

استفاده از گرمالیانی در ایران: سن‌یابی نمونه‌های سفالی موزه ملی ایران

سمیه رستمی مهربان^{۱*}، مرتضی فتاحی^۲ و فرانک بحرالعلومی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ محقق، گروه باستان‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸،۲،۱۵، پذیرش نهایی: ۹۰،۱۱،۱۱)

چکیده

گرمالیانی (ترمولومینسانس)، نور منتشر شده از مواد معدنی در اثر حرارت دادن آنها تا دمای حدود 500°C است. به‌منظور به‌کارگیری گرمالیانی در سن‌یابی، از دانه‌های معدنی کوارتز و فلدسپار موجود در مواد استفاده می‌شود. این دانه‌ها به‌صورت مقدارسنج (دزی‌متر) عمل می‌کنند، یعنی قادر به جذب تابش یونیده‌کننده‌ای هستند که در معرض قرار گرفته‌اند. این تابش از واپاشی عنصرهای پرتوزای - اورانیم، توریم، روبیدیم و پتاسیم - موجود در طبیعت، به‌علاوه تابش‌های کیهانی حاصل می‌شود.

وقتی دانه‌های معدنی در معرض گرمای شدید قرار می‌گیرند، همهٔ سیگنال گرمالیانی که قبلاً در آنها ذخیره شده است، از بین می‌رود. بنابراین ساعت درخشایی صفر می‌شود. هنگامی که این دانه‌ها دوباره در معرض تابش‌های پرتوزا قرار می‌گیرند، سیگنال گرمالیانی در آنها ذخیره می‌شود و با زمان افزایش می‌یابد. به‌منظور سن‌یابی در آزمایشگاه، نیاز به اندازه‌گیری مقدار معادل مقدار طبیعی و نرخ مقدار معادل سالانه است. مقدار معادل طبیعی از اندازه‌گیری سیگنال گرمالیانی ذخیره شده به‌دست می‌آید. نرخ مقدار عبارت است از مقداری که دانه‌های معدنی ظرف یک سال در خود ذخیره می‌کنند. از تقسیم مقدار معادل مقدار طبیعی بر نرخ مقدار، سن نمونه به‌دست می‌آید.

سن‌یابی به روش گرمالیانی در سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۷۰، با تعیین سن سفال و سایر مواد گرم شده باستان‌شناسی، شروع شد و پس از آن در دیگر شاخه‌های دانش مانند دیرین‌زلزله‌شناسی، دیرین‌اقلیم‌شناسی، زمین‌شناسی، باستان‌شناسی، جغرافیا و مانند آن مورد استفاده قرار گرفت. برای مثال از آن در باستان‌شناسی به‌منظور تعیین سن و اصالت ظروف سفالی، آجر، کاشی و مانند آن استفاده می‌شود. در دیرین‌اقلیم‌شناسی، با سن‌یابی رسوبات می‌توان داده‌های ثبت شده جامعی از وضعیت آب و هوای کره زمین در گذشته فراهم کرد که به درک دیرین‌اقلیم‌شناسی منطقه‌ای و جهانی کمک می‌کند (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷). در دیرین‌زلزله‌شناسی از گرمالیانی در سن‌یابی زلزله‌های گذشته، تعیین نرخ حرکت گسل و دوره بازگشت استفاده می‌شود (فتاحی، ۲۰۰۹).

ایران کشوری باستانی و زلزله‌خیز است، لذا بسیاری آثار باستانی و تمدن‌های دیرین ممکن است در اثر زلزله یا سایر حوادث طبیعی از بین رفته باشد. سن‌یابی می‌تواند وسیله ارتباط دیرین‌زلزله‌شناسی، دیرین‌اقلیم‌شناسی و باستان‌شناسی در ایران باشد. لذا روش‌های سن‌یابی، به‌ویژه گرمالیانی، برای متخصصان و دانشجویان جغرافیا، باستان‌شناسی، زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی و مانند آن بسیار مهم است. با اشاره به اینکه اولین قدم در سن‌یابی گرمالیانی سفال‌ها در آکسفورد برداشته شد، این مقاله ضمن توضیح نحوه تعیین سن پنج ظرف سفالین در مخزن موزه ملی ایران، سن‌یابی به روش گرمالیانی را معرفی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سن‌یابی، گرمالیانی، مقدار معادل مقدار طبیعی، نرخ مقدار

Application of thermoluminescence in Iran: Dating of pottery samples of Iran National Museum

Rostami Mehraban, S.¹, Fattahi, M.² and Bahrololumi, F.³

¹ M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Researcher, Archeology Department, University of Tehran, Iran

(Received: 5 May 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

While a crystalline material is heated from room temperature to around 500°C, a weak but measurable light will be emitted. This light is known as thermoluminescence (TL) and is based on storage of energy from ionizing radiation in many naturally occurring TL minerals, including quartz and feldspar. The source of radiation is the radioactive materials such as uranium, thorium, potassium and cosmic radiation. The physical bases for this phenomenon in the simplest model can be expressed as follow: In nature all minerals are exposed to radiation, which leads to ionization of the atoms as electrons and holes. Freed electrons may become trapped in structural defects. The number of trapped electrons will be accumulated up to the time that the material is heated sufficiently. Heating stimulate the atoms and electrons can be released and recombine with the 'holes'. Some of these holes are called 'the luminescence centers' in the mineral crystal lattice which recombination of electron with them, results to an emission of light which is called thermoluminescence.

When mineral is heated to high temperature, it loses all its previously acquired TL signal, and sets luminescence clock to zero. After cooling, the natural radioactivity causes thermoluminescence to build up again and thus the amount of TL induced is proportional to the time that has elapsed since the minerals were fired.

For dating in laboratory, it is necessary to measure equivalent dose and dose rate. The intensity of the radiation damage in crystal lattices is a measure of the Equivalent Dose (DE) which the mineral has received since last "resetting" by exposure to heat. DE is obtained by means of a TL measurement. The dose rate (DR) is a measure of radiation dose per unit of time absorbed by mineral. The equation for obtaining an age is:

$$\text{Age (ka)} = D_E (\text{Gy}) / D_R (\text{Gy/ka})$$

Two approaches are employed to determine the DE: the additive-dose method and the regeneration method. In this study, we used the first method. In additive-dose method, a number of nearly equal portions of the sample (aliquots) are divided into groups; one is reserved for measurement of the natural TL signal only, while the others are given various doses of laboratory radiation. Then, all the aliquots are measured together and the luminescence intensity is plotted against laboratory radiation dose; this forms the sample's dose response. The DE is determined from the intercept of the fitted line with the dose.

The dose rate is calculated from an analysis of the radioactive elements in both the sample and its surroundings. These are determined using the measured concentrations of radioactive elements (uranium, thorium, potassium-40) within the sample and its surroundings, which are, in turn, converted into dose rates using standard conversion factors and formulae. Contribution of cosmic rays is also determined. There are different methods for obtaining concentrations of radioactive elements such as γ -Spectrometer, ICP Mass Spectrometer, Neutron Activation, α counting and flame photometry.

Thermoluminescence dating began in 1960- 1970, with age determination of pottery and other fired material in archeology and then it was employed in the other science such as paleoseismology, paleoclimatology, geology, archeology and geography.

Iran is an ancient country which is located on the belt of earthquake, so most of ancient monuments and old civilizations have been destroyed by earthquake or other natural disasters. Dating can be a device to relate paleoseismology, paleoclimatology and archeology in Iran. Therefore, having knowledge of dating methods, especially luminescence, is so important for experts in geography, archeology, geology, seismology students and etc.

In addition to an introduction to TL dating, this study has dated five potteries from

Iran national museum in a range of 1000 to 4000 years.

Key words: Dating, Thermoluminescence, Equivalent dose, Dose rate

۱ مقدمه

گرمالیانی جزء جدایی ناپذیر روش‌های پژوهشی در باستان‌شناسی است.

در این تحقیق ضمن مروری بر اصول سن یابی به روش گرمالیانی، به تعیین سن نمونه‌های سفالی موزه ملی ایران، شامل نمونه پیکرک‌های سفالی در حال عبادت روی یک صفحه به شماره ثبت ST 117، ریتون سفالی به شکل سر شیر به شماره ثبت ST 338، کوزه بزرگ تخم مرغی شکل به شماره ثبت G.M.8509، از ریتون سفالی به شکل سر اسب به شماره ثبت ST 119 و یک شی سفالی به صورت آب پاش به شماره ثبت POT 609 پرداخته می‌شود.

۲ اصول سن یابی به روش گرمالیانی

همه مواد تحت تاثیر تابش یونیده کننده هستند. این تابش از واپاشی عنصرهای پرتوزا مانند اورانیم، توریم، پتاسیم و روییدیم موجود در خود مواد و در محیط اطرافشان، به علاوه تابش‌های کیهانی سرچشمه می‌گیرد. در طبیعت مواد معدنی به وفور یافت می‌شوند. برخی مواد معدنی مانند کوارتز و فلدسپار به صورت طبیعی دارای نقایص بلوری هستند. نقص‌های (Defect) بلوری در شبکه - که شامل خلا (محل خالی یک یون در شبکه)، اتم‌های درون شبکه‌ای و ناخالصی‌های جانشینی است - درحکم تله برای الکترون (T) و حفره (L) عمل می‌کنند (شکل ۱).

هنگامی که کوارتزها یا فلدسپارها تحت تابش یونیزه کننده قرار می‌گیرند، اتم‌های آنها یونیزه می‌شود و بعضی الکترون‌ها از اتم جدا و آزاد می‌شوند. الکترون آزاد شده در طول این فرایند از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌رود. در همین زمان، برای حفظ تعادل بار، حفره ای در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود که دارای کمبود الکترون است و به آن مرکز درخشایی می‌گویند (فلمنگ، ۱۹۷۹).

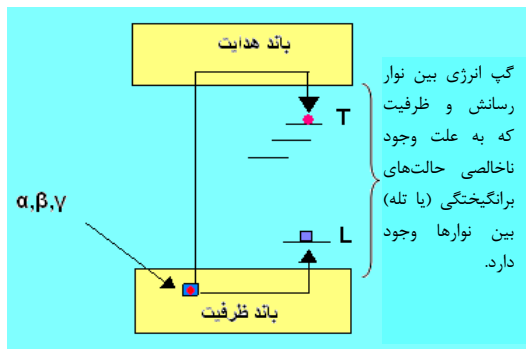
با توجه به نیمه‌خشک بودن ایران، سن یابی به روش گرمالیانی روش مناسبی در تعیین سن رسوبات، خاک و هر آنچه از خاک ساخته شده باشد، است. زیرا اولاً برخلاف روش رادیو کربن، در سن یابی نیاز به مواد آلی ندارد و ثانیاً در روش رادیو کربن حداکثر سن محدود به حدود ۴۰ تا ۵۰ هزار سال است درحالی که در روش گرمالیانی حداکثر سن آن ممکن است تا بالای یک میلیون سال گسترش یابد.

گرمالیانی یکی از شاخه‌های سن یابی به روش درخشایی است که در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به دودلیل روش مناسبی در سن یابی سفال‌ها است. یکی اینکه درصد خطای کمی (۵ تا ۱۰ درصد) دارد دیگر اینکه توانایی تعیین سن با استفاده از میزان ناچیز نمونه (درحد میلی گرم) را دارد. به همین دلیل گرمالیانی، به منزله روشی دقیق و مطمئن، مورد توجه پژوهشگران، به خصوص باستان‌شناسان قرار گرفته است.

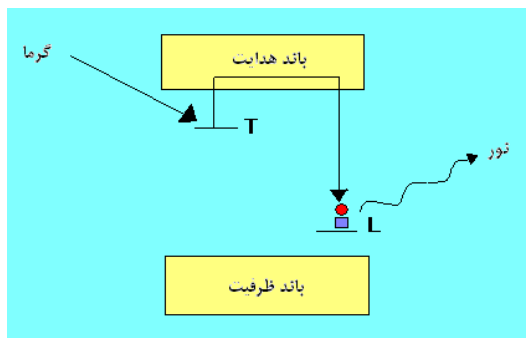
موضوع تعیین اصالت ظروف سفالین، از دیر باز مورد توجه و نیاز باستان‌شناسان بوده است لیکن متأسفانه تا حدود نیم قرن پیش امکان سن یابی مستقیم و مطلق سفال‌ها وجود نداشت. اولین بار امکان سن یابی نمونه‌های سفالی با استفاده از گرمالیانی از سوی گرگلر و همکاران (۱۹۶۰) و کندی و نیف (۱۹۶۰) مطرح شد (مارتینی و سیبیلیا، ۲۰۰۱) و سپس گروه پژوهشگران دانشگاه آکسفورد به سرپرستی مارتین آیتکن، با به انجام رساندن صدها مورد سن یابی و تعیین قدمت سفال، آجر، کاشی و عرضه روش‌های گوناگون نمونه‌سازی، اصول سن یابی گرمالیانی را به منظور تعیین سن ساخت مواد سرامیکی عرضه کردند.

همراه با رشد علم و فناوری، روش شناسی سن یابی به روش گرمالیانی نیز گسترش یافت. امروزه سن یابی

انرژی حاصل از تابش‌های یونیده کننده دوباره آغاز می‌شود، ساعت درخشایی شروع به کار می‌کند و در طول سال‌ها این میدان تابشی باعث انباشته شدن الکترون‌های به تله افتاده در ماده معدنی می‌شود. حال اگر این نمونه به منظور سن‌یابی در آزمایشگاه تحت گرما قرار گیرد، در اثر این گرما انرژی تابشی ذخیره شده به صورت نور آزاد می‌شود.



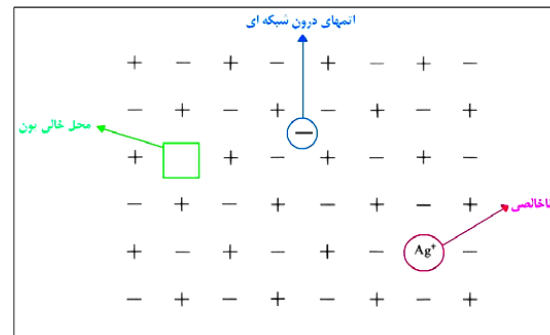
(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) در مواد معدنی، تابش یونیده کننده حاصل از واپاشی عنصرهای پرتوزا باعث می‌شود تا الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش برود و در نتیجه یک حفره در نوار ظرفیت ایجاد شود. الکترون در نوار رسانش و حفره در نوار ظرفیت پایدار نیست، در نتیجه در تله T و L به تله می‌افتند. (ب) در اثر گرما، الکترون از تله T به نوار رسانش می‌رود ولی در آنجا پایدار نیست و به تراز انرژی پایین‌تر سقوط می‌کند. در نتیجه با حفره به تله افتاده ترکیب مجدد می‌شود و یک فوتون گسیل می‌کند.

با استفاده از شدت نور گرمالیانی می‌توان مقدار تابش کلی جذب شده در سفال پس از پخت آن در کوره را که همان مقدار معادل (مقدار طبیعی) (Equivalent Dose) است



شکل ۱. نقص‌های بلوری موجود در شبکه بلوری (با اقتباس از آیتکن، ۱۹۸۵).

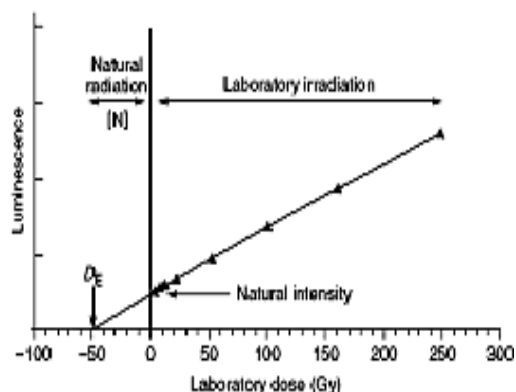
از آنجا که الکترون و حفره در نوار رسانش و ظرفیت ناپایدارند، الکترون‌ها در داخل اتم حرکت می‌کنند تا در نهایت در تله‌های الکترونی اسیر می‌شوند. حفره‌ها نیز در تله حفره‌ای گرفتار می‌شوند (شکل ۲-الف). تعداد الکترون‌های به تله افتاده متناسب با مدت و شدت در معرض تابش قرار گرفتن است (فتاحی، ۲۰۰۳).

وقتی ماده معدنی تحت تاثیر گرمای شدید قرار می‌گیرد، به الکترون‌های به تله افتاده انرژی کافی برای رهایی داده می‌شود. الکترون‌های آزاد شده به تراز پایین سقوط کرده و با حفره‌ها ترکیب مجدد می‌شوند و انرژی اضافی به صورت فوتون گسیل می‌شود (شکل ۲-ب). فوتون‌های حاصل نور بسیار ضعیفی تولید می‌کنند که درخشایی نام دارد. با توجه به این که این نور در اثر گرم کردن نمونه گسیل شده است به آن گرمالیانی می‌گویند.

شدت نور گسیل شده متناسب با تعداد جفت الکترون/حفره به تله افتاده که آزاد شده‌اند و در نتیجه متناسب با مقدار انرژی جذب شده (مقدار تابشی انباشته شده) حاصل از تابش یونیده کننده است.

در مورد سفال، هنگام پخت آن در کوره تا دمای بیش از 400°C ، بیشتر تله‌های الکترونی به طور موثر خالی می‌شوند و نمونه، همه گرمالیانی را که قبلاً اندوخته بود، از دست می‌دهد. می‌توان گفت ساعت گرمالیانی روی صفر قرار می‌گیرد. پس از سرد شدن نمونه سفالی، فرایند ذخیره

آلفا، بتا و گاما حاصل از آنها را بدست می‌آوریم. میزان پرتوهای کیهانی نیز محاسبه می‌شود. نرخ مقدار از مجموع میزان پرتوهای آلفا، بتا و گاما به‌علاوه پرتوهای کیهانی به‌دست می‌آید.



شکل ۳. روش مقدار افزایشی در تعیین مقدار معادل (واکر، ۲۰۰۵).

روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری این مورد مهم به کار می‌رود که استفاده از دستگاه طیف‌سنج گاما، ICP Mass Spectrometer، فعال‌سازی نوترونی، کپسول، شمارش آلفا و نورسنجی شعله از جمله آنها هستند

۳ مراحل سن یابی

به‌منظور آماده‌سازی نمونه، از روش ریزدانه استفاده شد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از مته مخصوص مقداری پودر از لایه‌های داخلی نمونه خارج شد. برای جداسازی دانه‌های در اندازه $9-1 \mu\text{m}$ ، نمونه پودر شده با استون شسته شد. با توجه به اینکه امکان دارد ذرات نمونه به هم چسبیده باشند، از اولتراسونیک استفاده شد تا این ذرات از هم جدا و تک‌تکشان کاملاً به استون یا اسید آغشته شوند. همچنین برای جدا کردن استون یا اسید از نمونه از دستگاه گریز از مرکز استفاده شد. به منظور حذف کربنات‌ها، به نمونه استیک اسید ۵٪ اضافه شد. بعد از آن نمونه با آب مقطر شسته شد تا اثر اسید از بین برود. نمونه دوباره

تعیین کرد. با توجه به اینکه مقدار معادل متناسب با سن است، از تقسیم آن بر مقدار انباشته شده در هزار سال که همان نرخ مقدار است، می‌توان سن را تعیین کرد:

$$\text{نرخ مقدار (Gy/Ka)} / \text{مقدار معادل (Gy)} = \text{سن (Ka)}$$

بنابراین به منظور سن یابی به روش گرمالیانی ضروری است مقدار معادل و نرخ مقدار محاسبه شود.

۱-۲ مقدار معادل

برای اندازه‌گیری مقدار معادل دو روش وجود دارد: (۱) روش مقدار افزایشی (۲) روش تولید مجدد. در این تحقیق از روش اول استفاده شده است.

۱-۱-۲ روش مقدار افزایشی:

در این روش، از هر نمونه تعدادی صفحه تهیه می‌شود. چند صفحه برای اندازه‌گیری سیگنال گرمالیانی طبیعی (N در شکل ۳) بکار می‌رود. بقیه صفحه‌ها به چند دسته تقسیم می‌شوند و به هردسته مقدارهای تابش آزمایشگاهی متفاوت داده و سیگنال گرمالیانی مربوط به هر مقدار اندازه‌گیری می‌شود. نمودار شدت سیگنال درخشایی برحسب مقدار تابش آزمایشگاهی رسم و نقاطی که مبین سیگنال درخشایی با مقدار داده شده است، روی نمودار تعیین می‌شود. با برازش یک منحنی روی این نقاط، نموداری حاصل می‌شود که به آن نمودار پاسخ-مقدار نمونه (منحنی رشد (Growth Curve)) می‌گویند (واکر، ۲۰۰۵).

با برون‌یابی منحنی پاسخ-مقدار و تقاطعش با محور مقدار، مقدار انباشته شده بعد از رویداد صفرشدگی (D_E) را می‌توان یافت (شکل ۳).

۲-۲ نرخ مقدار

به‌منظور اندازه‌گیری نرخ مقدار، ابتدا میزان مواد پرتوزای موجود در خود نمونه و محیط اطراف آن را اندازه می‌گیریم و سپس از روی غلظت این مواد میزان پرتوهای

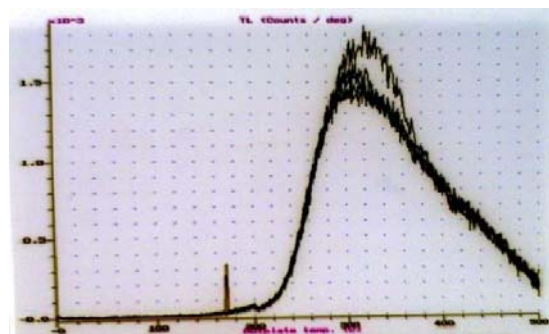


شکل ۵. دستگاه اندازه‌گیری گرمالیانی ELSEC.

الکترون‌هایی که در تله‌های سطحی قرار گرفته‌اند، در اثر گرمای محیط (ظرف چند روز) از این تله‌ها خارج می‌شوند. به این تله‌ها ناپایدار می‌گویند. در سن‌یابی، تله‌های پایداری که می‌توانند الکترون‌ها را تا میلیون‌ها سال در خود نگه دارند، مورد توجه هستند. لذا در روش مقدار افزایشی، اولین گام مشخص کردن پایداری گرمایی نمونه است. بنابراین در آزمایشگاه به‌منظور سنجش پایداری گرمایی و قبل از اندازه‌گیری مقدار معادل، ابتدا Plateau test یا آزمون افقی بودن صورت می‌گیرد تا محدوده پایدار نمونه‌ها از نظر دمایی تعیین شود. به‌منظور عملی ساختن این آزمون، از یک الیکوت برای اندازه‌گیری گرمالیانی طبیعی استفاده شد و به الیکوت دیگری مقدار آزمایشگاهی داده (لذا دارای مقدار طبیعی به‌علاوه مقدار آزمایشگاهی شد) و گرمالیانی حاصل اندازه‌گیری شد. سپس نمودار نسبت پاسخ گرمالیانی طبیعی و گرمالیانی حاصل از مقداردهی در آزمایشگاه به نمونه طبیعی برحسب دما رسم شد (این نمودار با استفاده از نرم‌افزارهای نصب شده روی خود دستگاه رسم می‌شود). محدوده دمایی که در آن این نسبت به صورت خط افقی است، یعنی ناحیه دمایی که درخشایی طبیعی پایدار است، درحکم محدوده پایدار دمایی، تعیین شد و اندازه‌گیری‌های شدت نور گرمالیانی در آن محدوده صورت گرفت. یک الیکوت از دسته اول، پس از قرار گرفتن روی صفحه نیکرومی درون کوره و در محیط گاز نیتروژن تا 50.0°C حرارت داده

با استون شستشو داده شد تا هم اثر آب مقطر از بین برود و هم اینکه اگر مواد آلی در آن باقی مانده باشد، حذف شود. پس از به‌انجام رسیدن عملیات بالا، باقی‌مانده که دانه‌بندی آن در محدوده $9-1\ \mu\text{m}$ است، در اندازه‌های مساوی درون لوله‌های کوچکی با ته صاف که در انتهای آنها یک صفحه آلومینیمی نازک قرار دارد، ریخته شد. استون در دمای 50°C تبخیر می‌شود و حدود $1\ \text{mg}/\text{cm}^3$ از نمونه پودری شکل که به‌طور یکنواخت روی صفحه پخش شده است، باقی می‌ماند. به مجموعه صفحه آلومینیمی و پودر آن الیکوت گفته می‌شود.

بعد از آماده شدن الیکوت‌هایی از هر ۵ نمونه، عملیات سن‌یابی آغاز شد. الیکوت‌ها به چند گروه تقسیم شدند. به گروه اول هیچ مقدار آزمایشگاهی داده نشد یعنی فقط دارای مقدار طبیعی (N) هستند (شکل ۴). به گروه دوم از الیکوت‌ها به میزان β_1 مقداردهی شد یعنی آنها دارای مقدار $N + \beta_1$ شدند. به گروه سوم مقدار β_2 داده شد که در نتیجه دارای مقدار $N + \beta_2$ شدند. به گروه سوم مقدار β_3 داده شد که دارای مقدار $N + \beta_3$ شدند. لازم به ذکر است که $\beta_3 > \beta_2 > \beta_1$ است. اندازه‌گیری‌های گرمالیانی با استفاده از دستگاه ELSEC به‌انجام رسید (شکل ۵). مقدار پرتوزا، با استفاده از منبع بتای استرنسیم-۹۰ به نمونه‌ها داده شد.



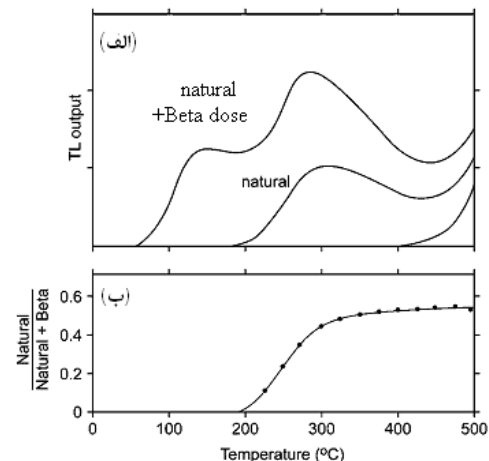
شکل ۴. نمودار درخشش طبیعی نمونه ST 117.

تابش جسم سیاه برای یک صفحه بعد از اندازه‌گیری گرمالیانی، اندازه‌گیری می‌شود. (ب) نسبت دو سیگنال در (a) نشان می‌دهد که برای سیگنال‌ها یک پلاتو به بیش از 300°C می‌رسد. زیر این دما، بعضی الکترون‌های به تله افتاده تولید کننده سیگنال گرمالیانی در مدت ۳۰ هزار سال گذشته از بین رفته است (زیمرمن و هاگستبل، ۱۹۷۱).

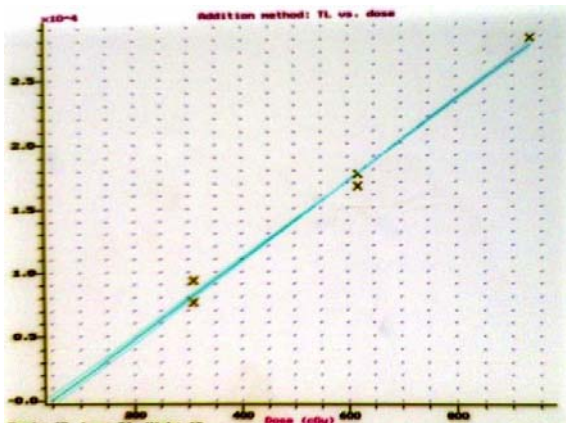
سیگنال درخششی با افزایش مقدار پرتو افزایش می‌یابد زیرا در اثر دادن پرتو به نمونه، الکترون‌های آزاد شده از راه یونش، در نقص‌های موجود در شبکه بلوری به تله می‌افتند. وقتی میزان مقدار پرتو داده شده به نمونه افزایش می‌یابد، الکترون‌های بیشتری به تله می‌افتند. در نتیجه انرژی بیشتری در نمونه ذخیره شده، شدت نور گرمالیانی گسیل شده از آن بر اثر حرارت نیز بیشتر می‌شود و به اصطلاح رشد آن خطی است (وینتل، ۱۹۹۷). علی‌رغم مطالب گفته شده در خصوص چگونگی رشد منحنی پاسخ-مقدار، گاهی اوقات انحراف‌هایی در این رفتار وجود دارد. تحقیقات پیشین سفال روشن ساخت که رشد اولیه گرمالیانی با مقدار اغلب فراخطی است و باعث می‌شود که منحنی‌های پاسخ-مقدار برای نمونه‌های گرم شده از مبدا نگذرد (فلمینگ، ۱۹۷۰). در این حالت، در محدوده انرژی‌های کم، شدت نور گرمالیانی اندازه‌گیری شده، متناسب با انرژی ذخیره شده در نمونه نیست بلکه کمتر از حدی است که به طور نظری مورد انتظار است و مدتی طول می‌کشد تا این دو با هم متناسب شوند (بحرالعلوم، ۱۳۷۸). به عبارت دیگر، در مقدارهای کم و برای مدت زمانی کوتاه، میزان افزایش شدت گرمالیانی و مقدار یکسان نیست. در نتیجه رابطه شدت گرمالیانی با مقدار پرتو دریافت شده نمونه، خطی نیست. علت این امر آن است که حساسیت بعضی از نمونه‌ها به مقدارهای کم، کم است یعنی مثلاً اگر مقدار به اندازه یک واحد اضافه شود، انتظار می‌رود که شدت نیز به ۱ واحد افزایش یابد ولی در اینجا افزایش شدت گرمالیانی کمتر است.

شدند. نور گسیل شده از نمونه با استفاده از نورسنج موجود در دستگاه اندازه‌گیری گرمالیانی آشکار می‌شود. این دستگاه به رایانه متصل است و با استفاده از سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مناسب، نمودار شدت نور گرمالیانی گسیل شده در دماهای متفاوت، برحسب دما (نمودار درخشش) ثبت شد (بحرالعلوم، ۱۳۷۸).

پس از اندازه‌گیری گرمالیانی طبیعی یک الیکوت، همان الیکوت دوباره حرارت داده شد و نمودار سیگنال گداختگی زمینه اندازه‌گیری شد. با کم کردن این دو نمودار از هم، نمودار درخششی که نشان‌دهنده مقدار انرژی ذخیره شده در جسم است، به دست آمد. این عمل برای سایر الیکوت‌های گروه اول به انجام رسید و بدین ترتیب سیگنال درخششی طبیعی به دست آمد. سپس گرمالیانی نمونه‌های پرتو داده شده با منبع بتا نیز به همین نحو اندازه‌گیری و نمودار درخشش آنها ثبت شد. از آنجا که انرژی چشمه بتا مشخص است، با مقایسه شدت نور گرمالیانی طبیعی با شدت نور گرمالیانی طبیعی به علاوه مقدار پرتو بتا (شکل ۶) و رسم منحنی پاسخ مقدار میزان مقدار معادل تعیین شد.



شکل ۶. (الف) نمودارهای درخشش گرمالیانی؛ یعنی سیگنال‌ها برحسب یک تابع از دما وقتی با نرخ 20°C/S گرم شدند اندازه‌گیری شدند. یک صفحه گرمالیانی طبیعی را می‌دهد و به صفحه دیگر مقدار اضافی بتا داده می‌شود. همچنین نشان داده شده است که



شکل ۸. منحنی پاسخ-دوز نمونه ST 117 جهت تعیین محدوده فراطبیعی.

به منظور آزمون نشت سیگنال، صفحه‌هایی از هر نمونه که با منبع بتا به آنها مقدار معین پرتو بتا داده شده بود، یک ماه قبل از اندازه‌گیری انبار و سپس سیگنال آنها اندازه‌گیری شد. این سیگنال با سیگنالی که فوراً بعد از پرتو دهی اندازه‌گیری شده بود، مقایسه شد. هیچ کاهش در شدت نور گرمالیانی در طول انبار کردن نمونه‌ها مشاهده نشد. در نتیجه می‌توان گفت که در هیچ یک از نمونه‌ها پدیده نشت سیگنال مشاهده نشد.

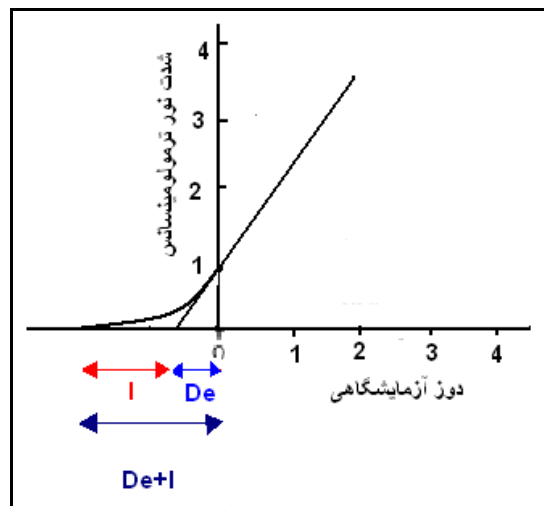
در این تحقیق، برای محاسبه غلظت اورانیم و توریم موجود در خود نمونه سفال از شمارشگر آلفا و برای تعیین درصد پتاسیم، از نورسنجی شعله‌ای استفاده شد.

با توجه به اینکه، از نمونه‌های مورد بررسی در موزه نگه‌داری می‌شد، امکان تعیین میزان مواد پرتوزا موجود در محل کشف نمونه ممکن نبود و در محاسبات از نتایج تجربی منطبق با شرایط ایران استفاده شد که این مقدار برابر با 1 Gy/Ka فرض می‌شود. همچنین نرخ پرتوهای کیهانی، 0.15 Gy/Ka در نظر گرفته شد.

در عین حال شدت نور گرمالیانی گسیل شده از نمونه‌هایی که فقط تحت تاثیر پرتوهای α قرار گرفته‌اند، در شرایط انرژی‌های یکسان، بسیار کمتر از شدت

در نتیجه پدیده فراطبیعی رخ می‌دهد. همین امر باعث ایجاد خطا در تعیین مقدار معادل به روش مقدار افزایشی می‌شود. بدین ترتیب که در روش مقدار افزایشی، پاسخ نمونه به مقدارهای کم را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد و با برون‌یابی کردن، به صورت یک خط صاف در نظر گرفته می‌شود در حالی که در واقعیت چنین نیست (شکل ۷).

به منظور تعیین محدوده فراطبیعی، از روش تولید مجدد استفاده شد. بدین منظور، صفحه‌ای از نمونه یک بار گرم شد تا گرمالیانی طبیعی‌اش خارج و در واقع صفر شود، سپس به این صفحه، مقدارهای متفاوت داده و شدت گرمالیانی آن اندازه‌گیری شد. منحنی پاسخ-مقدار آن رسم و سپس خط مستقیمی به آن برازش شد (شکل ۸). فاصله بین محل تقاطع خط مستقیم برازش شده تا مبدا، محدوده انرژی است که در آن پدیده فراطبیعی بودن واقع شده است. این محدوده، I نامیده می‌شود. این مقدار I با مقدارهای معادل اندازه‌گیری شده به روش مقدار افزایشی جمع می‌شود تا مقدار معادل واقعی به دست آید.



شکل ۷. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مقدار معادل واقعی، $De+I$ است در حالی که در روش مقدار افزایشی در اثر برون‌یابی، اندازه این مقدار، De در نظر گرفته می‌شود یعنی به اندازه I خطا وجود دارد.

جدول ۱. نتایج سن یابی به روش گرمالیانی ۵ نمونه از موزه ملی مطرح شده در این گزارش.

نام نمونه	مقدار معادل (Gy)	نرخ مقدار (Gy/Ka)	سن (y)
ST 117	۱۴/۶۱	۱۳/۲۸	۱۱۰۰±۷۵
POT 609	۲۳/۴۰	۶/۳۲	۳۷۰۰±۳۰۰
ST 339	۲۱/۸۸	۱۱/۵۲	۱۹۰۰±۱۲۰
ST 119	۱۵	۸/۴۳	۱۷۸۰±۱۳۰
G.M.8509	۱۰/۷	۷/۲۸	۱۴۷۰±۶۰

۴ بحث و نتیجه گیری

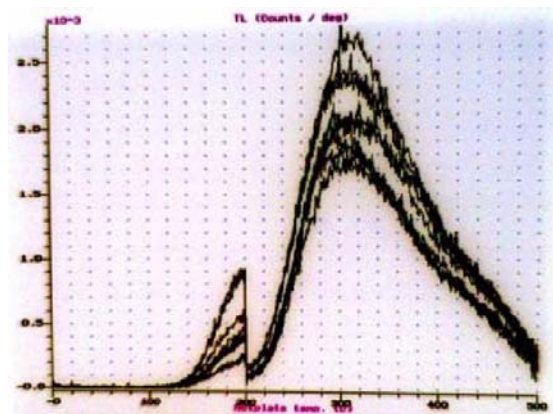
از روش گرمالیانی در سن یابی ۵ نمونه سفالی موزه ملی ایران استفاده شد. خطاهای ایجاد شده در سن یابی گرمالیانی، بیشتر ناشی از قدیمی بودن امکانات موجود در این آزمایشگاه و همچنین وابسته به خطاهای اندازه گیری نرخ مقدار است. البته همه این خطاها تصحیح می شود ولی میزان خطا نسبت به سایر آزمایشگاه های گرمالیانی که به سن یابی سفال می پردازند، بیشتر است. حداکثر خطا در سن یابی سفال به روش گرمالیانی، ۵٪ است ولی در آزمایشگاه گرمالیانی پژوهشکده حفاظت و مرمت، ۷-۸٪ است که گاهی اوقات نیز به ۱۰-۱۲٪ می رسد. این خطای زیاد در باستان شناسی هنگام سن یابی وقایع نزدیک به هم مناسب نیست.

سن به دست آمده برای نمونه ST 117 حاصل از پیکره های سفالی در حال عبادت بر روی یک صفحه مدور ۱۱۰۰±۷۵ سال، نمونه ST 338 حاصل از ریتون سفالی به شکل سر شیر ۱۹۰۰±۱۲۰، نمونه G.M.8509 حاصل از کوزه بزرگ تخم مرغی شکل ۱۴۷۰±۶۰ سال، نمونه ST 119 حاصل از ریتون سفالی به شکل سر اسب ۱۷۸۰±۱۳۰ سال و نمونه POT 609 حاصل از یک شی سفالی به صورت آب پاش ۳۷۰۰±۳۰۰ سال بود. با توجه به سن های به دست آمده، تشخیص داده شد که نمونه ها اصل هستند.

نور گرمالیانی گسیل شده از نمونه هایی است که فقط تحت تاثیر پرتوهای β قرار گرفته اند زیرا پرتوی α ، تله های گرمالیانی را به علت احتمال یونش زیادش اشباع می کند. بنابراین فقط ۱۵-۱۰٪ از α منجر به مقدار گرمالیانی می شوند. به همین دلیل حساسیت نمونه در برابر پرتوهای α جداگانه اندازه گیری می شود و با تقسیم مقدار معادل بتا بر مقدار معادل آلفا، ضریب K به دست می آید (بحرالعلومی، ۱۳۷۸).

بدین منظور، به چندین صفحه از نمونه مورد نظر، مقدارهای متفاوت آلفا داده شد و نمودار درخشش آنها به دست آمد (شکل ۹). سپس منحنی پاسخ-مقدار افزایشی آن رسم شد و از آنجا، مقدار معادل حاصل از تابش آلفا ($Q\alpha$) تعیین شد. به همین منوال، به چندین صفحه دیگر از نمونه، مقدارهای متفاوت بتا داده و مقدار معادل حاصل از بتا ($Q\beta$) اندازه گیری شد. مقدار K، از تقسیم $Q\beta$ بر $Q\alpha$ ($K=Q\beta/Q\alpha$) محاسبه می شود. از این K در تعیین نرخ مقدار سالانه استفاده می شود یعنی در رابطه $\{D\alpha + D\beta + D\gamma + Dc = D\alpha + D\beta + D\gamma + Dc\}$ به جای $D\alpha$ ، $D\alpha$ قرار داده می شود.

با اندازه گیری مقدار معادل و نرخ مقدار، سن ها محاسبه شد. نتایج سن یابی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۹. نمودار درخشش حاصل از دادن مقدار α به نمونه POT 609 به منظور تعیین مقدار K.

منابع

- بحرالعلومی، ف.، ۱۳۷۸، روش‌های سالیابی در باستان‌شناسی. انتشارات سمت.
- Aitken, M. J., 1985, Thermoluminescence Dating, London, Academic Press.
- Fattahi, M., 2009, Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods, A review, Quaternary International.
- 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., 2003, Recent Developments in the Techniques of Luminescence Dating, Iranian Ins. J. Sci. **4**(1), 57-72.
- Fleming, S. G., 1979, Thermoluminescence Techniques Archaeology, Clarendon Press, Oxford.
- Fleming, S. J., 1970, Thermoluminescent Dating, refinement of the quartz inclusion method, Archaeometry, **12**, 133–147.
- Martini, M. and Sibilina, E., 2001, Radiation in archaeometry, Archaeological Dating, Radiation Physics and Chemistry **61**, 241–246.
- Walker, M., 2005, Quaternary Dating Methods, Department of Archaeology and Anthropology University of Wales, Lampeter, UK.
- Wintle, A. G., 1997, Luminescence Dating, Laboratory Procedures And Protocols, Radiation Measurements, **27**(5/6), 769-817.
- Zimmerman, D. W. and Huxtable, J., 1971, Thermoluminescent dating of Upper Palaeolithic fired clay from Dolni Vestonice, Archaeometry, **13**, 53–7.