

بررسی امکان یافتن راه حل برای سن یابی کوارتزهای رسوبی تولیدکننده سیگنال لومینسانس ضعیف

ح. امینی^۱، م. فتاحی^{۲*}

^۱ استادیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران (hiamini@ut.ac.ir)

^۲ دانشیار گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران (mfattahi@ut.ac.ir)

چکیده

سن یابی به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور، سن آخرین زمان نور خوردگی رسوبات را تخمین می‌زند و امروزه به‌عنوان روشی مناسب، جهت تعیین سن رسوبات دوران کواترنری بکار می‌رود. این تعیین سن با استفاده از دانه‌های کوارتز نمونه‌های رسوبی انجام می‌شود. دو فاکتور اساسی در تخمین سن مطلق رسوبات، به روش لومینسانس تحریک‌شده با نور، دُز معادل دُز طبیعی (De) و دُز سالانه (Da) می‌باشند. جهت برآورد De، از سیگنال لومینسانس حاصل از تحریک نور استفاده می‌شود. برای اکثر دانه‌های کوارتز رسوبات، این سیگنال به‌سرعت و طی چند ثانیه به شکل نمایی کاهش می‌یابد که در این زمان، میزان فوتون‌های تولیدشده از بیشینه مقدار برخوردار است. قسمت اولیه سیگنال به مؤلفه سریع شهرت یافته است و جهت برآورد De به کار می‌رود. قسمت‌های بعدی سیگنال به آرامی کاهش می‌یابند و برای سن یابی مناسب نبوده و اثر آنها حذف می‌شود. لذا شدت و شکل منحنی سیگنال لومینسانس تأثیری اساسی در دقت اندازه‌گیری De و در نتیجه دقت سن حاصله دارد. در زمان سن یابی برخی از نمونه‌های برداشت‌شده از مناطقی از ایران، خاصه نمونه‌های جوان، شدت سیگنال لومینسانس کوارتز بسیار کم و سن یابی غیرممکن یا با خطای بسیار مواجه است. به‌منظور حل این مشکل تحقیقی جامع در این مورد انجام شد که این مقاله ارائه‌دهنده بخشی از نتایج آن است. نتایج نشان دادند که با افزایش دُز آزمایشگاهی و شدت نور تحریک‌کننده کوارتز، علاوه بر دستیابی به سیگنال لومینسانس نوری قوی‌تر، منحنی رشد دقیق‌تر، و بازیابی صحیحی از دُز مشخص آزمایشگاهی، پتانسیل سن یابی دانه‌های کوارتز جوان و یا با حساسیت کم فراهم می‌شود.

کلمات کلیدی: لومینسانس تحریک‌شده با نور، شکل سیگنال، تغییرات دما، شدت تحریک با نور، میزان دُز.

Investigating the possibility of finding a solution for dating the sedimentary quartzes producing a weak luminescence signal

Extended abstract

Optically stimulated luminescence (OSL) method estimates the age of the last exposure time of sediments, OSL has been developed as a dating tool for sediments and nowadays it is used as a suitable method to determine the age of Quaternary sediments. This age determination is done using quartz grains of sedimentary samples. The two basic factors in estimating the OSL age of sediments are the dose equivalent to the natural dose (D_e) and the annual dose (D_a). In order to estimate the D_e , the luminescence signal obtained from light stimulation of quartz grains is used. For most sedimentary quartz, during exposure to the stimulating light (visible) the OSL signal is seen to decay to a low level as a function of illumination time, (normally termed the OSL decay curve). In general, the decay is usually non-exponential, typically exhibiting a long "tail" to the decay at long illumination time. This initial part of the signal has a maximum value, and is known as the fast component and is used to estimate the D_e . The next parts of the signal slowly decrease and are not suitable for dating and their effect is removed. Therefore, the intensity and shape of the luminescence signal decay curve have a fundamental effect on the accuracy of measuring the equivalent dose and, as a result, the accuracy of the resulting age.

The weakness of the sensitivity of quartz sediment grains in Iran to produce the OSL signal and also the bad behavior of the resulting luminescence signal to produce the signal growth curve (in terms of dose) has been repeatedly seen by the second author and has sometimes been published (Fattahi 2015, Appendix; Fattahi et al., 2019 Figure 3). As, this weakness can cause the inability of the luminescence method to determine the reliable age of young samples, investigating and solving this problem of quartz OSL characteristic in Iran is of great importance. However, in many studies, feldspar signal has been used due to the lack of quartz or weak sensitivity or bad behavior of quartz signal (Fattahi et al., 2007).

In order to solve this problem, comprehensive research was conducted and this article presents part of its results. In this study, following extracting quartz grains from 3 kinds of sedimentary quartz their luminescence characteristics were investigated. The result of designed experiments showed that by increasing the intensity of the stimulating source (blue-470 nm) while sample is hold at 125°C, the intensity and the decay rate of the OSL decay curves increase. It also showed that by increasing the laboratory dose a more accurate growth curve (luminescence vs dose) can be created and the specified laboratory dose can be restored. These finding confirm the finding of previous workers on the quartz OSL characteristic from other part of the world and will provide the potential for dating young samples.

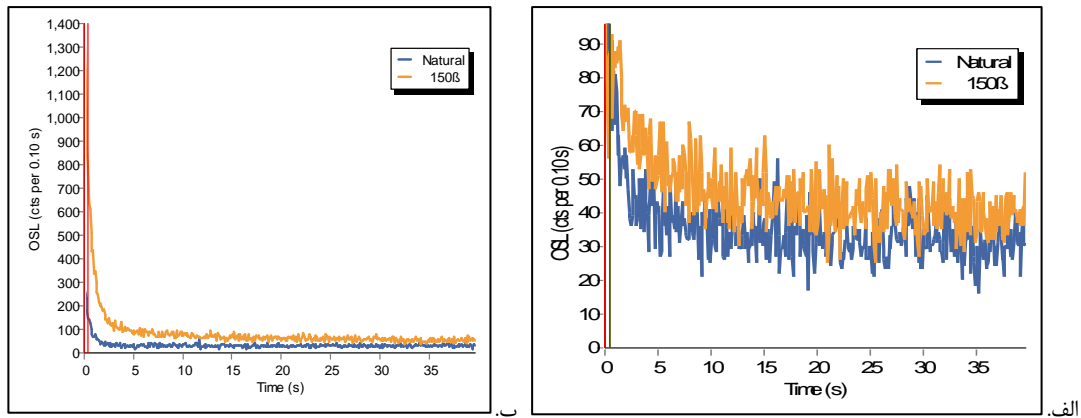
Keywords; Optically Stimulated luminescence, Signal, Temperature, stimulated light Power, lab dose

۱. مقدمه

طی سال‌های اخیر از سیگنال لومینسانس تحریک شده با نور جهت سن‌یابی رسوبات بادی و آبی در تحقیقات و مطالعات مختلفی از جمله دیرینه‌زلزله‌شناسی [به‌طور مثال، فتاحی و همکاران (۲۰۰۷)، امینی و همکاران (۲۰۱۲)، جمالی و همکاران (۲۰۰۹)، قویگلی و همکاران (۲۰۱۱)، ریتز و همکاران (۲۰۱۲)، نظری و همکاران (۲۰۱۴)، سلیمانی آزاد و همکاران (۲۰۱۵) و ترابی و همکاران (۲۰۲۰)]، دیرینه اقلیم‌شناسی [خسروی و همکاران (۲۰۲۰)] و دیرینه باستان‌شناسی [فتاحی و شریف، ۲۰۱۰]، با موفقیت استفاده شده است. به‌طور معمول، این سیگنال به شکل نمایی کاهشی است و قسمت اول آن سریعاً ظرف چند ثانیه کاهش می‌یابد (شکل ۱). شکل ۱ دو مثال از سیگنال‌های مربوط به دو نمونه برداشت‌شده از منطقه ایران که دانه‌هایی از آنها در این بررسی مورد استفاده قرار گرفتند را نشان می‌دهد. در بسیاری مطالعات به دلیل کمبود کوارتز و یا ضعف حساسیت و یا بדרفتاری سیگنال کوارتز، از سیگنال فلدسپار استفاده شده است (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷). اما به دلیل ناپایداری سیگنال لومینسانس فلدسپار سن-یابی آن پیچیده‌تر از کوارتز است و در صورت امکان، متخصصین ترجیح می‌دهند از سیگنال لومینسانس کوارتز استفاده کنند (فتاحی، ۲۰۱۵). تجربیات چند سال اخیر نشان داده‌اند که خصوصیات لومینسانس کوارتزهای استرالیا بسیار بهتر از کوارتزهای ایران است. همچنین، در مطالعه‌ای که اخیراً توسط کریمی و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، خصوصیات لومینسانس کوارتزهای اسپانیا نیز، بهتر از کوارتزهای ایران است. در سایر نقاط دنیا نیز، برخی کوارتزها سیگنال‌های بسیار ضعیفی تولید می‌کنند. ریشه مشکل می‌تواند در خصوصیات کریستالی و مشخصه‌های فیزیکی لومینسانس دانه‌های کوارتز انواع رسوبات باشد. به این دلیل در سطح بین‌الملل تلاش‌هایی به منظور بررسی علت این مشکل و حساس نمودن دانه‌های کوارتز جهت تولید سیگنال لومینسانس قوی صورت گرفته است (ماری و مزکا، ۲۰۰۶، کریمی و همکاران ۲۰۲۳)، اما راه حلی جامع برای این معضل تاکنون ارائه نشده است. ضعف حساسیت دانه‌های کوارتز رسوبات در ایران در زمان تولید سیگنال لومینسانس و همچنین بדרفتاری سیگنال لومینسانس حاصله جهت تولید منحنی رشد سیگنال بر حسب دُز توسط نگارنده دوم مکرراً دیده شده است که اطلاعات برخی از این نمونه‌ها منتشر شده است [به‌طور مثال، فتاحی (۲۰۱۵)، ضمیمه؛ فتاحی و همکاران (۱۳۹۸)، شکل ۳]. این ضعف موجب عدم توانایی روش لومینسانس جهت سن‌یابی نمونه‌های جوان می‌شود، بنابراین، بررسی و حل این مشکل از اهمیت بالایی برخوردار است.

با توجه به اینکه اشعه‌های رادیواکتیو موجب یونیزاسیون و در تله افتادن الکترون‌ها می‌شوند و متعاقباً نور و گرما باعث خروج الکترون‌ها از تله و تولید لومینسانس می‌شوند؛ شکل منحنی کاهشی لومینسانس تحریک شده با نور با شدت ثابت، قاعدتاً می‌بایست متأثر از میزان دز رادیواکتیو (عامل ایجاد لومینسانس)، و نور و گرما (عوامل تحریک کوارتز جهت رهاسازی سیگنال لومینسانس) باشد.

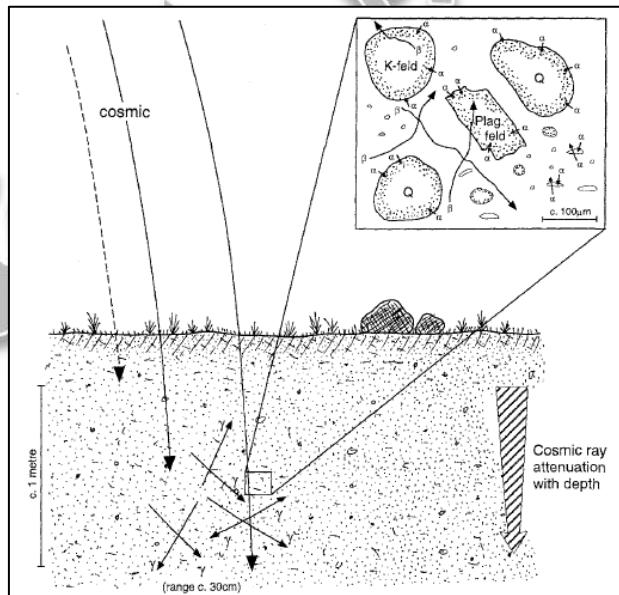
در این مقاله، پس از ارائه شرح مختصری بر مبانی سن‌یابی به روش لومینسانس نوری نحوه جدا نمودن دانه‌های کوارتز از رسوبات و طریقه اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس آنها توضیح شرح داده می‌شود. سپس، اثر دُز، و شدت نور و دمای تحریک-کننده سیگنال نوری (دزیمتر کوارتز)، بر شکل منحنی کاهشی لومینسانس تحریک شده با نور بررسی می‌شود. به این منظور آزمایش‌های تجربی با در نظر داشتن مبانی فیزیکی تشریح و نتایج حاصل از آنها بررسی و مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار می‌گیرد.



شکل ۱. نمونه‌ای از سیگنال طبیعی لومینسانس استخراج شده از دانه‌های کوارتز برداشت شده از منطقه ایران؛ (الف) نمونه S139، (ب) نمونه S143.

۲. مبانی سن‌یابی به روش لومینسانس نوری

در پوسته زمین، عناصر رادیواکتیوی مانند اورانیم (U)، توریم (Th)، پتاسیم (K) و روبیدیم (Rb) وجود دارند که در مدت زمان طولانی (بیش از 10^6 سال) و تحت تأثیر واپاشی پرتوزایی (رادیواکتیو) ایجاد می‌شوند. از واپاشی این عناصر و به ویژه عناصر کیهانی، تابش‌های یونیزگی حاصل می‌گردد. کلیه عناصر جهان هستی تحت تأثیر تابش‌های رادیواکتیو این عناصر و تشعشعات کیهانی قرار دارند (آیتکن، ۱۹۹۸ و ۱۹۸۵؛ شکل ۲).

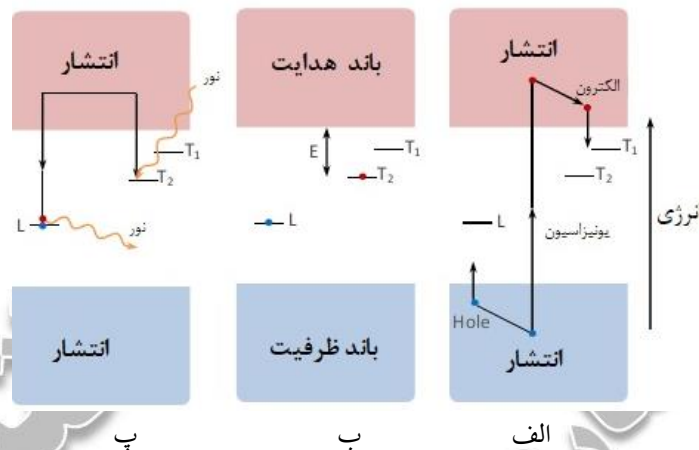


شکل ۲. تصویر شماتیکی از تشعشعات مواد رادیواکتیوی و اثرپذیری دانه‌های رسوبات از آنها (برگرفته از آیتکن، ۱۹۹۸).

گرچه این تشعشعات اثر چندانی بر انسان‌ها ندارند، اما اتم‌های بسیاری از کانی‌ها مانند کوارتز و فلدسپار را یونیزه و موجب جدایش الکترون‌ها از اتم‌های آنها می‌شوند. از آنجایی که دانه‌های کوارتز، به صورت طبیعی دارای نقایصی در شبکه بلوری خود هستند، این نقص‌ها در شبکه بلوری دانه‌ها (شامل مکان‌های خالی یون در شبکه اتم‌های درون شبکه‌ای و یا ناخالصی‌های جانشینی) برای الکترون (T) و حفره (L)، به عنوان تله عمل می‌کنند (شکل ۳). به عبارت دیگر، این دانه‌ها، تحت تأثیر تشعشعات دریافتی، یونیزه و الکترون‌های آنها از اتم‌ها جدا شده، داخل کریستال به حرکت در می‌آیند و در ساده‌ترین مدل، در داخل تله‌هایی با عنوان تله الکترونی قرار می‌گیرند. یون‌های حاصل از این عملیات، داخل تله‌ای که با عنوان حفره نامگذاری می‌شود، تجمع می‌یابند. با

گذر زمان، با نرخ مشخصی بر تعداد الکترون‌های تله الکترونی و یون‌های داخل تله حفره اضافه می‌شود. تا زمانی که در تاریکی نمونه‌ها از نهشته‌ها برداشت و به آزمایشگاه منتقل و دانه‌های کوارتز رسوبات در تاریکی جدا و تحت تأثیر نور و یا گرما، نمونه، تحریک شده و الکترون‌های به تله افتاده آن آزاد می‌شوند و به باند هدایت می‌روند؛ به علت ناپایداری در موقعیت موجود، با یک حفره ترکیب مجدد نموده که باعث گسیل سیگنال لومینسانس (فوتون‌های نوری) خواهد شد. سیگنال لومینسانس تولیدشده، قابل اندازه‌گیری و از فاکتورهای اساسی جهت تعیین سن رسوبات می‌باشد. با دانستن تعداد الکترون‌های ذخیره شده در زمان دفن، و اندازه‌گیری نرخ ذخیره شدن این الکترون‌ها در تله، می‌توان به مدت زمانی که نمونه پس از آخرین نورخوردگی دفن بوده است پی‌برد. به گونه‌ای که زمان به‌دست آمده، منطبق با سن رسوب از زمان دفن آن می‌باشد. لذا، دانه‌های کوارتز و فلدسپار، با توجه به ساختار بلوری خاص خود، جهت تعیین سن به روش لومینسانس نوری مناسب می‌باشند.

میزان افزایش الکترون‌ها متناسب با میزان دُز ذخیره‌شده ناشی از اشعه‌های رادیواکتیوی است که رسوب به صورت سالانه از محیط دریافت می‌کند. لذا کوارتز و فلدسپار همچون دُزیمتر عمل می‌کنند و با محاسبه میزان دُزی که یک رسوب در کل زمان دفن از محیط دریافت کرده است (کل دُز دریافتی از محیط) و تقسیم آن بر میزان دُزی که سالانه دریافت می‌کند (دز سالانه)، سن یا زمان مدفون شدن دُزیمتر مشخص می‌شود.



شکل ۳. دیاگرام سطوح مختلف انرژی که مراحل ذخیره و آزادسازی سیگنال لومینسانس نوری را نشان می‌دهد؛ الف) برهم‌کنش‌های تابشی با بلور (یونیزاسیون) که الکترون‌ها را به باند هدایت می‌راند و حفره‌ها را در باند ظرفیت باقی می‌گذارد؛ ب) الکترون‌ها در نواقص ساختاری (T_1 ، T_2 و غیره) به تله می‌افتند و برای یک دوره زمانی باقی می‌مانند (هرچه تله نسبت به باند هدایت (E) در عمق بیشتری قرار داشته باشد (برای مثال T_2)، الکترون پایدارتر بوده و بیشتر در تله می‌ماند؛ پ) بلور از طریق حرارت یا آشکارسازی به نور برانگیخته و الکترون‌های آن آزاد می‌شوند.

۳. انتخاب نمونه‌ها، جداسازی دانه‌های کوارتز و اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس نوری آنها

نمونه برداری مطابق دستورالعمل ذکر شده در فتاحی (۲۰۲۱) انجام شد. چهار نمونه از رسوبات ایران شامل دو نمونه از محیط‌های آبرفتی [S161 (برداشت شده از منطقه شمال خاور) و S139 (برداشت شده از منطقه شمالی ایران)]، یک نمونه بادی [S143 (برداشت شده از منطقه مرکزی ایران)] و یک نمونه باستان‌شناسی [S159 (برداشت شده از منطقه باختر)] جهت این مطالعه استفاده شد. کلیه عملیات آزمایشگاهی جهت استخراج ذرات کوارتز نمونه‌ها، و اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس نوری آنها در آزمایشگاه سن یابی به روش لومینسانس نوری در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران انجام شد.

۳-۱. آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه ملی لومینسانس نوری ایران

کلیه عملیات آزمایشگاهی جهت استخراج ذرات کوارتز و فلدسپار نمونه‌های رسوبی تحت نور امن انجام شد. در آزمایشگاه لومینسانس، تحت نور استاندارد قرمز، رسوبات داخل لوله‌های حاوی نمونه‌های برداشت شده، خارج و بخش نورخورده و نورنخورده آنها از هم جدا شدند. عملیات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های نورنخورده دنبال شدند. ذرات رسوبی در سه سایز اصلی کوچکتر از ۹۰ میکرون، بین ۹۰ تا ۲۵۰ میکرون و بزرگتر از ۲۵۰ میکرون جداسازی شدند. ذرات با اندازه ۹۰ تا ۲۵۰ میکرون، برای این مطالعه، انتخاب شدند. خالص‌سازی با استفاده از اسیدهای مختلف و محلول مایع سنگین خالص‌سازی ذرات کوارتز انجام شد. به‌طور خلاصه، مشابه استانداردهای جهانی، اسید هیدروکلریدریک (به‌منظور حذف مواد کربناتی)، هیدروژن پراکسید (به‌منظور حذف مواد آلی)، پلی‌تنگستات سدیم (به‌منظور جداسازی کوارتز) و اسید هیدروفلوئوریک (به‌منظور خالص‌سازی نهایی ذرات کوارتز) به‌کار گرفته شدند. در هر مرحله، پس از پایان واکنش با اسید، نمونه‌ها با آب مقطر شسته و در داخل اجاق خشک شدند. پس از استخراج کوارتز خالص امکان استفاده از این ذرات جهت سن‌یابی نمونه‌ها فراهم شد.

با استناد به آنکه، پس از خالص‌سازی دانه‌های کوارتز و فلدسپار، امکان اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس نوری، برای هر یک از این دانه‌های این نمونه‌ها وجود دارد. به این منظور، در این مرحله، به‌طور جداگانه دانه‌های کوارتز هر نمونه، با چسب سیلیکونی به صورت تک‌لایه بر روی دیسک‌های آلومینیومی استاندارد به قطر حدود ۱ سانتیمتر، چسبانده می‌شوند که از این پس، این مجموعه دانه‌های قرار گرفته بر روی دیسک‌ها را الیکوت (Aliquot) نامگذاری می‌کنیم. تعداد کافی از الیکوت‌های نمونه مدنظر آماده و در دستگاه قرار می‌گیرد و آزمایش‌های لازم مطابق استانداردهای تعریف شده در این روش، برای آنها انجام می‌شود.

۲-۳. دستگاه اندازه‌گیری سیگنال لومینسانس نوری

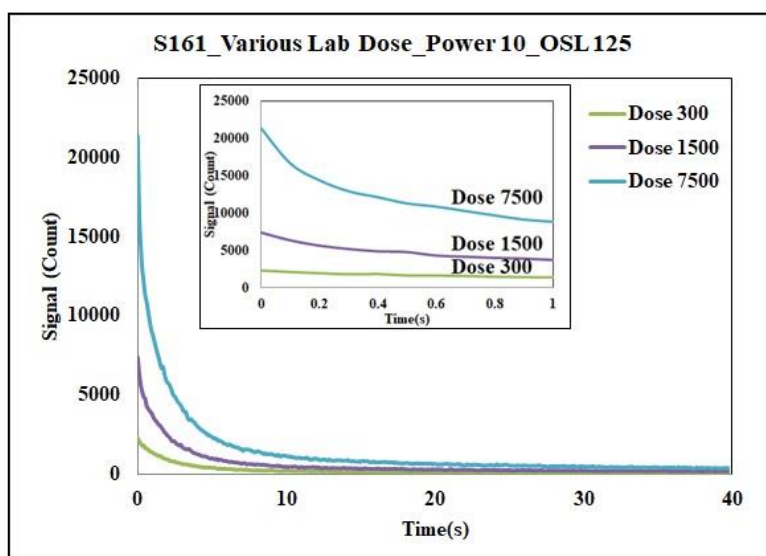
تمامی اندازه‌گیری‌های لومینسانس نوری دانه‌های کوارتز رسوبات گزارش‌شده در این مقاله با استفاده از دستگاه lexsysgsmart- Automated TL/OSL Reader انجام شد. این دستگاه دارای چشمه بتای $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ از نوع ۳۲۰۳ با فعالیت $1/85\text{GBq}$ و ماکزیم انرژی $2/27\text{MeV}$ می‌باشد. واحد تحریک‌کننده نوری این دستگاه، شامل مجموعه‌ای از دیود و لیزر تولیدکننده نور مرئی (آبی با طول موج ۵۴۸ نانومتر) (BSL; Blue Stimulated Luminescence) و امواج مادون قرمز (با طول موج ۸۵۰ نانومتر) (IRSL; Infrared Stimulated Luminescence)، با شدت نور به ترتیب حدود ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌وات بر سانتیمتر مربع هستند که به ترتیب برای تحریک دانه‌های کوارتز و فلدسپار مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، واحد آشکارسازی سیگنال لومینسانس این دستگاه، شامل فوتومولتی پلایر (PMT (HAMAMATSU) و فیلترهای نوری است. فوتومولتی پلایر، دارای فوتوکاتدی با قابلیت آشکارسازی نور در ناحیه ۲۸۰-۶۵۰ نانومتر و حساسیت پیک ۴۲۰ نانومتر است. از ترکیب فیلترهای نوری U340 و BP 365/50 EX جهت آشکارسازی سیگنال UV کوارتز استفاده می‌شود.

۴. شرح آزمایش‌ها

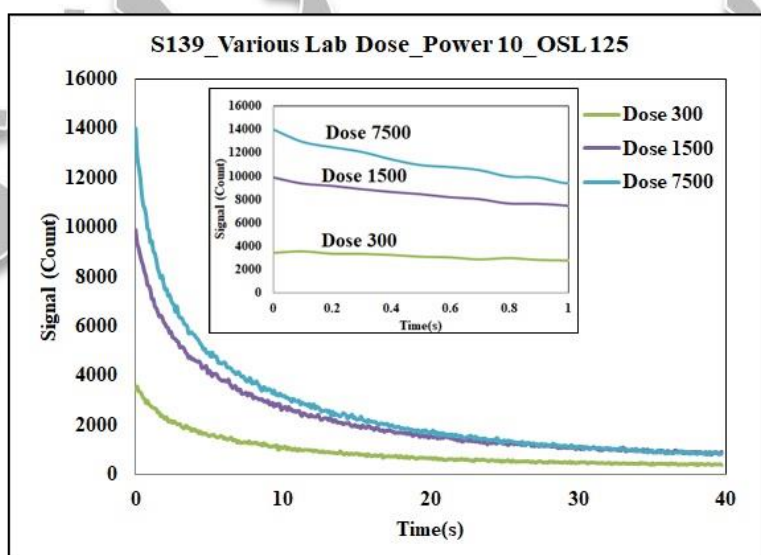
در کلیه آزمایش‌های انجام شده، دانه‌های کوارتز قرار گرفته بر روی الیکوت‌ها توسط نور آبی (۴۷۰ نانومتر) با شدت‌های مختلف تحریک و سیگنال لومینسانس حاصله از آنها در ناحیه اولتراویولت (۳۴۰ نانومتر) اندازه‌گیری شدند. در این مقاله، شدت نور آبی اعمالی با نمایه P نشان داده شده است. P1، P10، P30 و P50 به ترتیب بیانگر شدت نور آبی با مقادیر ۱، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌وات بر سانتیمتر مربع (mW/cm^2) می‌باشند. در این تحقیق، تأثیر میزان دُز آزمایشگاهی داده شده، و شدت نور آبی تحریک‌کننده دانه‌های کوارتز جهت تولید سیگنال لومینسانس نوری، بر شدت و شکل منحنی سیگنال لومینسانس نوری کوارتز بررسی شد. آزمایش‌ها به شرح زیر بر روی کوارتزهای مورد مطالعه در این بررسی، انجام شدند.

آزمایش اول - اثر دُز:

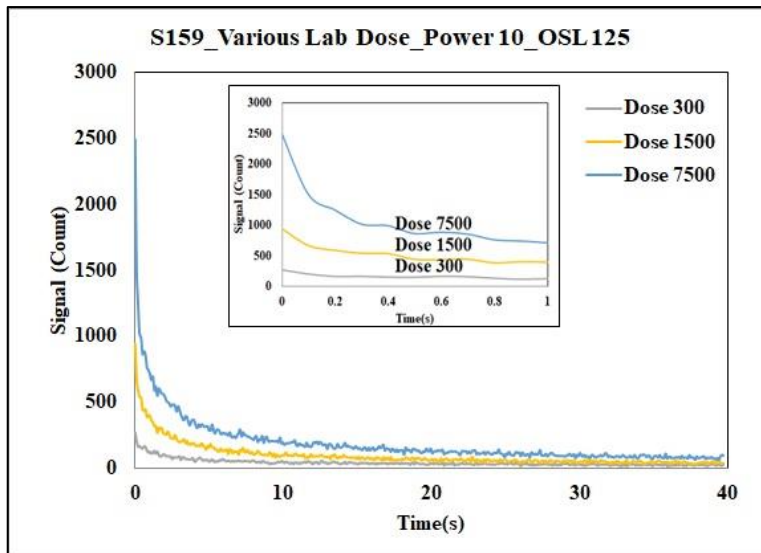
با ثابت نگه داشتن دمای نمونه (در ۱۲۵ درجه سانتیگراد) و ثابت نگه داشتن شدت نور آبی (۱، ۱۰، ۳۰ یا ۵۰ میلی وات بر سانتیمتر مربع)، اثر سه دُز آزمایشگاهی متفاوت (۳۰۰، ۱۵۰۰ و ۷۵۰۰ ثانیه) بر شدت و شکل سیگنال لومینسانس نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴، نمایانگر اثر اعمال دُزهای آزمایشگاهی مختلف بر شکل سیگنال لومینسانس حاصل از نمونه های S161 (شکل ۴-الف) S139 (شکل ۴-ب) S159 (شکل ۴-ج) و S143 (شکل ۴-د) که در دمای ۱۲۵ درجه و با اعمال نور تحریک کننده با شدت ثابت (P ۱۰) اندازه گیری شده است می باشد. اثر اعمال دُزهای آزمایشگاهی مختلف بر شکل سیگنال لومینسانس حاصل از نمونه S139، تحریک شده با شدت نور آبی (۱، ۱۰، ۳۰ یا ۵۰ میلی وات بر سانتیمتر مربع) اندازه گیری شده در دمای ۱۲۵ درجه، در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۶ به عنوان مثالی از نسبت افزایش سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده، با افزایش دُز در شدت های مختلف، منحنی مربوط به این نسبت را برای نمونه S139 نشان می دهد.



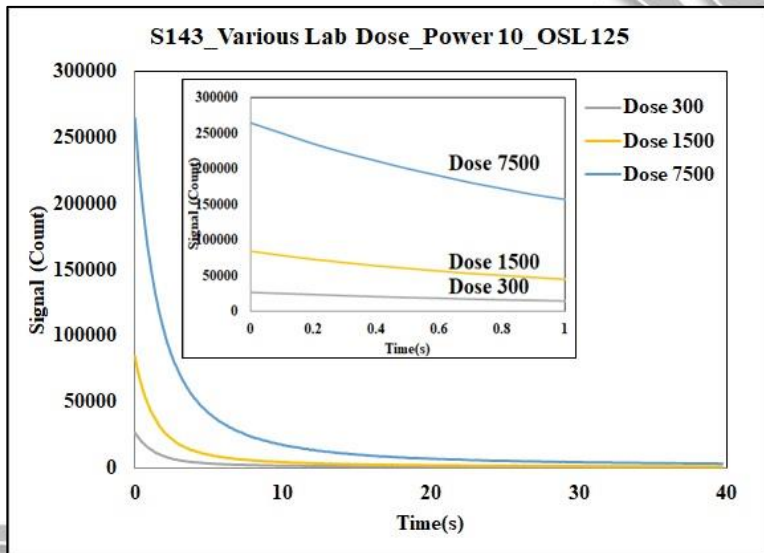
(الف)



(ب)

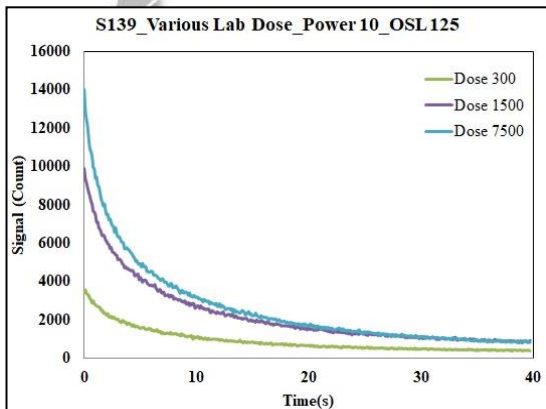


(ج)

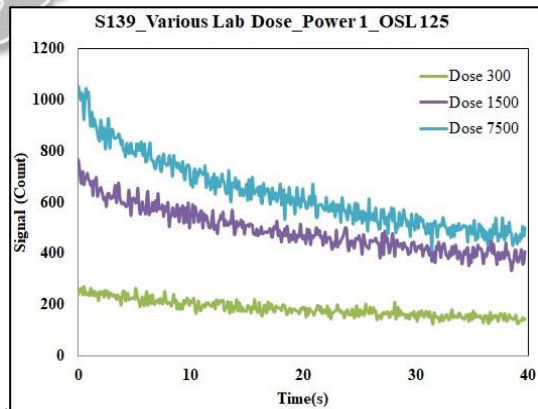


(د)

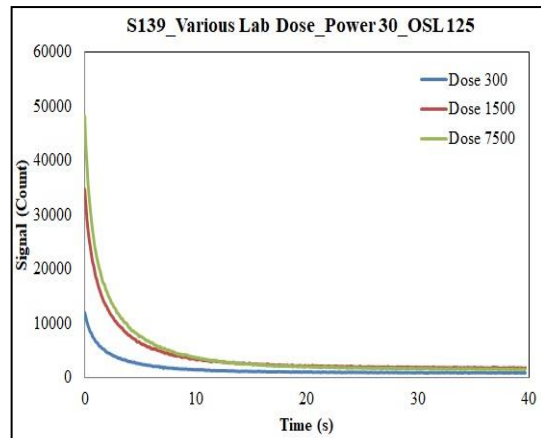
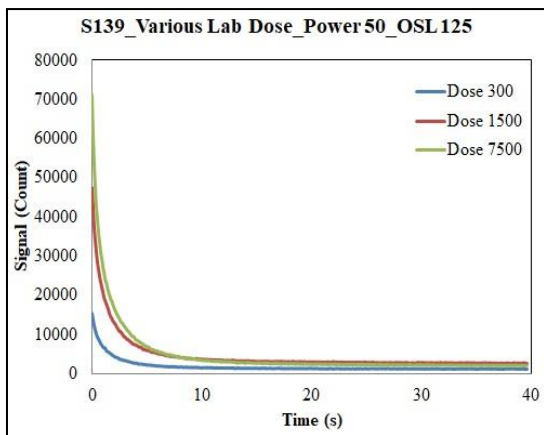
شکل ۴. سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده در ۴۰ ثانیه حاصل از اعمال تغییرات دزهای آزمایشگاهی [در دمای ۱۲۵ درجه و شدت نور آبی ثابت (P10)] مربوط به نمونه‌ها؛ الف (S161، ب (S139، ج (S159، د (S143 (در داخل هر شکل ابتدای سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده در ۱ ثانیه نشان داده شده است).



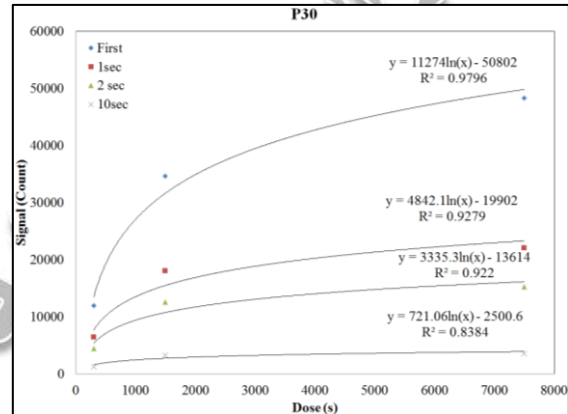
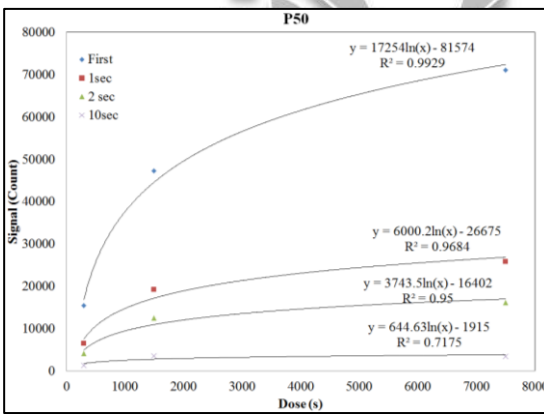
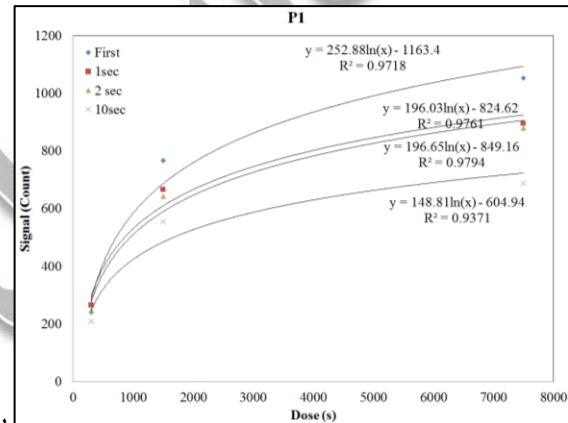
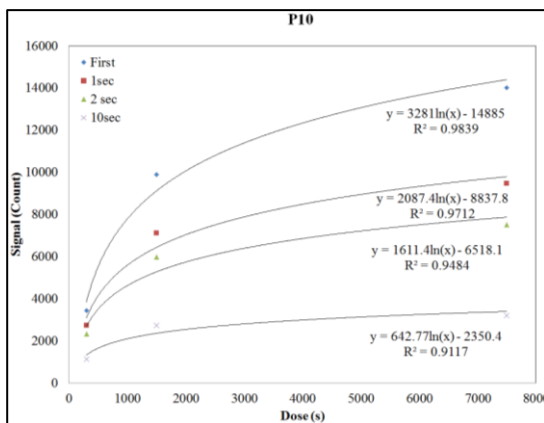
(ب)



(الف)



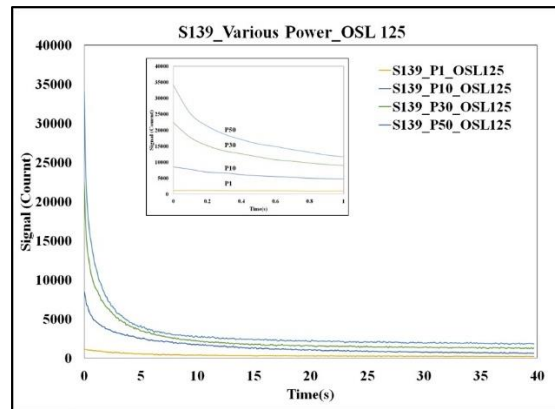
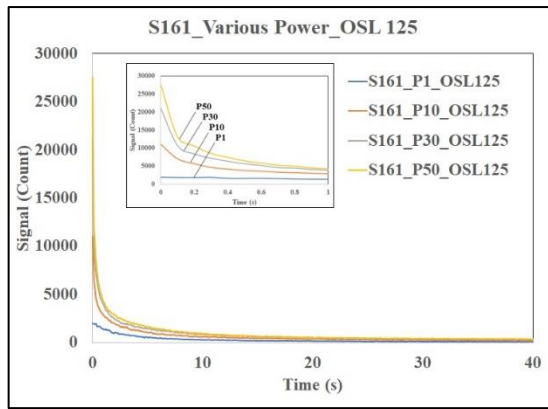
شکل ۵. سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده در ۴۰ ثانیه حاصل از اعمال دُزهای آزمایشگاهی در دمای تحریک لومینسانس ۱۲۵ درجه و شدت‌های نور آبی مختلف اعمال شده به نمونه S139؛ الف) P1، ب) P10، ج) P30، د) P50.



شکل ۶. نسبت افزایش سیگنال لومینسانس اندازه گیری شده در ۴۰ ثانیه، با افزایش دُز مربوط به نمونه S139 در شدت‌های مختلف؛ الف) P1، ب) P10، ج) P30، د) P50.

آزمایش دوم- اثر شدت نور تابش آبی تحریک کننده:

با ثابت نگه داشتن دُز (۳۰۰ ثانیه) و ثابت نگه داشتن دمای نمونه (در ۱۲۵ درجه)، دانه‌های کوارتز توسط نور آبی با شدت‌های P1، P10، P30 و P50 تحریک شدند. سیگنال لومینسانس نوری حاصل از اعمال شدت نور آبی مربوط به دو نمونه آبرفتی انتخابی در این آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. سیگنال‌های لومینسانس حاصل از اعمال دُز آزمایشگاهی ثابت ۳۰۰ ثانیه و هر یک از شدت‌های مورد بررسی در این مطالعه (P1, P10, P30 و P50) در دمای تحریک لومینسانس مطابق استاندارد جهانی (۱۲۵ درجه)؛ الف) حاصل از نمونه S139 و ب) حاصل از نمونه S161.

آزمایش سوم- بازیابی دُز آزمایشگاهی (بررسی اثر افزایش دُز و افزایش شدت نور تابش آبی، به‌منظور بازیابی دُز مشخص آزمایشگاهی)؛

در این بررسی، دُز آزمایشگاهی ۳۰۰ ثانیه با هدف بازیابی آن انتخاب گردید. به‌منظور بازیابی این دُز آزمایشگاهی (معادل De نمونه)، از روش سار (SAR; Single Aliquot Regeneration) استفاده شد (ماری و وینتل، ۲۰۰۰) که پروتکل مربوط به آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای هر یک از الیکوت‌های انتخابی به منظور اطمینان از تخلیه کامل سیگنال این الیکوت، آن را در دمای ۲۸۰ درجه تحت نور آبی با شدت ۲۰ میلی‌وات به مدت ۴۰ ثانیه قرار دادیم. سپس، به‌منظور تولید مجدد سیگنال، مطابق جدول ۱ ابتدا، مقدار ۱۵۰ ثانیه دُز آزمایشگاهی به آن اعمال شد و الیکوت تا ۲۰۰ درجه پیش گرمایش شد. آنگاه الیکوت در دمای ۱۲۵ درجه تحت نور آبی با شدت ۵۰ میلی‌وات بر سانتیمتر مربع تحریک شد. سپس، به‌منظور تصحیح حساسیت، مطابق پروتکل، مقدار ۱۰۰ ثانیه دُز به الیکوت اعمال شد و الیکوت تا ۲۰۰ درجه پیش گرمایش شد. آنگاه مجدداً الیکوت در دمای ۱۲۵ درجه تحت نور آبی با شدت ۵۰ میلی‌وات بر سانتیمتر مربع تحریک شد. در ادامه، این سکانس با اعمال ۰، ۶۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ ثانیه دُز آزمایشگاهی تکرار گردید (جدول ۱).

جدول ۱. پروتکل بازیابی ۳۰۰ ثانیه دُز آزمایشگاهی برای نمونه‌های لومینسانس تحریک شده با نور.

مرحله	عملیات انجام شده
۱	دُز آزمایشگاهی (۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۰ و ۱۵۰ ثانیه)
۲	پیش‌گرمایش (۲۰۰ درجه)
۳	تحریک با نور منطبق با دانه انتخابی
۴	دادن دُز آزمایشگاهی
۵	پیش‌گرمایش (۲۰۰ درجه)
۶	تحریک با نور منطبق با دانه انتخابی
۷	بازگشت به مرحله اول و تکرار

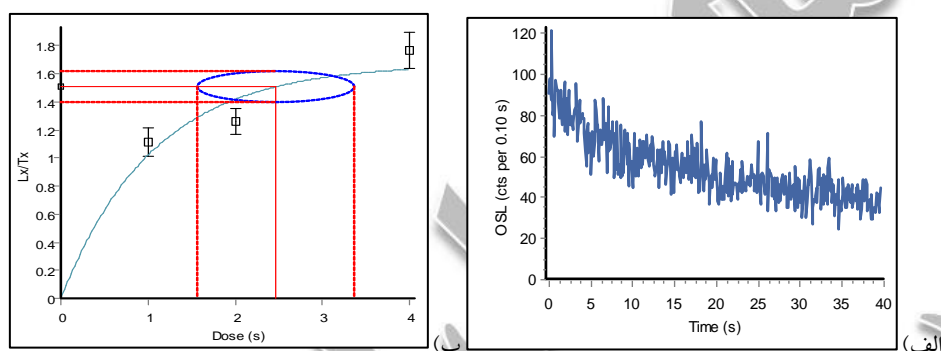
۵. تحلیل نتایج

مطابق شکل ۴، برای کلیه نمونه‌های انتخاب شده (S139، S161، S159 و S143) جهت بررسی در این مطالعه، که در دمای ۱۲۵ درجه و با اعمال نور آبی تحریک‌کننده با شدت ثابت P10 اندازه‌گیری شده است، هرچه دُز بیشتری به نمونه داده شود، سیگنال لومینسانس نوری حاصله، دارای شدت و نرخ کاهش بیشتر خواهد بود. برای تمام نمونه‌های انتخابی با افزایش شدت نور

تحریک کننده آبی، در دمای ۱۲۵ درجه (شکل ۵) سیگنال‌های لومینسانس نوری با شدت و نرخ کاهش بیشتری و کیفیت بهتری دریافت خواهند شد. به منظور تست و استفاده از نتایج به دست آمده، الیکوتی که دارای سیگنالی ضعیف و منحنی رشد با رفتار بد بود، انتخاب و آزمایش‌های مربوط به افزایش دُز آزمایشگاهی و شدت نور تحریکی بر روی آن انجام شد.

۶. آزمودن نتایج

به منظور آزمودن نتایج به دست آمده در این مطالعه، الیکوت ۱۲ مربوط به نمونه S139 مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید منحنی رشد، دُزهای آزمایشگاهی ۱، ۲ و ۴ ثانیه به این الیکوت اعمال شد. این الیکوت در شدت P10، اولاً سیگنالی ضعیف نشان داد (شکل ۸-الف). ثانیاً با اعمال ۴ ثانیه دز منحنی رشد آن اشباع شد (شکل ۸-ب). ردیف ۱ از جدول ۲، مقادیر بازیابی دُز آزمایشگاهی مربوط به این الیکوت را نشان می‌دهند.



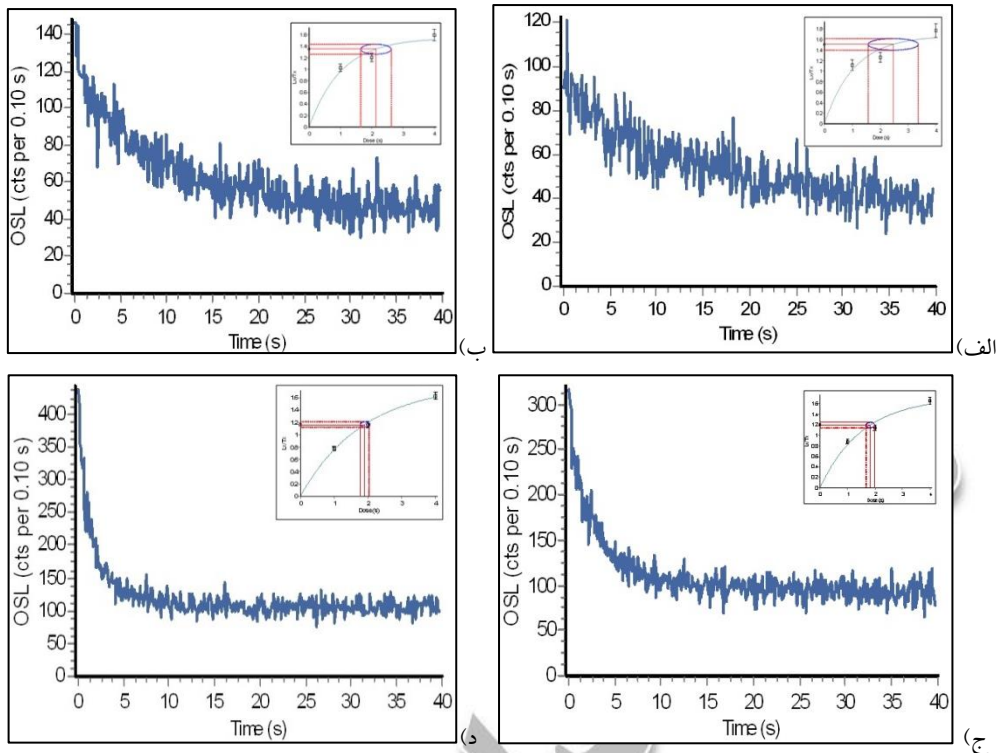
شکل ۸ الف) سیگنال لومینسانس ناشی از ۱ ثانیه دز و ب) منحنی رشد، حاصل از نمونه S391 حاصل از اعمال درهای ۱ و ۲ و ۴ ثانیه با شدت P10.

۶-الف. بررسی اثر شدت نور آبی

به این الیکوت ۲ ثانیه دُز آزمایشگاهی (معادل De) داده شد و سکونس جدول ۱ با اعمال نور آبی با شدت P10 انجام شد. سپس، این آزمایش با تغییر شدت نور آبی تکرار شد (شدت‌های P10، P20، P50 و P70). سیگنال اولیه حاصل از این آزمایش‌ها (ناشی از اعمال ۲ ثانیه دُز آزمایشگاهی)، همراه با منحنی رشد برای هر یک از این شدت‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. با افزوده شدن شدت نور آبی، سیگنال لومینسانس افزایش و منحنی رشد بهبود یافته (شکل ۹) و دقت دُز آزمایشگاهی بازیابی شده افزایش یافت (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج حاصل از بازیابی ۲ ثانیه دُز آزمایشگاهی با اعمال شدت‌های P10، P20، P50 و P70 به نمونه S391.

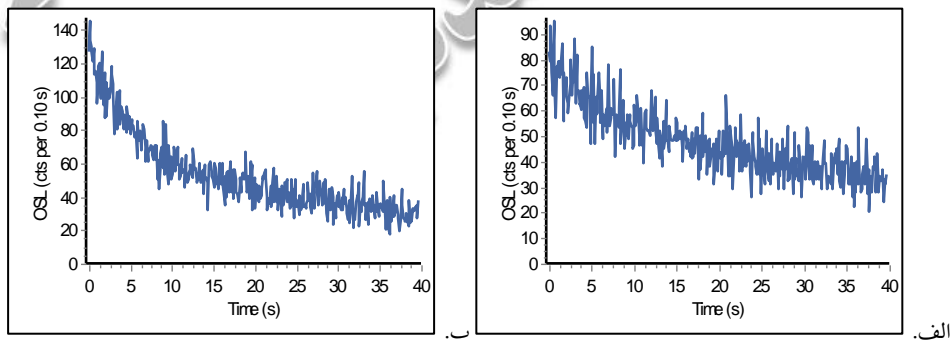
خطا	نسبت بازیافت سیگنال	خطای بازیابی دُز	دُز بازیابی نرمال شده	دُز بازیابی شده	محدود انتخابی		شدت تحریک نوری
					سیگنال	نویز	
۰/۲۶	۱/۲۴	۰/۵۹	۱/۲۰	۲/۴۰	۳۹۹...۳۵۰	۵...۱	۱۰
۰/۱۵	۰/۹۸	۰/۵۶	۱/۱۹۵	۲/۳۹	۳۹۹...۳۵۰	۵...۱	۲۰
۰/۰۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۰۳۵	۲/۰۷	۳۹۹...۳۵۰	۵...۱	۵۰
۰/۰۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۰۳۵	۲/۰۷	۳۹۹...۳۵۰	۵...۱	۷۰

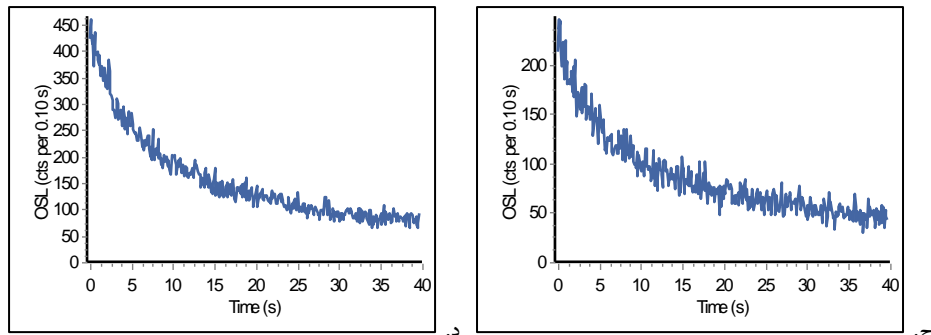


شکل ۹. سیگنال لومینسانس حاصل از اعمال شدت‌های نور مختلف؛ الف) P10، ب) P20، ج) P50 و د) P70 همراه با منحنی رشد مربوط به هر شدت در داخل شکل مربوطه نمایش داده شده است.

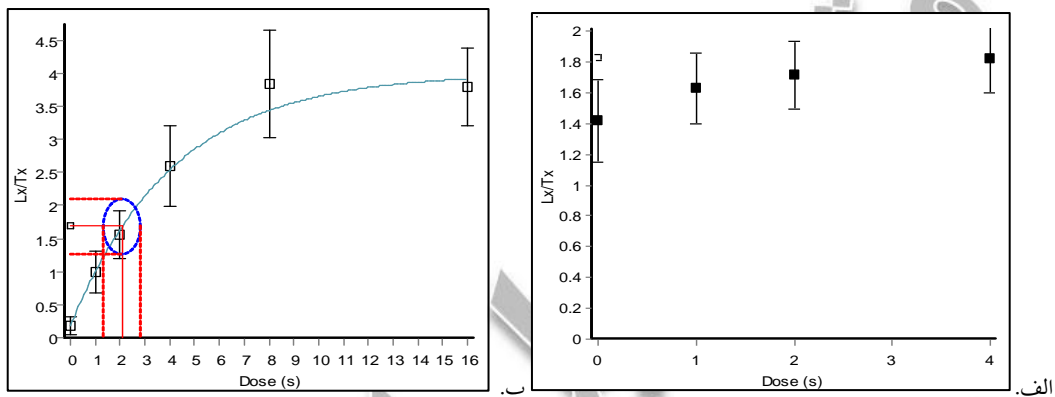
۶-ب. بررسی اثر افزایش دُز

در این مرحله، علاوه بر دُزهایی که در محدوده برآورد Dc (۱، ۲ و ۴ ثانیه) به نمونه داده شده بود، دُزهای آزمایشگاهی بیشتری (۸، ۱۰، ۱۶ و ۳۲ ثانیه) به نمونه داده شد. با افزایش دز از ۲ ثانیه تا ۳۲ ثانیه، شکل منحنی رشد تغییر و میزان فوتون‌های تولید شده در آغاز اندازه‌گیری از ۹۰ (حاصل ۲ ثانیه تابش دز) به ۴۵۰ (حاصل ۳۲ ثانیه دز) افزایش یافت (شکل ۱۰). منحنی رشد که قبلاً در ۴ ثانیه اشباع شده بود (شکل ۱۱ الف) در ۱۶ ثانیه اشباع شد (شکل ۱۱ ب).





شکل ۱۰. سیگنال لومینسانس حاصل از اعمال دُزهای مختلف؛ الف) ۲ ثانیه، ب) ۸ ثانیه، ج) ۱۶ ثانیه، د) ۳۲ ثانیه.



شکل ۱۱. منحنی رشد حاصل از اعمال دُز؛ الف) ۱، ۲، ۴ ثانیه، ب) ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ ثانیه.

۷. نتیجه گیری

یکی از فاکتورهای اساسی جهت تخمین سن مطلق رسوبات در روش لومینسانس تحریک شده با نور، برآورد دُز معادل دُز طبیعی (De) مربوط به هر نمونه می باشد. میزان شدت سیگنال لومینسانس حاصل از تحریک نوری الیکوت های مختلف نمونه و منحنی رشد سیگنال بر حسب دز تأثیر بسزایی در این برآورد خواهد داشت. متأسفانه برخی از کوارتزهای رسوبی ایران دارای سیگنال لومینسانس ضعیف و منحنی رشد بدرفتار هستند که به این دلیل خاصه برای نمونه های جوان، سن یابی به روش لومینسانس دچار مشکل می شود. آزمایش های انجام شده در این مطالعه نشان داد که با افزایش دُز آزمایشگاهی و همچنین افزایش شدت نور آبی (تحریک کننده)، شدت و نرخ کاهش سیگنال لومینسانس کوارتز افزایش می یابد. لذا، با افزایش شدت نور آبی و دُز آزمایشگاهی امکان سن سنجی و بهبود برآورد سن برای نمونه های کم حساسیت و جوان، فراهم می شود.

۸. منابع

- Aitken, M.J., 1985. Thermoluminescence Dating. Academic Press, London.
 Aitken, M.J., 1998. An Introduction to Optical Dating. Oxford University Press, Oxford.
 Amini, H., Fattahi, M., Ghassemi, M.R. 2012, Determination of slip rate in the Shesh-Taraz River on the Doruneh fault using Histogram OSL method, Iranian Journal of Geophysics, Vol. 5, No. 3, pp.14-29.
 Djamali, M., de Beaulieu, J.L., Andrieu-Ponel, V., Berberian, Miller, N.F., Gandouin, E., Lahijani, H., Shah-Hosseini, M., Ponel. Ph., Salimian, M., Guiter, F., 2009. A late Holocene pollen record from Lake Almalou in NW Iran: evidence for changing land-use in relation to some historical events during the last 3700 years, Journal of Archaeological Science 36, 1364–1375.

- Fattahi, M., Investigating the effective factors in OSL dating sampling, 2021. *Iranian Journal of Geophysics*, 2021, 15(3), 27-46
- Fattahi, M., OSL dating of the Miam Qanat (KĀRIZ) system in NE Iran, *Journal of Archaeological Science* 59, 54-63.
- M Fattahi, M Sahrifi, 2010. OSL dating of submerged ancient jareh bridge-DAM (South-West of IRAN), *Iranica Antiqua* 56.
- Fattahi, M., Walker, R., Khatib, M.M., Dolati, A., Bahroudi, A., 2007. Slip-rate estimates and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran. *Geophys. J. Int.* 168, 691–709.
- Fattahi, M., Nazari, H., Bateman, M.D., Meyer, B., Se'brier, M., Talebian, M., Le Dortz, K., Foroutan, M., Ahmadi Givi, F., Ghorashi, M., 2010. Refining the OSL age of the last earthquake on the Dshshir fault, Central Iran, *Quaternary Geochronology* 5, 286–292.
- Fattahi M., PW Kevin, B Mark. OSL dating of sediments samples from Karun river traces in Khuzestan, SW Iran. 2019. *The Journal of the Earth and Space Physics* 45 (2), 299-311
- Karimi Moayed, N., Sohbaty, R., Murray, A.S., Rades, E.F., Fattahi, M., Ruiz López, J.F., 2022, Rock surface luminescence dating of prehistoric rock art from central Iberia, *Archaeometry* 65 (2), 319-334
- Karimi, Moayed, N., Fattahi, M., Autzen, M., Haghshenas, E., Tajik, V., Shoaei, Z., Bailey, M., Sohbaty, R., Murray, A., 2023, The sensitisation of quartz extracted from andesite, submitted.
- Khosravichenar, A., Fattahi, M., Amini, H., 2020, H.Von Suchodoletz, The potential of small mountain river systems for paleo environmental reconstructions in drylands- and example from the Binaloud Mountains in northeastern Iran, *Geosciences*, 10.3390/geosciences 10110448, available online.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurement*, 32, 57–73.
- Moska, P., and Murray, A. S., 2006. Stability of the quartz fast-component in insensitive samples, *Radiation Measurements*, 41(7–8), 878–885. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.06.005>.
- Nazari, H. Ritz, J.-F. Walker, R.T. Salamati, R. Rizza, M., Patnaik, R., Hollingsworth, J. Alimohammadian, H. Jalali, A. Kaveh Firouz, A. Shahidi, A., 2014. Palaeoseismic evidence for a medieval earthquake, and preliminary estimate of late Pleistocene slip-rate, on the Firouzkuh strike-slip fault in the Central Alborz region of Iran, *Journal of Asian Earth Sciences* 82, 124–135.
- Quigley, M., Fattahi, M., Sohbaty, R., Schmidt, A., 2011. Palaeoseismicity and pottery: Investigating earthquake and archaeological chronologies on the Hajiarab alluvial fan, Iran, *Quaternary International* 242, 185-195
- Ritz, J.F., H. Nazari, S. Balescu, M. Lamothe, R. Salamati, A. Ghassemi, A. Shafei, M. Ghorashi, and A. Saidi (2012), Paleoeearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran), *J. Geophys. Res.*, 117, B06305, doi: 10.1029/2012JB009147.
- Solaymani Azad Sh., Philip, H., Dominguez, S., Hessami, Kh., Shahpasandzadeh, M., Foroutan, M., Tabassi, H., Lamothe, M., 2015. Paleoseismological and morphological evidence of slip rate variations along the North Tabriz fault (NW Iran), *Tectonophysics* 640-641, 20–38.
- Torabi, M. Fattahi, M. Amini, H. Ghassemi, M.R. Karimi, N. 2020. OSL Dating of Landslide-Dammed-lake Deposits in the North of Tehran, Iran: 958 Ray-Taleghan/Ruyan earthquake, *Quaternary International*, *Quaternary International*, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.006>, Vol. 562, no. 1: pp 46-57.