

## ارزیابی مدل‌های آماری در سن‌یابی به روش لومینسانس: مطالعه موردی ترانشه ایرا

مریم حیدری<sup>۱</sup> و مرتضی فتاحی<sup>۲\*</sup>

یادداشت تحقیقاتی

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

۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۶/۱۰، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

## چکیده

دز معادل دز طبیعی مهم‌ترین پارامتر سن‌یابی نوری است که باید برای هر یک از الیکوت‌های یک نمونه محاسبه شود. با توجه به شرایط تشکیل رسوب از جمله صفرشدگی کامل یا صفرشدگی ناقص، مجموعه دزهای معادل به‌دست‌آمده می‌توانند از یکپارچگی یا پراکندگی برخوردار باشند. برای هر یک از این حالت‌ها مدل‌های آماری سن‌یابی معرفی شده است که محاسبه دز جذب‌شده در طول زمان دفن و به دنبال آن محاسبه سن نمونه را از مجموعه دزهای طبیعی ممکن می‌کند. در این مقاله به بررسی دو مدل رایج آماری سن‌یابی، یعنی مدل سن مرکزی ((Central Age Model (CAM) و مدل کمترین سن ((Minimum Age (MAM) Model) پرداخته می‌شود. مدل CAM برای نمونه‌های همگن با صفرشدگی کامل استفاده می‌شود که دزهای معادل به‌دست‌آمده از آن‌ها از نزدیکی کافی به هم برخوردارند و مدل MAM برای نمونه‌ها با صفرشدگی ناقص استفاده می‌شود که دزهای معادل نسبت به هم پراکندگی شایان توجهی دارند و برای به‌دست‌آوردن سن درست نمونه روی کمترین دزها متمرکز می‌شود. نمونه‌های مورد مطالعه در این مقاله از ترانشه ایرا که در زون ارتباطی دو گسل مشا و شمال تهران قرار دارد، استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: سن‌یابی رخشانی نوری، مدل سن‌یابی مرکزی، مدل سن‌یابی کمترین سن، روش بازتولید الیکوت منفرد (سار)، نمودار شعاعی، صفرشدگی ناقص.

## ۱. مقدمه

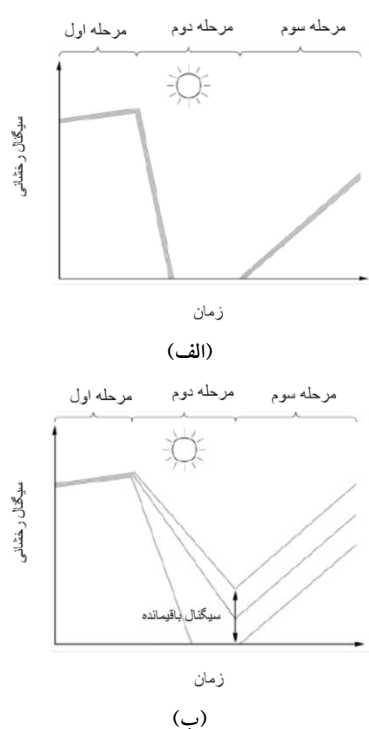
برای به دست آوردن  $D_B$  یک نمونه به شرح زیر عمل می‌شود:

معمولاً تعداد زیادی دانه (ده‌ها تا صدها دانه) بر روی یک دیسک فلزی چسبانده می‌شود که الیکوت نام دارد. سپس برای هر یک از الیکوت‌ها در آزمایشگاه دز معادل دز طبیعی (equivalent dose) که با  $D_e$  نشان داده می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه  $D_e$  معمولاً از پروتکلی تحت عنوان بازتولید الیکوت منفرد (Single - Aliquot Regenerative dose) که به‌طور مخفف با سار (SAR) معرفی شد، استفاده می‌شود (ماری و وینتل، ۲۰۰۰). با استفاده از این پروتکل برای هر نمونه مجموعه‌ای از  $D_e$  به دست می‌آید (وینتل و ماری ۲۰۰۶) که به کمک آن‌ها  $D_B$  محاسبه می‌شود. الیکوت‌ها به دلایل گوناگون  $D_e$  های مختلفی را تولید می‌کنند و نحوه توزیع آن‌ها در محاسبه  $D_B$  به دلایلی که بعداً توضیح داده خواهد شد (بخش سوم) بسیار مهم است. از عواملی که سبب ایجاد

سن‌یابی نوری روشی مناسب برای تعیین سن رسوبات کواترنری است که در دو دهه اخیر استفاده شده است (دالر، ۲۰۰۸). کانی‌هایی چون کوارتز و فلدسپار که در رسوبات موجودند، با دریافت انرژی از عناصر رادیواکتیو موجود در طبیعت از جمله اورانیوم و توریم می‌توانند سیگنال رخشانی (luminescence) انباشته کنند که از آن می‌توان برای تعیین سن نمونه استفاده کرد (ایتکن، ۱۹۸۵). با اندازه‌گیری دزی که نمونه در مدت زمان دفن از مواد رادیواکتیو اطراف خود جذب می‌کند (burial dose) که با  $D_B$  نمایش داده می‌شود و همچنین دز جذب‌شده در واحد زمان یعنی نرخ دز (dose rate) که با  $D_r$  نمایش داده می‌شود، می‌توان سن نمونه را به کمک رابطه (۱) به دست آورد (دالر و همکاران، ۱۹۹۹؛ ایتکن، ۱۹۹۸).

$$(1) \quad \text{میزان دز جذب شده در زمان دفن } (D_B) = \frac{\text{نرخ دز } (D_r)}{\text{سن نمونه}}$$

دانه‌های کوارتز (یا فلدسپار) می‌تواند سبب تفاوت در مقدار سیگنال رخشانی دانه‌ها شود (قدر و همکاران، ۲۰۰۶). پس با توجه به نحوه تشکیل رسوبات و سایر عوامل گفته شده،  $D_e$  های به دست آمده از یک نمونه می‌توانند به هم نزدیک یا از هم دور باشند. برای تفسیر نحوه پراکندگی داده‌ها، از مدل‌های سنی آماری استفاده می‌شود. در این مقاله به کمک بحث‌های آماری به شرح دو مدل مطرح سنی یعنی CAM و MAM پرداخته می‌شود.



پراکندگی یا تراکم  $D_e$  ها می‌شود، مدت زمان نور خوردگی در حین تشکیل رسوب است که از آن با نام صفرشدگی کامل یا صفرشدگی ناقص تعبیر می‌شود (اولی و همکاران، ۲۰۰۴؛ دالر، ۲۰۰۸). وقتی دانه‌های حاوی سیگنال رخشانی در معرض تابش کافی نور قرار می‌گیرند، همه سیگنال آن‌ها خارج می‌شود؛ بنابراین وقتی تشکیل رسوب می‌دهند ساعت زمانی‌شان صفر است. پس از تشکیل رسوب، ذخیره شدن سیگنال رخشانی در آن‌ها شروع می‌شود و بنابراین سنی که بعداً از آن‌ها به دست می‌آید، سن درست زمان تشکیل رسوب خواهد بود؛ این حالت را صفرشدگی کامل می‌نامند (شکل ۱-الف). از جمله این رسوبات می‌توان به رسوبات بادی اشاره کرد چون معمولاً امکان نور خوردگی کافی برای آن‌ها وجود دارد و پیچیدگی‌های محیط‌های رودخانه‌ای را ندارند. اما اگر زمان نور خوردگی به حد کافی نباشد، همه سیگنال رخشانی خارج نمی‌شود و بنابراین مقداری در دانه باقی می‌ماند. چنین دانه‌هایی وقتی تشکیل رسوب بدهند سنی بیشتر از سن زمان دفن را نشان خواهند داد (اولی و همکاران، ۱۹۹۹)، مثل رسوبات حاصل از سیل و آبرفت‌ها که به علت وجود آب‌های تیره حاصل از گل ولای به طور کامل تحت تابش نور قرار نمی‌گیرند و ساعت زمانی همه دانه‌های آن‌ها صفر نمی‌شود؛ به این حالت صفرشدگی ناقص گفته می‌شود که خود به دو گروه تقسیم می‌شود (دالر، ۲۰۰۸).

گروه اول مربوط به رسوباتی است که همگی دانه‌ها به یک اندازه تحت تابش نور خورشید واقع شده‌اند اما زمان نور خوردگی برای صفرشدگی کامل، کافی نبوده است و گروه دوم رسوباتی هستند که دانه‌های مختلف به اندازه‌های مختلفی تحت تابش نور خورشید واقع شده‌اند که در نتیجه سیگنال رخشانی با مقادیر مختلف (با توجه به زمان نور خوردگی هر دانه) در آن‌ها باقی می‌ماند (شکل ۱-ب) (ریتنور، ۲۰۰۸؛ رودنایت، ۲۰۰۶).

علاوه بر آن عواملی چون نایکنواختی دز رادیواکتیو برای دانه‌های مختلف و تفاوت در خصوصیات رخشانی

توسط دالر استفاده شد (دالر، ۱۹۹۱). سپس ماری و وینتل از آن برای دانه‌های کوارتز بهره گرفتند (ماری و وینتل، ۲۰۰۰). در این روش در آزمایشگاه ابتدا سیگنال رخشانی طبیعی (Natural Luminescence Signal) اندازه گرفته می‌شود. سپس با تاباندن دزهای مختلف رادیواکتیو به الیکوت‌ها، سیگنال رخشانی متناسب با هر دز اندازه‌گیری می‌شود. به هر یک از این دزها دز بازتولید (Regenerative Dose) گفته می‌شود. اما چون بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته امکان تغییر سیگنال رخشانی تولید شده توسط دز ثابت در هر مرحله وجود دارد، با تابش دز رادیواکتیو با مقدار کم بعد از هر مرحله تابش دز بازتولید، این تغییر بررسی می‌شود. این دز با مقدار کم، تست دز (Test Dose) نام دارد که به اصطلاح حساسیت خاصیت رخشانی نمونه در تابش‌های مختلف را بررسی می‌کند (ماری و مجاهه، ۱۹۹۹). بنابراین در هر مرحله ابتدا نمونه تحت تابش دز بازتولید قرار می‌گیرد (جدول ۱) و سپس سیگنال رخشانی آن اندازه‌گیری می‌شود ( $L_x$ )، بعد برای بررسی تغییر حساسیت، تحت تابش تست دز واقع می‌شود و سیگنال رخشانی آن اندازه‌گیری می‌شود ( $T_x$ ). با تقسیم  $L_x$  به  $T_x$  در هر مرحله نسبت  $L_x/T_x$  حاصل می‌شود؛ به کمک این نسبت تأثیرات احتمالی تغییر حساسیت از بین می‌رود. با رسم یک دستگاه مختصات  $L_x/T_x$ ها بر حسب دزهای بازتولید و با فیت کردن یک نمودار مناسب به این نقاط، منحنی رشد سیگنال بر حسب دز برای هر الیکوت به دست می‌آید (شکل ۲). با مشخص کردن سیگنال رخشانی طبیعی روی نمودار (که در اولین اندازه‌گیری در آزمایشگاه حاصل شده بود) می‌توان دز معادل دز طبیعی  $D_e$  را برای آن الیکوت به دست آورد (شکل ۲). با تکرار پروتکل (سار) برای الیکوت‌های مختلف می‌توان به مجموعه‌ای از  $D_e$ ها دست یافت.

دمای مربوط به پیش‌گرمایش (ردیف‌های ۱ و ۴) توسط آزمایش بازیابی دز در پیش‌گرمای‌های مختلف preheat plateau dose recovery به دست آمد. بازه‌های

داده‌های به‌کاررفته در این مقاله به ترانسه‌ایرا واقع در شمال شرقی استان تهران در محدوده ارتباطی گسل شمال تهران با گسل مشا مربوط است. بنا بر زلزله‌های تاریخی گزارش شده و شواهد زمین ریخت‌شناسی (Geomorphology) روی این دو گسل و ثبت زلزله‌های دستگامی کوچک به خصوص روی گسل مشا، هر دو گسل فعال شناخته شده‌اند (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به اینکه گسل شمال تهران از بسیاری از بخش‌های شمالی شهر تهران (با جمعیتی افزون بر ۱۵ میلیون نفر) عبور می‌کند (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱) بررسی فعالیت زلزله‌خیزی آن از اهمیت بسیار برخوردار است. با بررسی آثار گسلش در محدوده ارتباطی دو گسل (ترانسه‌ایرا) و سن‌یابی نمونه‌های مربوط به آن می‌توان دوره‌های فعالیت آن‌ها را فهمید که این می‌تواند به تحلیل خطر منطقه کمک کند.

## ۲. اندازه‌گیری $D_e$

### ۲.۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

تخلیص کوارتز در آزمایشگاه لومینسانس شفیلد تحت نور قرمز با شدت کم انجام گرفت. کربنات‌ها و مواد آلی توسط اسید کلریدریک و آب اکسیژنه از بین رفتند. توسط مایع سنگین ( $2/7$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) ذرات سنگین از سبک جدا شدند. سپس دانه‌های با چگالی کمتر از  $2/7$  گرم بر سانتی‌متر مکعب به مدت ۴۵ دقیقه در محلول اسید فلوریک HF قرار گرفتند. تابش مادون قرمز سیگنال رخشانی تولید نکرد که نمایانگر خلوص کوارتز و عدم آلودگی فلدسپار است. در نهایت از دانه‌های کوارتز با دانه‌های (۹۰ تا ۲۵۰ میکرومتر) جهت ساخت الیکوت‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری سیگنال رخشانی عملیات سن‌یابی با دستگاه Riso مدل (DA-15TL/OSL) با سامانه خودکار صورت گرفت. سپس اندازه‌گیری طبق روش سار اجرا شد.

### ۲.۲. شرح روش سار (Single Aliquot (SAR))

#### (Regenerative Dose)

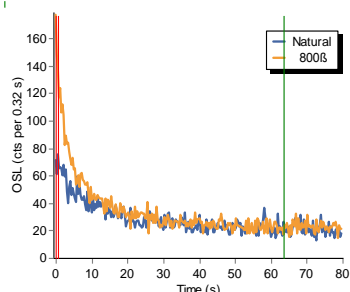
این روش اولین بار برای محاسبه  $D_e$ های دانه‌های فلدسپار

انتگرال گیری سیگنال‌ها برای محاسبات، اولین ثانیه منهای متوسط آخرین ۱۶ ثانیه انتخاب شد.

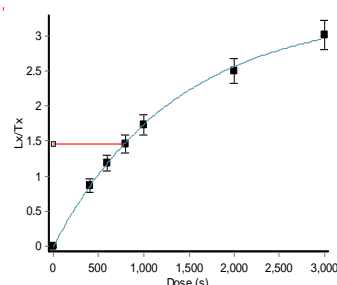
۳.۲. نتایج نرم‌افزار آنالیتیت از نرم‌افزار آنالیتیت استفاده شد و با تعیین محدودیت‌های مورد قبول در روش سار (ماری و ویتل، ۲۰۰۰)  $D_e$  حاصل از هر الیکوت محاسبه گردید. برخی نمودارهای آهنگ کاهش سیگنال و نمودارهای آهنگ رشد تولیدشده توسط این برنامه در شکل ۲ ارائه شده است:

جدول ۱. مراحل استاندارد روش سار

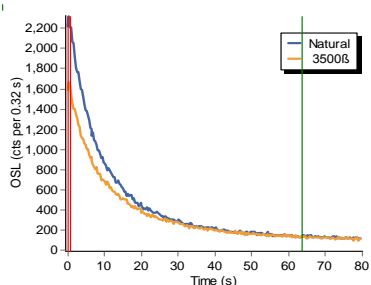
مرحله	شرح مختصر هر مرحله
۱	پیش‌گرما به مدت ۱۰ ثانیه در دمای ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد
۲	اندازه‌گیری سیگنال رخشانی حاصل از دز بازتولید در دمای ۱۲۵ ( $L_x$ )
۳	تابش دز آزمایشگاهی (Test dose)
۴	پیش‌گرما به مدت ۱۰ ثانیه در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد
۵	اندازه‌گیری سیگنال رخشانی حاصل از تست دز در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد ( $T_x$ )
۶	تابش دز بازتولید به الیکوت (Regenerative dose)
۷	بازگشت به مرحله ۱



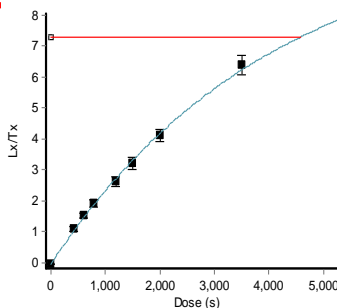
(ب) ایرا ۲



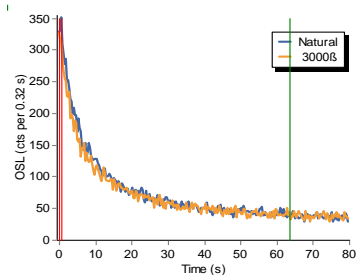
(الف) ایرا ۲



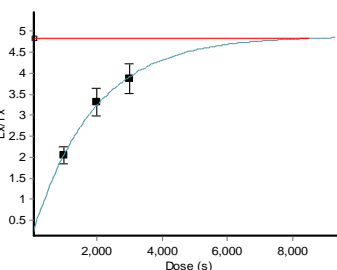
(د) ایرا ۱۰



(ج) ایرا ۱۰



(ی) ایرا ۱۲



(ه) ایرا ۱۲

شکل ۲. سمت راست: نمودارهای آهنگ رشد (growth curve) مربوط به نمونه‌های ایرا ۲ (الف) ایرا ۱۰ (ب) و ایرا ۱۲ (د) و مشاهده اشتباه‌شدگی برای ایرا ۱۲، سمت چپ، نمودارهای آهنگ کاهش سیگنال (decay curve) مربوط به نمونه‌های ایرا ۲ (ج) ایرا ۱۰ (د) و ایرا ۱۲ (ی). در نمودارهای مربوط به نرخ کاهش سیگنال برای نمونه‌های ایرا ۱۰ و ۱۲، گذشته از شدت نسبتاً پایین سیگنال‌ها در پاسخ به دزهای بالا (۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ ثانیه تابش بتا)، آهنگ کاهش سیگنال بسیار آهسته‌تر از آهنگی است که برای کوارتو انتظار می‌رود. اگرچه مطمئن نیستیم که این سیگنال دارای fast component است، اما شایان ذکر است که تغییر انتگرال تأثیری در نتیجه De نداشت. به عبارت دیگر De(t) plot نمایانگر وابستگی مؤثر De به زمان تحریک نبود.

### ۳. مدل‌های آماری سنیابی جهت محاسبه $D_B$

پس از به دست آمدن  $D_e$ ها از الیکوت‌های یک نمونه، در صورت پراکندگی  $D_e$ ها، برای محاسبه  $D_B$  به روش‌های آماری نیاز است. برای انتخاب مدل آماری، نحوه نمایش داده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. ابتدا برای نمایش داده‌ها از نمودار هیستوگرام استفاده می‌شد که برای به دست آوردن  $D_B$  از داده‌ها، میانگین‌گیری می‌شد، اما با توجه به محسوب‌نشدن خطای هر یک از  $D_e$ ها در نمایش داده‌ها،  $D_B$  محاسبه شده نتیجه دقیقی در بر نداشت (برگر، ۲۰۱۰؛ دالر، ۲۰۰۸). بنابراین برای اضافه کردن تأثیر خطای هر یک از  $D_e$ ها، نمودار هیستوگرام وزن‌دار یا تابع چگالی احتمال استفاده شد (سینگوی و همکاران، ۲۰۰۱). در تابع پی‌دی‌اف، هر داده (در اینجا هر  $D_e$ ) با یک تابع چگالی گوسی که میانگین آن برابر با مقدار آن داده (مقدار  $D_e$ ) و انحراف معیار معادل با خطای استاندارد داده (در اینجا خطای استاندارد  $D_e$ ) است، نشان داده می‌شود. مساحت زیر تابع‌های گوسی برای هر  $D_e$ های با هم‌دیگر است، بنابراین هر چه تابع‌ها باریک و کشیده باشند، دقت بیشتر دارند و هر چه پهن و گسترده باشند، دقت کمتری دارند. با جمع کردن همه تابع‌ها یک منحنی گوسی تولید می‌شود. خط آبی پررنگ در شکل ۶ (منحنی‌های سمت چپ)، حاصل جمع شدن تمامی تابع‌های چگالی ناشی از  $D_e$ های محاسبه شده برای الیکوت‌های یک نمونه است. در قسمت بحث برای همه نمونه‌ها در رابطه با پیک تابع پی‌دی‌اف و بیشترین احتمال وقوع  $D_e$  توضیح داده شده است. شایان ذکر است که در این روش، هر یک از  $D_e$ ها و خطای استانداردشان بطور مجزا روی نمودار قابل تشخیص نیست، چون به ازای هر مقدار  $D_e$  و خطای مربوطه، یک تابع چگالی احتمال جایگزین شده است.

شایان ذکر است که این روش در نمایش داده‌ها با خطای استاندارد بزرگ ناموفق عمل می‌کند، چون هر یک از تابع‌های احتمال با خطای استاندارد بزرگ، حالت کشیدگی خود را از دست می‌دهند و خیلی پهن می‌شوند و در نتیجه بررسی دقیق آن‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود (برگر و همکاران، ۲۰۰۹؛ گالبریت، ۲۰۱۰). در نتیجه، گالبریت روش استفاده از نمودار شعاعی و به دنبال آن مدل‌های سنیابی را معرفی کرد

(گالبریت و روبرتس، ۲۰۱۲؛ گالبریت، ۱۹۹۸؛ گالبریت، ۱۹۸۸). او، اولین بار برای تعیین سن تأثیرات شکافت هسته‌ای از آن‌ها استفاده کرد و آن‌ها را مدل‌های سنی (Age Models) نامید (گالبریت، ۱۹۸۸؛ گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹). با توجه به نحوه پراکندگی  $D_e$ ها، مدل‌های سنیابی متفاوتی وجود دارد. اگر بین داده‌ها پراکندگی زیادی وجود نداشته باشد و صفرشدگی کامل رخ داده باشد، می‌توان از CAM استفاده کرد. اما در محیط‌های طبیعی گاهی برای همه دانه‌ها صفرشدگی کامل رخ نمی‌دهد و بنابر این برخی از آن‌ها دارای سن بیشتری خواهند بود که سن درست تشکیل نمونه از آن‌ها به دست نخواهد آمد (فدر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ژاکوب و روبرتس، ۲۰۰۷؛ اولی و همکاران، ۲۰۰۴). در این صورت احتیاج است از روش‌های دیگر مثل MAM استفاده شود که می‌تواند سن درست تشکیل رسوب را به دست بیاورد. در این قسمت به شرح مدل CAM و MAM پرداخته می‌شود. برای توضیح دقیق‌تر هر دو مدل، این بحث از مدل سنی مشترک (Common Age Model) شروع می‌شود که مدلی آزمایشگاهی است و در آن همه داده‌ها تحت تابش یکسان اشعه رادیواکتیو قرار گرفته‌اند و خطاهای موجود در محیط طبیعی حذف شده است. در این مدل‌ها به جای  $D_e$  از لگاریتم آن‌ها استفاده شده است، زیرا نحوه تابش نور رخشانی از تابع نمایی پیروی می‌کند و با گرفتن لگاریتم طبیعی از آن، تابع نمایی، حذف و محاسبات ساده‌تر می‌شود. به علاوه خطای مربوط به  $D_e$  معمولاً به مقدار  $D_e$  وابسته است (دالر، ۲۰۰۵ نرم‌افزار آنالیز اپن‌دیکس (۳) و بنابرین استفاده از خطای مطلق برای آن‌ها درست نیست (گالبریت، ۲۰۰۳). اما در میانگین‌گیری به روش وزن‌دار از خطای مطلق استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به اینکه در مقیاس لگاریتمی خطای نسبی با خطای مطلق با تقریب خوبی برابر می‌شود، می‌توان با میانگین‌گیری وزن‌دار در مقیاس لگاریتمی به واقعیت  $D_e$  نزدیک‌تر شد. به علاوه از آنجا که توزیع‌های طبیعی از جمله  $D_e$ ها معمولاً از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، در معرفی این مدل‌های سنی از فرض توزیع نرمال پراکندگی داده‌ها استفاده می‌شود (گالبریت و روبرتس، ۲۰۱۲).

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

$\omega_i$ ها وزن هر داده هستند که با رابطه (۴) تعریف می‌شوند:

$$\omega_i = \frac{1}{s_i^2} \quad (4)$$

و خطای استاندارد رابطه (۳) برابر است با:

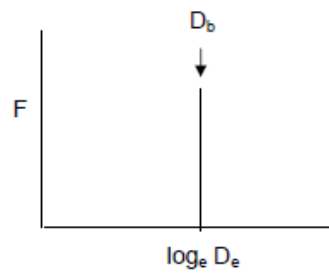
$$se(\delta) = \left( \sum \omega_i \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

### ۳.۲. مدل سنی مرکزی (Central Age Model)

در این مدل دز تابیده شده به الیکوت‌ها با هم برابر نیست، بنابراین از این مدل می‌توان برای نمونه‌هایی استفاده کرد که در محیط طبیعی تحت تابش دزهایی با مقادیر مختلف قرار گرفته‌اند. اما تفاوت در مقدار دزها باید از حد خاصی فراتر نرود (شکل ۴)؛ این حد را کمیته تعریف می‌کند که در این بخش توضیح داده خواهد شد. در این مدل فرض می‌شود هر الیکوت تحت تابش دزی قرار می‌گیرد که لگاریتم آن‌ها با  $d_i$  معرفی می‌شود و لگاریتم دز و خطای استاندارد  $d_i$  که برای هر یک از این الیکوت‌ها تخمین زده می‌شود با  $\delta_i$  و  $s_i$  نشان داده می‌شود. در این مدل رابطه زیر نشان‌دهنده اختلاف بین لگاریتم دز واقعی و لگاریتم دز تخمین زده است.

$$\delta_i = d_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

اختلاف بین  $d_i$  و  $\delta_i$  با  $\varepsilon_i$  نشان داده می‌شود. فرض می‌شود که  $\varepsilon_i$ ها یک مجموعه نرمال با میانگین صفر و واریانس برابر با مربع خطای استاندارد هر داده  $s_i^2$  تشکیل می‌دهند. به علاوه توزیع نرمالی با میانگین  $\delta$  و واریانس  $\sigma^2$  برای  $d_i$ ها تعریف می‌شود ( $\delta$  و  $\sigma^2$  صرفاً نام‌گذاری هستند). حال با توجه به رابطه (۶) واضح است که اگر میانگین و واریانس برای دو توزیع  $\varepsilon_i$  و  $d_i$ ها معلوم باشد، با جمع کردن مقادیر آن‌ها با هم می‌توان میانگین و واریانس  $\delta_i$ ها را تعریف کرد. پس میانگین و واریانس  $\delta_i$  به ترتیب برابر با  $\delta$  و  $\sigma^2 + s_i^2$  است. با توجه به اینکه در این مدل  $d_i$ ها با هم مساوی نیستند و دارای انحراف معیار هستند، اگر انحراف معیار صفر شود،



شکل ۳. حالت کلی سن‌یابی به روش common age model (رودنایت، ۲۰۰۶)

### ۳.۱. مدل سنی مشترک (Common Age Model)

در این مدل فرض می‌شود که همه الیکوت‌ها تحت تابش یکسانی از اشعه رادیواکتیو قرار گرفته‌اند (شکل ۳). لگاریتم این مقدار دز ثابت با  $\delta$  نشان داده می‌شود. پس از تابش در آزمایشگاه  $D_e$  و خطای استاندارد مربوط به هر الیکوت اندازه گرفته می‌شود و لگاریتم آن‌ها به ترتیب با  $\delta_i$  و  $s_i$  نشان داده می‌شود. حال رابطه (۲) برای نمایش ارتباط بین  $\delta$  و  $\delta_i$  نوشته می‌شود:

$$\delta_i = \delta + \varepsilon_i \quad (2)$$

در این رابطه  $\varepsilon_i$ ها اختلاف  $\delta$  با  $\delta_i$ ها است. فرض می‌شود که  $\varepsilon_i$ ها تشکیل یک توزیع نرمال با میانگین صفر می‌دهند و واریانس توزیع آن‌ها که با مربع خطای استاندارد هر الیکوت برابر است، با  $s_i^2$  نشان داده می‌شود. چون  $\delta$  عدد ثابت است پس میانگین آن‌ها برای هر الیکوت  $\delta$  و واریانس آن‌ها صفر خواهد بود. با توجه به مشخص بودن میانگین و واریانس برای دو توزیع نرمال  $\varepsilon_i$ ها و  $\delta$ ها می‌توان با جمع کردن آن‌ها با هم میانگین و واریانس  $\delta_i$ ها را به دست آورد. پس توزیع  $\delta_i$ ها دارای میانگینی برابر با  $\delta$  و واریانس برابر با  $s_i^2$  است. با توجه به اینکه یک روش استاندارد میانگین‌گیری برای داده‌هایی که خطا دارند، استفاده از میانگین‌گیری وزنی‌دار است، در این روش به هر یک از داده‌ها وزنی برابر معکوس مربع خطای استاندارد (معکوس واریانس) آن‌ها داده می‌شود؛ بنابراین می‌توان از رابطه (۳) میانگین  $\delta_i$ ها را به دست آورد (گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹؛ گالبریت، ۲۰۰۵).

از آنجا که  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه  $d_i$ ها محسوب می‌شود، بیانگر مقدار پراکندگی داده‌هاست. در صورتی که  $\sigma$  خیلی بزرگ باشد پراکندگی داده‌ها نسبت به هم خیلی زیاد می‌شود و در آن صورت نمی‌توان از مدل سن مرکزی استفاده کرد، چون همان‌طور که از اسم این مدل برداشت می‌شود، داده‌ها در این مدل باید در محوریت میانگین باشند. به همین سبب  $\sigma$  به عنوان بیش پراکنش مطرح شد که معمولاً با درصد بیان می‌شود و مقدار آن بیان می‌کند که داده‌ها چقدر از میانگین ( $\delta$ ) فاصله دارند (فدر و همکاران، ۲۰۰۶).

### ۳.۳. مدل کمترین سن (Minimum Age Model)

در شرایط طبیعی همواره اینطور نیست که همه کانی‌های کوآرتز یا فلدسپار تحت تابش کافی نور قرار بگیرند. گاهی این تابش ناقص صورت می‌گیرد و بنابراین همه سیگنال رخشانی ذخیره‌شده در دانه در هنگام تشکیل رسوب خارج نمی‌شود. از جمله محیط‌های تشکیل‌دهنده رسوبات که می‌توانند شامل این ویژگی باشند، محیط‌های رودخانه‌ای است (دالر، ۲۰۰۸) که پوشش آب‌های تیره روی رسوبات آبرفتی در حین تشکیل می‌تواند مانع از نورخوردگی در زمان کافی شود (اولی و همکاران، ۱۹۹۹؛ ریتناور، ۲۰۰۸؛ رودنایت، ۲۰۰۶). اگر از روش CAM برای این گونه نمونه‌ها استفاده شود، سن بیش از واقعیت نشان داده می‌شود. گالبریت و لاسلت در سال ۱۹۹۳ مدل MAM را معرفی کردند (گالبریت و لاسلت، ۱۹۹۳؛ گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹). در این مدل به جای توزیع نرمال از توزیع نرمال بریده‌شده یا ناقص استفاده می‌شود. در حقیقت این توزیع دزهای معادل به‌دست آمده از این نمونه را به دو قسمت تقسیم می‌کند که یکی شامل داده‌هایی است که صفرشدگی کامل برای آن‌ها صورت گرفته است (که استفاده از آن‌ها سن واقعی نمونه را به دست می‌دهد) و دیگری داده‌هایی که صفرشدگی ناقص دارند. در شکل ۵ این دو قسمت مشاهده می‌شود که برای بررسی این مدل دید خوبی می‌دهد.

یعنی همه داده‌ها در توزیع نرمال روی مقدار میانگین قرار بگیرند، مدل CAM به مدل سنی مشترک تبدیل می‌شود. برای به‌دست آوردن میانگین  $\delta_i$ ها در این مدل هم با توجه به وجود خطا برای هر یک از  $D_e$ ها از میانگین وزن‌دار استفاده می‌شود. به هر یک از داده‌ها وزنی مساوی با معکوس مربع خطای استاندارد (معکوس واریانس) داده می‌شود و سپس از رابطه (۷) میانگین محاسبه می‌شود.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (7)$$

در این رابطه،  $\omega_i$ ها وزن  $\delta_i$ ها محسوب می‌شوند و از آنجا که وزن در تعریف میانگین وزن‌دار عکس واریانس است:

$$\omega_i = \frac{1}{\sigma^2 + s_i^2} \quad (8)$$

برای تعیین مقادیر  $\delta$  و  $\sigma$  علاوه بر رابطه (۷) به معادله دیگری نیاز است که نشان‌دهنده ارتباط بین  $\delta$  و  $\sigma$  باشد که رابطه (۹) این امکان را فراهم می‌کند.

$$\sum_{i=1}^n \omega_i (\delta_i - \delta)^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (9)$$

پارامترهای  $\delta$  و  $\sigma$  با روش‌های برآورد بیشینه درست‌نمایی استاندارد (Standard Maximum likelihood Methods) و خطای استاندارد از روش معکوس ماتریس داده‌های مشاهده‌ای (Observed Information Matrix) تعیین می‌شوند (ریکی، ۱۹۸۸). یکی از روش‌های ساده برای به‌دست آوردن مقادیر  $\sigma$  و  $\delta$  استفاده از روش‌های عددی است. برای مثال می‌توان به  $\sigma$  مقادیر مختلفی نسبت داد و بر اساس هر کدام  $\omega_i$ ها را محاسبه کرد و سپس این  $\omega_i$ های محاسبه‌ای ثانویه را از  $\omega_i$ های اصلی اولیه کم کرد و حاصل این تفاضل را در هر مرحله باید به صفر نزدیک کرد تا به این ترتیب بهترین  $\sigma$  حاصل شود. خطای استاندارد آن‌ها از روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید:

$$se(\hat{\delta}) = \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^{-1} \quad (10)$$

$$se(\hat{\sigma}) = \left( 2\sigma^2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \right)^{-1} \quad (11)$$

جدول ۲. نتایج مربوط به تعیین سن نمونه‌های ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ از طریق روش CAM. گری (Gy) واحد دز جذبی است بر حسب ژول بر کیلوگرم. هزار سال با  $ka$  نشان داده می‌شود.

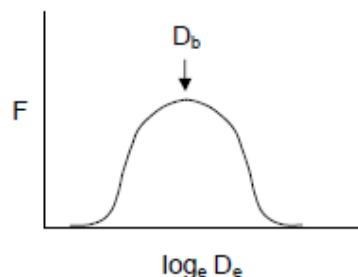
کمیت‌های محاسبه‌شده	ایرا ۳	ایرا ۷	ایرا ۱۲
مقدار $D_b$ به روش CAM	$125.34 \pm 9.40$ (Gy)	$133.3 \pm 9.89$ (Gy)	$259.67 \pm 11.64$ (Gy)
بیش پراکنش ( $\sigma$ )	٪۲۰،۹۱	٪۲۱،۲۶	٪۴،۰۹
نرخ دز ( $D_r$ )	$1.51 \pm 0.14$ (Gy/ka)	$1.28 \pm 0.14$ (Gy/ka)	$2.15 \pm 0.15$ (Gy/ka)
سن به‌دست‌آمده	$82.8 \pm 9.9$ (ka)	$104.4 \pm 13.7$ (ka)	$120.5 \pm 9.8$ (ka)

#### ۴. انحراف معیار در توزیع نرمال

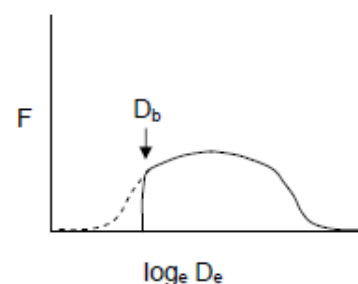
برای به‌دست‌آوردن این چهار کمیت به حل معادلات پیچیده‌ای نیاز است و برنامه آن توسط لاسلت و گالبریت نوشته شده است (گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹).

#### ۴. نتایج سن‌یابی

نمودارهای شعاعی و تابع چگالی احتمال مربوط به نمونه‌های ایرا ۳، ایرا ۷، ایرا ۱۲، ایرا ۲ و ایرا ۱۰ در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر  $D_b$  نمونه‌های ایرا ۳، ایرا ۷، ایرا ۱۲ از طریق CAM و مقادیر  $D_b$  نمونه‌های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ از طریق MAM و CAM محاسبه شده است و همراه با مقادیر  $\sigma$ ، نرخ دز و سن نمونه‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ گزارش شده است.



شکل ۴. پراکندگی داده‌ها در مدل سنی CAM (رودنایت، ۲۰۰۶)



شکل ۵. پراکندگی داده‌ها در مدل MAM (رودنایت، ۲۰۰۶)

جدول ۳. نتایج مربوط به تعیین سن نمونه‌های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ از طریق

#### روش MAM

کمیت‌های محاسبه‌شده	ایرا ۱۰	ایرا ۲
مقدار $D_b$ به روش CAM	$154.99 \pm 18.32$ (Gy)	$145.32 \pm 22.15$ (Gy)
مقدار $D_b$ به روش MAM	$99.83 \pm 10.12$ (Gy)	$67.43 \pm 8.32$ (Gy)
بیش پراکنش ( $\sigma$ )	٪۳۴،۷۶	٪۷۳،۴۱
نرخ دز ( $D_r$ )	$1.82 \pm 0.14$ (Gy/ka)	$1.62 \pm 0.14$ (Gy/ka)
سن به‌دست‌آمده از طریق MAM	$54.98 \pm 6.87$ (ka)	$41.68 \pm 6.12$ (ka)

قسمت خط‌چین نشان‌دهنده داده‌هایی است که صفرشدگی کامل دارند و توزیع نرمال بریده‌شده با قسمت‌های خط‌چین به‌خوبی مشخص است. برای به‌دست‌آوردن  $D_b$  برای این مجموعه به‌دست‌آوردن چهار کمیت نیاز است (گالبریت و روبرتس، ۲۰۱۲).

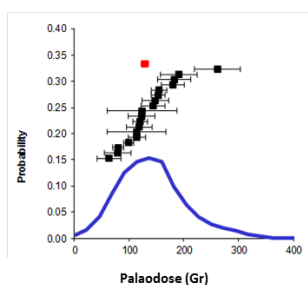
۱. نسبت دانه‌هایی که به‌طور کامل در معرض نور قرار گرفته‌اند و صفرشدگی کامل دارند.

۲. نقطه قطع‌شدگی توزیع نرمال که نشان‌دهنده  $D_b$

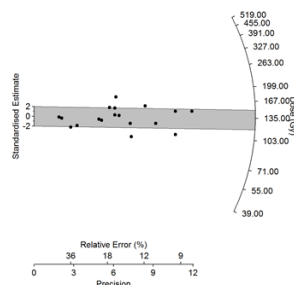
درست در MAM خواهد بود (شکل ۵).

۳. میانگین داده‌ها در توزیع نرمال

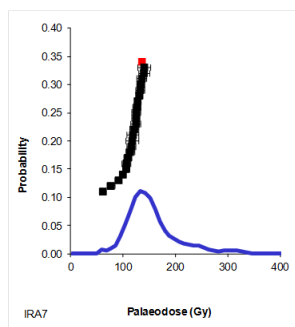




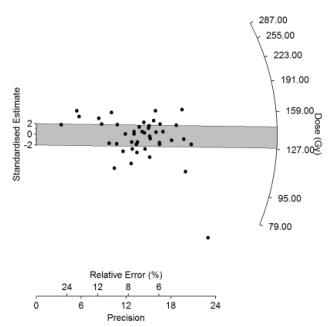
۳ ایرا (ب)



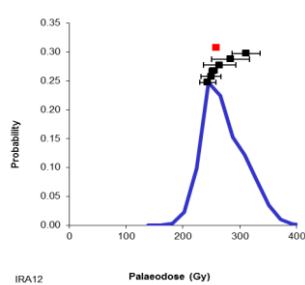
۳ ایرا (الف)



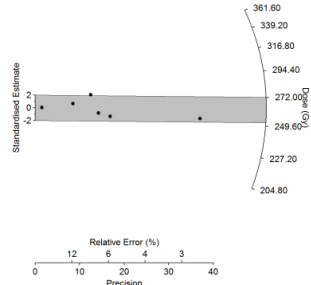
۷ ایرا (د)



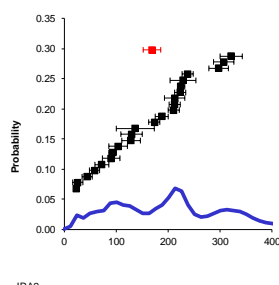
۷ ایرا (ج)



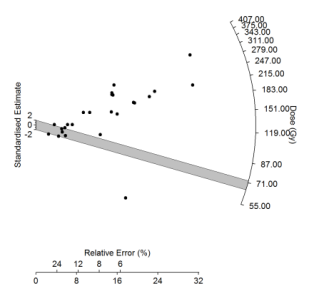
۱۲ ایرا (ز)



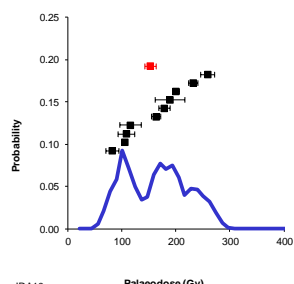
۱۲ ایرا (ر)



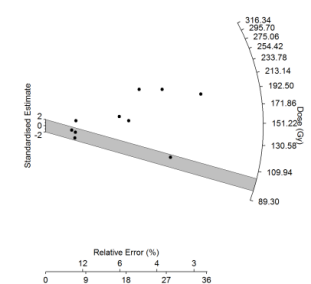
۲ ایرا (گ)



۲ ایرا (ک)



۱۰ ایرا (م)



۱۰ ایرا (ل)

شکل ۶. سمت راست: نمودارهای شعاعی مربوط به نمونه‌های ایرا ۳(الف) ایرا ۷(ج) و ایرا ۱۲ (ر)، ایرا ۲(ک) و ایرا ۱۰(ل) و سمت چپ: نمودارهای تابع چگالی احتمال مربوط به نمونه‌های ایرا ۳(ب) ایرا ۷(د) و ایرا ۱۲ (ز)، ایرا ۲(گ) و ایرا ۱۰(م)

## ۵. بحث

آمده، یعنی ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ از مدل سن مرکزی و برای داده‌های دیگر یعنی ایرا ۲ و ایرا ۱۰ از مدل کمترین سن برای محاسبه سن استفاده شده است.

شایسته یادآوری است که پدیده اشباع‌شدگی کوارتز در برخی الیکوت‌های نمونه ایرا ۱۲ دیده شد (شکل ۲-۵). این امر می‌تواند موجب شود سن متوسط به دست آمده به واقع حداقل سن نمونه ایرا ۱۲ باشد؛ بنابراین پراکندگی گسترده در دزهای اندازه‌گیری شده در بیشتر این نمونه‌ها، می‌تواند علاوه بر صفرشدگی ناقص سیگنال در اثر نور، ناشی از اشباع‌شدگی کوارتز نیز باشد. اگرچه برای الیکوت‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری  $D_e$  نمونه‌های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ اشباع‌شدگی مشاهده نشد اما اگر دانه‌های کوارتز این نمونه‌ها متأثر از این پدیده باشند، نتایج به دست آمده از روش حداقل سن، کمتر از سن حقیقی آن‌ها خواهد بود.

## ۶. نتیجه‌گیری

شرایط تشکیل رسوب، در به دست آمدن  $D_e$  ها با دامنه تغییرات بزرگ یا کوچک و همچنین پراکندگی یا تراکم آن‌ها، تأثیر بسیار مهمی دارد. یکی از این شرایط، صفرشدگی کامل و دیگری صفرشدگی ناقص است. در صورتی که دانه‌های تشکیل دهنده رسوب همگن بوده و صفرشدگی کامل اتفاق افتاده باشد،  $D_e$  ها پراکندگی ندارند و همه تقریباً حول یک مقدار ثابت قرار می‌گیرند. اگر صفرشدگی ناقص باشد، دانه‌هایی که صفرشدگی کامل برایشان اتفاق افتاده است، سن کمتر و بقیه بر حسب زمان نورخوردگی و میزان خارج شدن سیگنال رخشانی قدیمی سن بیشتری را نشان می‌دهند. کمیتی که پراکندگی  $D_e$  ها بین داده‌ها را توضیح می‌دهد، بیش‌پراکنش نام دارد که از طریق معادله ۸ محاسبه می‌شود؛ البته بیش‌پراکنش می‌تواند به دلایل دیگر از جمله نایکنواختی دز رادیواکتیو برای دانه‌های مختلف و تفاوت در خصوصیات رخشانی دانه‌های کوارتز (یا فلدسپار)، یا انتقال دانه‌ها از واحدهای دیگر به واحد سن‌یابی نیز صورت گیرد. بنا بر نتایج اولی و همکاران (۲۰۰۴) اگر این کمیت تا حدود ۲۰ درصد به دست بیاید،

نمودار تابع چگالی احتمال و نمودار شعاعی  $D_e$  های به دست آمده مربوط به نمونه‌های ایرا ۲، ایرا ۳، ایرا ۷، ایرا ۱۰ و ایرا ۱۲ نمایش داده شد. نمودار تابع چگالی داده‌های ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ حالت زنگوله‌ای به خود گرفته است (شکل ۶ قسمت ب، د و ز) که بیانگر متمرکز بودن درصد زیادی از داده‌ها حول مقدار خاصی است. این پیک خاص در همه سه نمونه تقریباً منطبق با دزی است که از طریق CAM به دست آمده است. اما همان‌طور که در شکل ۶ قسمت گ و م مشخص است، نمودارها حالت زنگوله‌ای ندارد و بنابراین اکثریت داده‌ها حول یک مقدار مشخص قرار نمی‌گیرند و داده‌ها به وضوح در  $D_e$  های مختلف حالت پخش‌شدگی دارند؛ البته در نمونه ایرا ۱۰ (شکل ۶-م) یک پیک مشخص تقریباً روی  $D_e = 100$  قرار دارد که نشان‌دهنده تمرکز اعداد بازه انتهایی  $D_e$ ، حول این مقدار است. نحوه پراکندگی داده‌ها در نمودار شعاعی هم همین مسئله را تأیید می‌کند. داده‌های ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ عمدتاً در بازه  $[25, 25-]$  قرار می‌گیرند (شکل ۶، ایرا-الف)، ایرا-ج و ایرا-۱۲-ر)). حال آنکه پراکندگی داده‌ها در نمودار شعاعی داده‌های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ بیانگر متمرکز نبودن داده‌ها در آن بازه است (شکل ۶، ایرا-۲-ک و ایرا-۱۰-ل)).

به علاوه کمیت بیش‌پراکنش که با رابطه (۸) محاسبه می‌شود کمک می‌کند تا مقدار پراکندگی به‌طور کمی اندازه گرفته شود. بنابراین برای همه داده‌ها این کمیت محاسبه شده است. کمیت بیش‌پراکنش برای داده‌های ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ به ترتیب ۲۰/۹۱ درصد، ۲۱/۲۶ درصد و ۴/۰۹ درصد به دست آمد (جدول ۲) و برای داده‌های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ به ترتیب ۷۳/۴۱ درصد و ۳۴/۷۶ درصد محاسبه شد (جدول ۳). با توجه به اینکه اگر کمیت بیش‌پراکنش کمتر از ۲۰ درصد باشد، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه همگن بوده و به قدر کافی نور خورده است و با صفرشدگی کامل همراه است (اولی و همکاران، ۲۰۰۴)، برای داده‌هایی که کمیت بیش‌پراکنش برای آن‌ها حدود ۲۰ درصد به دست

کوارتز در پراکندگی  $D_e$  ها، برای اندازه‌گیری دقیق‌تر سن باید از عدم اشباع‌شدگی مطلع شد. از آنجا که هدف از این مقاله بیشتر معرفی سن‌یابی به روش‌های آماری CAM و MAM بوده است، به بحث‌های زمین‌شناسی و اطلاعات جانبی محیطی پرداخته نشده است و در پژوهش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

### تشکر و قدردانی

از دکتر محمدرضا قاسمی و دکتر سعید هاشمی طباطبایی به سبب مساعدت‌ها و همراهی در برداشت نمونه‌ها تشکر می‌کنیم. همهٔ آزمایش‌های لومینسانس در آزمایشگاه لومینسانس دانشگاه شفیله اجرا شد.

### مراجع

- Aitken, M. J., 1985, Thermoluminescence dating, London, Academic Press.
- Aitken, M.J., 1998, An introduction to optical dating, Oxford, Oxford University Press.
- Berger, G. W., Post, S. and Wenker, C., 2009, Single and multigrain quartz luminescence dating of irrigation-channel features in Santa Fe, New Mexico, *Geoarchaeology*, 24, 383-401.
- Berger, G. W., 2010, An alternate form of probability-distribution plot for de values, *Ancient TL*, 28(1), 1-27.
- Duller, G. A. T., Bitter-Jensen, L., Kohsiek, P. and Murray, A. S., 1999, A high-sensitivity optically stimulated luminescence scanning system for measurement of single sand-sized grains. *Radiation Protection Dosimetry* 84, 325-330.
- Duller, G. A. T., 1991, Equivalent dose determination using single aliquots, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18, 371-378.
- Duller, G. A. T. 2005, *Analyst*, v.3.22b, University of Wales, 43p.
- Duller, G. A. T., 2008, Single-grain optical dating of quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating, *Boreas* 37, 589-612.
- Feathers, J. K., Holliday, V. T. and Meltzer, D. J., 2006, Optically stimulated luminescence of Southern High Plains archaeological sites, *Journal of Archaeological Science*, 33, 1651-1665.
- Galbraith, R. F., 1988, Graphical display of estimates having differing standard errors, *Technometrics*, 30, 271-281.

- می‌توان به خوبی از CAM، سن نمونه‌ها را محاسبه کرد. در صورتی که کمیت بیش‌پراکنش از حدود ۲۰ درصد تجاوز کند، باید از روش دیگری استفاده شود. اگر فرض بر آن باشد که اصلی‌ترین عامل بیش‌پراکنش صفرشدگی ناقص است، در آن صورت طبیعتاً حداقل  $D_e$  ها نزدیک‌تر به واقعیت هستند. در این صورت می‌توان از MAM برای سن‌یابی نمونه استفاده کرد. این روش طوری طراحی شده است که برای به‌دست‌آوردن سن درست نمونه روی کمترین دزها متمرکز می‌شود. شایان ذکر است که برای سن‌یابی به روش MAM تنها اکتفا به کمیت بیش‌پراکنش و نحوهٔ توزیع داده‌ها روی نمودار شعاعی یا تابع چگالی احتمال کفایت نمی‌کند و برای اطمینان حاصل کردن باید شواهد زمین‌شناسی و محیطی نیز بر صفرشدگی ناقص حکم کند. به علاوه به علت امکان وجود اشباع‌شدگی
- Galbraith, R., Laslett, F. and G. M., 1993, Statistical models for mixed fission track ages, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21, 459-470.
- Galbraith, R. F. 1998, The trouble with probability density plots of fission-track ages, *Radiation Measurements*, 29, 125-131.
- Galbraith, R. F., Roberts, R. G., Laslett, G. M., Yoshida, H. and Olley, J. M., 1999, Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models, *Archaeometry*, 41, 339-364.
- Galbraith, R. F., 2003, A simple homogeneity test for estimates of dose obtained using OSL, *Ancient TL*, 21, 75-77.
- Galbraith, R. F., 2005, *Statistics for fission track analysis*, Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton.
- Galbraith, R., 2010, On plotting OSL equivalent doses, *Ancient TL*, 28, 1-9.
- Galbraith, R. F. and Roberts, R. G., 2012, Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: an overview and some recommendations, *Quaternary Geochronology*, 11, 1-27.
- Ghassemi, M. R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P. and Tabatabaei, S., 2014, Kinematic links between the Eastern Mosha fault and the North Tehran fault, Alborz range, northern Iran, *Tectonophysics*, 622(2014), 81-95.
- Jacobs, Z. and Roberts, R. G., 2007, Advances in optically stimulated luminescence dating of individual grains of quartz from

- archaeological deposits. *Evolutionary Anthropology*, 16, 210-223.
- Murray, A. S. and Mejdahl, V., 1999, Comparison of regenerative-dose single-aliquot and multiple- aliquot (SARA) protocols using heated quartz from archaeological sites, *Quaternary Science Reviews*, 18, 223-229.
- Murray, A. S. and Wintle, A. G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Olley, J. M., Caitcheon, G. G. and Roberts, R. G., 1999, The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence, *Radiation Measurements*, 30, 207-217.
- Olley, J. M., Pietsch, T. and Roberts, R. G., 2004, Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz, *Geomorphology*, 60, 337-358.
- Rice, J. A., 1988, *Mathematical statistics and data analysis*, Wadsworth and Brookscole, Pacific Grove, California.
- Rittenour, T.M., 2008, Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas* 37, 613-635.
- Rodnight, H., 2006, Developing a Luminescence chronology for late quaternary fluvial change in South African Floodplain Wetlands, Ph.D. dissertation, University of Wales, 304 pp.
- Singhvi, A. K., Bluszcz, A., Bateman, M. D. and Someshwar Rao, M. 2001, Luminescence dating of loess-palaeosol sequences and coversands: methodological aspects and palaeoclimatic implications, *Earth Science review*, 54, 193-211.
- Solaymani Azad, S., Ritz, J.-F. and Abbassi, M.R., 2011, Left-lateral active deformation along the Mosha–North Tehran fault system (Iran): morphotectonics and paleoseismological investigations, *Tectonophysics*, 497, 1-14.
- Wintle, A. G. and Murray, A. S., 2006, A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single aliquot regeneration dating protocols, *Radiation Measurements*, 41, 369-391.