 65–81.
- Liritzis, I., 2011, Surface dating by luminescence: an overview. *Geochronometria*, 38, 292–302.
- McCALPIN, J. P., 2009. Paleoseismology.
- Morgenstein, M. E., Luo, S., Ku, T. L. and Feathers, J., 2003, Uranium-series and luminescence dating of volcanic lithic artefacts. *Archaeometry*, 45, 503–518.
- Polikreti, K., Michael, C. T. and Maniatis, Y., 2003, Thermoluminescence characteristics of marble and dating of freshly excavated marble objects. *Radiation Measurements*, 37, 87–94.
- Polikreti, K., 2007, Detection of ancient marble forgery: techniques and limitations. *Archaeometry*, 49, 603–619.
- Sohbati, R., Murray, A. S., Jain, M., Buylaert, J. P. and Thomsen, K. J. 2011, "Investigating the Resetting of OSL Signals in Rock Surfaces." *Geochronometria* 38 (3), 249–258. <https://doi.org/10.2478/s13386-011-0029-2>.
- Sohbati, R., Murray, A. S., Chapot, M. S., Jain, M. and Pederson, J., 2012a, Optically stimulated luminescence (OSL) as a chronometer for surface exposure dating. *Journal of Geophysical Research*, 117, B09202.
- Sohbati, R., Murray, A. S., Buylaert, J.-P., Almeida, N. A. C. and Cunha, P. P., 2012b, Optically stimulated luminescence (OSL) dating of quartzite cobbles from the Tapada do Montinho archaeological site (east-central Portugal). *Boreas*, 41, 452–462
- Sohbati, R., Jain, M. and Murray, A., 2012c, Surface exposure dating of non-terrestrial bodies using optically stimulated luminescence: a new method. *Icarus*, 221, 160–166.
- Sohbati, R., Murray, A. S., Porat, N., Jain, M. and Avner, U., 2015, Age of a Prehistoric 'Rodedian' Cult Site Constrained by Sediment and Rock Surface Luminescence Dating Techniques, *Quaternary Geochronology* 30, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.09.002>.
- Sohbati, R., Murray, A. S., Lindvold, L., Buylaert, J. P. and Jain, M., 2017, Optimization of laboratory illumination in optical dating, *Quaternary Geochronology*, 39, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.02.010>.
- Souza, P. E., Sohbati, R., Murray, A. S., Kroon, A., Clemmensen, L. B., Hede, M. U. and Nielsen, L. 2019, Luminescence dating of buried cobble surfaces from sandy beach ridges: a case study from Denmark *Boreas*, 48 (2019), 841–855, [10.1111/bor.12402](https://doi.org/10.1111/bor.12402).
- Vafiadou, A., Murray, A. S. and Liritzis, I., 2007, Optically stimulated luminescence (OSL) dating investigations of rock and underlying soil from three case studies. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1659–1669.
- Zare, M., 1993, Macrozonation of Landslides for the Manjil, Iran 1990 Earthquake. Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, June 1–4, 1993, Paper No. 3.23.

Investigating the Potential of Infrared Stimulated Luminescence for Dating the Debris rocks of Fatalak Landslide

Karimi Moayed, N.^{1*}, Fattah, M.², Sohbati, R.³, Haghshenas, E.⁴, Tajik, V.⁵, Shoaei, Z.⁶ and Murray, A.⁷

1. Ph.D. Student, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Researcher, Risø Campus, Faculty of Physics, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark

4. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

5. Expert, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

6. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education And Extention Organization, Tehran, Iran

7. Professor, Nordic Laboratory for Luminescence Dating, Faculty of Geoscience, Aarhus University, Roskilde, Denmark

(Received: 24 Jan 2022, Accepted: 19 April 2022)

Summary

Over the last decade, extensive studies have been done to date rock surfaces using optical luminescence signals, and recently a model has been proposed showing that shows the rock surfaces using infrared-stimulated luminescence signal have been successfully dated. This method is based on the resetting of luminescence signal with depth into rock surfaces. When a rock surface is first exposed to sunlight, the luminescence signal that has been stored over time in its constituent minerals (particularly quartz and feldspar) starts to decrease. The longer the rock is exposed to sunlight, the depth of light penetration into the rock also increases and the luminescence signal in the rock decreases, however, the rate of luminescence resetting reduces with depth because of the attenuation of daylight into the rock surface. This differential change in bleaching rate with depth leads to the development of a sigmoidal shape luminescence-depth profile. Such profile provides an internal check on an inadequate daylight exposure, and therefore an incomplete resetting of the luminescence signal and allow us to identify the sample that are most likely to provide reliable OSL age. In this study, we investigated the potential of this method to date debris rocks of Fatalak landslide which were induced by Rudbar-Manjil earthquake in north of Iran in 1990. Cores of ~10 cm long and 1 cm diameter were extracted from the buried and exposed sides of the rock samples using a water-cooled, diamond-tipped drill. The cores were then cut into ~1.5 mm thick slices. The slices were gently broken into small chips and mounted in 10-mm diameter stainless steel cups for natural luminescence signal and dose response measurements. All sub-samples from each slice were stimulated by infrared radiation and the blue and ultraviolet luminescence signals were measured. To determine whether the luminescence signals at the buried surface of the rock were sufficiently bleached before the earthquake event, we measured the natural sensitivity-corrected IR_{50} and $pIRIR_{225}$ signals (L_n/T_n) with depth into the core and the luminescence-depth profiles were plotted. Unexpectedly, weak or no IR_{50} and $pIRIR_{225}$ signals and no suitable luminescence-depth profiles were observed. According to the experience of the second author, almost all sediment samples taken from Iran have generated IRSL signal, so it is necessary to investigate the cause of the lack of a suitable IRSL signal for rock samples in Fatalak. Due to the fact that with increasing depth, the bleaching rate decreases and the luminescence signal intensity increases and also the luminescence signal is generated by a small percentage (approximately 10%) of the grains of the dosimeter grains (mainly quartz and feldspar), it is possible to produce signals (response to the same dose) with different intensities and properties for different slices. Therefore, the potential of all slices to produce the signal and finally to prepare the luminescence-depth profile were investigated. Unfortunately, this profile did not match the profiles provided by previous studies.

In order to analyze whether this observation is due to the nature of the samples taken from Iran or there was a defect in the luminescence signal measuring device or in the experiment process, we performed similar tests for a rock surface which was taken from another site. The same process was then carried out for two rock art paintings from Spain, which showed acceptable signals and the IR_{50} depth profile showed a sigmoidal shape where the luminescence signal was almost reset at the surface slice but increased with depth until it reached saturation, as expected from the model. Then, the luminescence-depth profiles from Fatalak and Spain sites were compared with two previous successful studies in Italy and Denmark. The IRSL luminescence-depth profile for rock art sample in Spain was in a good agreement with that of the two burial samples from Italy and Denmark. However, no such correlation was observed between the profiles of the Fatalak sample and the profiles of the two Italian and Danish samples. As the profiles derived for Fatalak sample were not consistent with the model and none of the previous studies, we could not determine the time of the landslide event in the conventional method.

Keywords: Rock surface dating, IRSL, Luminescence-depth profile, Rudbar-Manjil earthquake, Fatalak landslide.

* Corresponding author:

nasrkarimi@ut.ac.ir