ارزیابی مدلهای آماری در سنیابی به روش لومینسانس: مطالعهٔ موردی ترانشهٔ ایرا

مريم حيدري' و مرتضي فتاحي"*



۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران ۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

چکیدہ

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 ازجمله صفرشدگی کامل یا صفرشدگی ناقص، مجموعه دزهای معادل به دست آمده می توانند از یکپارچگی یا پراکندگی برخوردار باشند. برای هر یک از این حالتها مدلهای آماری سنیابی معرفی شده است که محاسبهٔ دز جذب شده در طول زمان دفن و به دنبال آن محاسبهٔ سن نمونه را از مجموعه دزهای طبیعی ممکن می کند. در این مقاله به بررسی دو مدل رایج آماری سنیابی، یعنی مدل سن مرکزی ((CAM)Company کو طبیعی ممکن می کند. در این مقاله به بررسی دو مدل رایج (Model مرای سنیابی، یعنی مدل سن مرکزی ((CAM)Company کو محل کمترین سن ((MAM)) و مدل معادل به دست آمده از آنها از نزدیکی کافی به هم برخوردارند و مدل MAM برای نمونهها با صفرشدگی کامل استفاده می شود که دزهای معادل نسبت به هم پراکندگی شایان توجهی دارند و برای به دست آوردن سن درست نمونه روی کمترین دزها متمرکز می شود. نمونههای موردمطالعه در این مقاله از ترانشهٔ 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 می شو د: معمولاً تعداد زیادی دانه (دهها تا صدها دانه) بر روی یک ديسک فلزي چسبانده مي شود که اليکوت نام دارد. سپس برای هر یک از الیکوتها در آزمایشگاه دز معادل دز طبيعي (equivalent dose) که با D_e نشان داده می شود، اندازه گیری می شود. برای محاسبهٔ D_e معمولاً از پروتکلی تحت عنوان بازتوليد اليكوت منفرد (Single - Aliquot Regenerative dose) که به طور مخفف با سار (SAR) معرفی شد، استفاده میشود (ماری و وینتل، ۲۰۰۰). بااستفاده از این پروتکل برای هر نمونه مجموعهای از D_e به دست مي آيد (وينتل و ماري ۲۰۰۶) که به کمک آن ها D_e محاسبه می شود. الیکوتها به دلایل گوناگون D_b های مختلفی را تولید میکنند و نحوهٔ توزیع آنها در محاسبهٔ 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 دههٔ اخیر استفاده شده است (دالر، ۲۰۰۸). کانیهایی چون کوارتز و فلدسپار که در رسوبات موجودند، با دریافت انرژی از عناصر رادیواکتیو موجود در طبیعت ازجمله اورانیوم و توریم می توانند سیگنال رخشانی (luminescence) انباشته کنند که از آن می توان برای تعیین سن نمونه استفاده کرد (ایتکن، می توان برای تعیین سن نمونه استفاده کرد (ایتکن، از مواد رادیواکتیو اطراف خود جذب می کند این از مواد رادیواکتیو اطراف خود جذب می کند اینکن جذب شده در واحد زمان یعنی نرخ دز (dose rate) که جذب شده در واحد زمان یعنی نرخ دز (dose rate) که با T نمایش داده می توان سن نمونه را به کمک رابطهٔ (۱) به دست آورد (دالر و همکاران، ۱۹۹۹؛ ایتکن،

E-mail: mfattahi@ut.ac.ir

دانههای کوارتز (یا فلدسپار) میتواند سبب تفاوت در مقدار سیگنال رخشانی دانهها شود (فدر و همکاران، ۲۰۰۶). پس با توجه به نحوهٔ تشکیل رسوبات و سایر عوامل گفتهشده، *وD*های بهدستآمده از یک نمونه میتوانند به هم نزدیک یا از هم دور باشند. برای تفسیر نحوهٔ 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.



شکل ۱ (الف) کانی های کوارتز در رسوبات قدیمی دفن می شوند و به مرور زمان به سیگنال رخشانی آنها افزوده میشود (مرحلهٔ اول). سپس دانه ها در اثر عواملی همچون جابه جایی رسوبات و فرسایش تحت تابش نور واقع میشوند و سیگنال رخشانی آنها آزاد می شود و در حالت ایده آل به صفر می رسد. سن بهدستآمده در این شرایط برای همهٔ دانهها یکسان است (مرحلهٔ دوم)، دوباره تحت تأثیر رسوبگذاری دانهها دفن شده و سیگنال رخشانی در آنها با گذر زمان شروع به انباشتهشدن میکند (مرحله سوم)، (دالر، ۲۰۰۸). (ب) این شکل شرایطی را نشان میدهد که دانهها به قدر کافی در معرض تور قرار نمی گیرند یا هر دانهای به اندازهای متفاوت از دانهٔ دیگر تحت تابش تور قرار می گیرد، مثل رسوبات تشکیل شده از سیل؛ بنابراین سیگنال رخشانی برخی کاملاً صفر میشود و برخی دیگر حاوی مقداری از سیگنال اضافه خواهند بود و در نتیجه برای نمونه در آزمایشگاه مجموعهٔ متفاوتی از D_e ها حاصل مىشود.

پراکندگی یا تراکم D_e ها می شود، مدتزمان نورخوردگی 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 مي گيرند، همهٔ سيگنال آنها خارج مي شود؛ بنابراين وقتى تشكيل رسوب مىدهند ساعت زمانىشان صفر است. پس از تشکیل رسوب، ذخیرهشدن سیگنال رخشانی در آنها شروع میشود و بنابراین سنی که بعداً از آنها به دست مي آيد، سن درست زمان تشكيل رسوب خواهد بود؛ این حالت را صفرشدگی کامل مىنامند(شكل ١-الف). ازجمله اين رسوبات مىتوان به رسوبات بادی اشاره کرد چون معمولاً امکان نورخوردگی کافی برای آنها وجود دارد و پیچیدگیهای محیطهای رودخانهای را ندارند. اما اگر زمان نورخوردگی به حد کافی نباشد، همهٔ سیگنال رخشانی خارج نمیشود و بنابراین مقداری در دانه باقی مىماند. چنين دانەھايى وقتى تشكيل رسوب بدھند سنى 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 تیرهٔ حاصل از گل ولای بهطورکامل تحت تابش نور قرار نمیگیرند و ساعت زمانی همهٔ دانههای آنها صفر نمی شود؛ 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 نورخوردگی 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 نورخوردگی هر دانه) در آنها باقی می ماند (شکل ۱–ب) (ریتناور، ۲۰۰۸؛ رودنایت، ۲۰۰۶).

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

دادههای به کاررفته در این مقاله به ترانشهٔ ایرا واقع در شمال شرقی استان تهران در محدودهٔ 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 دستگاهی کوچک به خصوص روی گسل مشا، هر دو گسل فعال شناخته شدهاند (قاسمی و همکاران،۲۰۱۴). با توجه به فعال شناخته شدهاند (قاسمی و همکاران،۲۰۱۴). با توجه به اینکه گسل شمال تهران از بسیاری از بخشهای شمالی شهر رسلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱) بررسی فعالیت زلزله خیزی آن از اهمیت بسیار بر خورداراست. با بررسی آثار گسلش در محدودهٔ ارتباطی دو گسل (ترانشهٔ ایرا) و سنیابی نمونههای مربوط به آن می توان دورههای فعالیت آنها را فهمید که این

۲. اندازه گیری D_e.

۲. ۱. آمادهسازی نمونهها

تخلیص کوارتز در آزمایشگاه لومینسانس شفیلد تحت نور قرمز با شدت کم انجام گرفت. کربناتها و موادآلی توسط اسید کلریدریک و آب اکسیژنه از بین رفتند. توسط مایع سنگین (۲/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب) ذرات سنگین از سبک جدا شدند. سپس دانههای با چگالی کمتر از ۲/۲ گرم بر سانتی متر 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 ساخت الیکوتها استفاده شد. برای اندازه گیری سیگنال ساخت الیکوتها استفاده شد. برای اندازه گیری سیگنال رخشانی عملیات سنیابی با دستگاه Riso مدل (-DA اندازه گیری طبق روش سار اجرا شد.

۲. ۲. شرح روش سار ((SAR)) Single Aliquot. (Regenerative Dose

این روش اولین بار برای محاسبه D_eهای دانههای فلدسپار

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 طبيعي (Natural Luminescence Signal) اندازه گرفته میشود. سپس با تاباندن دزهای مختلف رادیواکتیو به الیکوتها، سیگنال رخشانی متناسب با هر دز اندازه گیری می شود. به هر یک از این دزها دز بازتولید (Regenerative Dose) گفته می شود. اما چون بر اساس آزمایش های انجام گرفته امکان تغییر سیگنال رخشانی تولیدشده 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 تابش های مختلف را بررسی می کند (ماری و مجاهه، ۱۹۹۹). بنابراین درهر مرحله ابتدا نمونه تحت تابش دز بازتولید قرار میگیرد (جدول ۱) و سیس سیگنال رخشانی آن اندازه گیری می شود (L_X)، بعد برای بررسی تغییر حساسیت، تحت تابش تست دز واقع می شود و سیگنال رخشانی آن اندازه گیری می شود (T_X). با تقسیم L_X به T_X در هر مرحله نسبت $L_x/_{T_y}$ حاصل می شود؛ به کمک این نسبت تأثیرات احتمالی تغییر حساسیت از بین میرود. با رسم یک دستگاه مختصات ^Lx/_{Tv} 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 می آید (شکل ۲). با مشخص کردن سیگنال رخشانی طبیعی روی نمودار (که در اولین اندازهگیری در آزمایشگاه حاصل شده بود) می توان دز معادل دز طبيعي D_e را براي آن اليكوت به دست آورد (شكل ۲). با تكرار پروتكل (سار) براي اليكوتهاي مختلف می توان به مجموعهای از D_e ها دست یافت.

دمای مربوط به پیش گرمایش (ردیف های ۱ و ۴) توسط آزمایش بازیابی دز در پیش گرماهای مختلف preheat platue dose recovery به دست آمد. بازههای

انتگرال گیری سیگنالها برای محاسبات، اولین ثانیه منهای متوسط آخرین ۱۶ ثانیه انتخاب شد. ۲. ۳. نتایج نرمافزار آنالسیت از نرمافزار آنالیست استفاده شد و با تعیین محدودیتهای

مورد قبول در روش سار (ماری و وینتل، ۲۰۰۰) De 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 شرح مختصر هر مرحله مرحله ییش گرما به مدت ۱۰ ثانیه در دمای ۲۶۵ درجهٔ سانتی گراد ۱ $(L_{\rm x})$ اندازه گیری سیگنال رخشانی حاصل از دز بازتولید در دمای ۱۲۵ (۲ تابش دز آزمایشگاهی (Test dose) ٣ پیش گرما به مدت ۱۰ ثانیه در دمای ۱۶۵ درجهٔ سانتی گراد ۴ اندازهگیری سیگنال رخشانی حاصل از تست دز در دمای ۱۶۰ درجهٔ سانتی گراد (T_x) ۵ تابش دز بازتوليد به اليكوت (Regenerative dose) ۶ بازگشت به مرحلهٔ ۱ v 160 Natural 800ß 140 - 041 - 021 (cts ber 0:32 s) - 08 - 00 - 08 - 00 - 09 - 00 2.5 Ě 1.5 40 20 0 20 30 40 Time (s) 50 60 70 10 80 1,000 1,500 2,000 2,500 3,000 Dose (s) 0 500 (ب) ايرا ۲ (الف) ايرا ٢ 2,200 2,000 Natural 3500ß 1,800 5 XTX 4 400 200 0. 30 40 50 Time (s) 1,000 2,000 3,000 Dose (s) 4.000 5.000 10 20 60 70 80 ò (د) ایرا ۱۰ (ج) ايرا ١٠ 350 Natural 3000ß 300 4.5 4 -3.5 -Ě 3 -Ž 2.5 -OSL (cts per 0.32 s) 200 - 200 120 - 200 120 - 200 0SL (cts per 0.32 s) 150 - 200 0SL (cts per 0.32 s) 2 1.5 50 0-30 40 50 Time (s) 20 70 ò 10 60 80 2.000 4,000 6,000 Dose (s) 8.000 (ی) ایرا ۱۲ (ه) ایرا ۱۲

شکل ۲. سمت راست: نمودارهای آهنگ رشد (growth curve) مربوط به نمونههای ایرا ۲(الف) ایرا ۱۰(ب) وایرا ۱۲ (ه) و مشاهدهٔ اشباع شدگی برای ایرا ۱۲، سمت چپ، نمودارهای آهنگ کاهش سیگنال (decay curve) مربوط به نمونههای ایرا ۲(ج) ایرا ۱۰(د) وایرا 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 (۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ ثانیه تابش بتا)، آهنگ کاهش سیگنال بسیار آهسته تر از آهنگی است که برای کوارتز انتظار می رود. اگرچه مطمئن نیستیم که این سیگنال دارای اطرای از مان تحریک نبود. تأثیری در نتیجهٔ De نداشت. به عبارت دیگر plot نمایانگر وابستگی مؤثر De به زمان تحریک نبود.

(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 نحوهٔ پراکندگی D_e ها، مدلهای سن یابی متفاوتی وجود دارد. اگر بین دادهها پراکندگی زیادی وجود نداشته باشد و صفرشدگی کامل رخ داده باشد، می توان از CAM استفاده کرد. اما در محیطهای طبیعی گاهی برای همهٔ 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 روش های دیگر مثل MAM استفاده شود که مي تواند سن درست تشکيل رسوب را به دست بياورد. در اين قسمت به شرح مدل CAM و MAM پرداخته می شود. برای توضيح دقيقتر هر دو مدل، اين بحث از مدل سنى مشترك (Common Age Model) شروع می شود که مدلی آزمایشگاهی است و در آن همهٔ دادهها تحت تابش یکسان اشعهٔ رادیواکتیو قرار گرفتهاند و خطاهای موجود در محیط طبیعی حذف شده است. در این مدل ها به جای De از لگاریتم آنها استفاده شده است، زیرا نحوهٔ 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 وابستهاست (دالر، ۲۰۰۵ نرمافزار آنالیست اپندیکس۳) و بنابراین استفادهاز خطای مطلق برای آنها درست نیست (گالبریت، ۲۰۰۳). اما در میانگین گیری به روش وزندار از خطای مطلق استفاده میشود؛ بنابراین باتوجه به اینکه در مقیاس لگاریتمی خطای نسبي با خطاي مطلق با تقريب خوبي برابر مي شود، مي توان با میانگین گیری وزندار در مقیاس لگاریتمی به واقعیت De نزدیک تر شد. به علاوه از آنجا که توزیع های طبیعی از جمله ها معمولاً از توزیع نرمال پیروی میکنند، در معرفی این D_e مدل های سنی از فرض توزیع نرمال پراکندگی داده ها استفاده می شود (گالبریت و روبر تس، ۲۰۱۲).

 D_b مدلهای آماری سن یابی جهت محاسبهٔ .۳ پس از بهدستآمدنD_eها از الیکوتهای یک نمونه، در صورت پراکندگی D_e ها، برای محاسبهٔ D_b به روشهای آماری نیاز است. برای انتخاب مدل آماری، نحوهٔ نمایش دادهها از اهمیت زیادی برخوردار است. ابتدا برای نمایش دادهها از نمودار هیستوگرام استفاده می شد که برای بەدست آوردن D_b از دادەھا، ميانگين گيرى مىشد، اما با توجە به محسوبنشدن خطای هریک از D_eها در نمایش دادهها، D_b محاسبه شده نتیجهٔ دقیقی در بر نداشت (برگر،۲۰۱۰؛ دالر،۲۰۰۸). بنابراین برای اضافه کردن تأثیر خطای هر یک از ها، نمودار هیستوگرام وزندار یا تابع چگالی احتمال D_e استفاده شد (سینگوی و همکاران، ۲۰۰۱). در تابع پیدیاف، هر داده (در اینجا هر $(D_{
m e})$ با یک تابع چگالی گوسی که میانگین آن برابر با مقدار آن داده (مقدار D_e) و انحراف معیار $(D_{\rm e}\)$ معادل با خطای استاندارد داده (در اینجا خطای استاندارد است، نشان داده میشود. مساحت زیر تابعهای گوسی برای هر D_eهای با همدیگر است، بنابراین هرچه تابعها باریک و کشیده باشند، دقت بیشتر دارند و هرچه پهن و گسترده باشند، دقت کمتری دارند. با جمع کردن همهٔ تابعها یک منحنی گوسی تولید میشود. خط آبی پررنگ در شکل ۶ (منحنی های سمت چپ)، حاصل جمع شدن تمامی تابع های چگالی ناشی از D_eهای محاسبه شده برای الیکوتهای یک نمونه است. در قسمت بحث برای همهٔ 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_eها و خطای استانداردشان بطور مجزا روی نمودار قابل تشخیص نیست، چون به ازای هر مقدار De 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 می کند، 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

(9)

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{n} \omega_{i} \delta_{i}}{\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}}$$
(m)
$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}}{\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}}$$
(m)
$$\omega_{i} = \delta_{i} \quad (f)$$

$$\omega_{i} = \frac{1}{s_{i}^{\tau}}$$
(f)
$$\omega_{i} = \frac{1}{s_{i}^{\tau}}$$
(f)
$$\delta = (\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}) = (\sum_{i=1}^{n} \omega_{i})$$
(f)
$$\delta = \delta = (\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}) = (\sum_{i=1}^{n} \omega_{i})$$
(f)

(Central Age Model) در این مدل سنی مرکزی (Central Age Model) در این مدل دز تابیده شده به الیکوت ها با هم برابر نیست، بنابراین از این مدل می توان برای نمونه هایی استفاده کرد که در محیط طبیعی تحت تابش دزهایی با مقادیر مختلف قرار گرفته اند. اما تفاوت در مقدار دزها باید از حد خاصی فراتر نرود (شکل ۴)؛ این حد را کمیتی تعریف می کند که دراین بخش توضیح داده خواهد شد. در این مدل فرض می شود هر الیکوت تحت تابش دزی قرار می گیرد که لگاریتم آنها با به معرفی می شود و لگاریتم دز و خطای استانداردی که برای هریک از این الیکوت ها معرفی می شود و در این دز و خطای استانداردی که برای هریک از این الیکوت ها معرفی می شود. در این مدل رابطه زیر نشان دهندهٔ اختلاف بین لگاریتم در این مدل رابطه زیر نشان دهندهٔ اختلاف بین لگاریتم دز واقعی و لگاریتم در این.

اختلاف بین $i_i \ e_i \delta_i$ $i_i \ i_i \ i_i \delta_i$ نشان داده می شود. فرض می شود که $i_i \ a_i$ یک مجموعهٔ نرمال با میانگین صفر و واریانسی برابر با مربع خطای استاندارد هر داده s_i^2 تشکیل می دهند. به علاوه توزیع نرمالی با میانگین δ و واریانس $^{\circ}$ برای $i_i \ b_i \ a_i$ توریف می شود (δ و $^{\circ}$ صرفا نام گذاری هستند). حال با توجه به رابطهٔ (θ) واضح است که اگر میانگین و واریانس برای دو توزیع $i_i \ a_i \ b_i \ a_i$ معلوم باشد، با جمع کردن مقادیر آنها با هم می توان میانگین و واریانس $\delta_i \ a_i \ a_i \ a_i \ b_i \ a_i \ a_i \ a_i \ a_i \ b_i \ b_i$

 $\delta_i = d_i + \varepsilon_i$



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

۳. ۱. مدل سنی مشتر ک (Common Age Model) در این مدل فرض می شود که همهٔ الیکوتها تحت تابش یکسانی از اشعهٔ رادیواکتیو قرار گرفتهاند (شکل ۳). لگاریتم این مقدار دز ثابت با δ نشان داده می شود. پس از تابش در آزمایشگاه *g* و خطای استاندارد مربوط به هر الیکوت اندازه گرفته می شود و لگاریتم آنها به ترتیب با *i*δ و *i*δ نشان داده می شود. حال رابطهٔ (۲) برای نمایش ارتباط بین δ و *i*δ نوشته می شود:

$$S_i = \delta + \varepsilon_i$$
 (Y)

در این رابطه $arepsilon_i$ ها اختلاف δ با $arepsilon_i$ ها ست. فرض میشودکه _{Ei} ها تشکیل یک توزیع نرمال با میانگین صفر میدهند و واریانس توزیع آنها که با مربع خطای استاندارد هر الیکوت برابر است، با ² i² نشان داده می شود. چون δ عدد ثابت است پس میانگین آنها برای هر الیکوت δ و واریانس آنها صفر خواهد بود. با توجه به مشخصبودن میانگین و واریانس برای دو توزیع نرمال ε، او δها می توان با جمع کردن آنها با هم میانگین و واریانس δ_i ها را به دست آورد. پس توزیع δ_i ها دارای میانگینی برابر با δ و واریانسی برابر با S_i² است. با توجه به اینکه یک روش استاندارد میانگین گیری برای دادههایی که خطا دارند، استفاده از میانگین گیری وزندار است، در این روش به هر یک از دادهها وزنی برابر معکوس مربع خطای استاندارد (معکوس واریانس) آنها داده می شود؛ بنابراین می توان از رابطهٔ (۳) میانگین δ_i را به دست آورد (گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹؛ گالبریت، .(1..0

از آنجا که σ انحراف معیار مجموعهٔ d_i ها محسوب می شود، بیانگر مقدار پراکندگی داده هاست. در صورتی که σ خیلی بزرگ باشد پراکندگی داده ها نسبت به هم خیلی زیاد می شود و در آن صورت نمی توان از مدل سن مرکزی استفاده کرد، چون همان طور که از اسم این مدل برداشت می شود، داده ها در این مدل باید در محوریت میانگین باشند. به همین سبب σ به عنوان بیش پراکنش مطرح شد که معمولاً با در صد بیان می شود و مقدار آن بیان می کند که داده ها چقدر از میانگین (δ) فاصله دارند (فدر و همکاران، ۲۰۰۶).

۳. ۳. مدل كمترين سن (Minimum Age Model) در شرایط طبیعی همواره اینطور نیست که همهٔ کانی های كوارتز يا فلدسپار تحت تابش كافي نور قرار بگيرند. گاهی این تابش ناقص صورت می گیرد و بنابراین همهٔ سیگنال رخشانی ذخیرهشده در دانه در هنگام تشکیل رسوب خارج نمى شود. ازجمله محيط هاى تشكيل دهنده رسوبات که می توانند شامل این ویژگی باشند، محیط های 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 می شود. گالبریت و لاسلت در سال ۱۹۹۳ مدل MAM را معرفی کردند (گالبریت و لاسلت، ۱۹۹۳؛ گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹). در این مدل به جای توزيع نرمال از توزيع نرمال بريدهشده يا ناقص استفاده می شود. در حقیقت این توزیع دزهای معادل بهدست آمده از این نمونه را به دو قسمت تقسیم می کند که یکی شامل داده ایی است که صفر شد کی کامل برای آن ها 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 می شود که برای بررسي اين مدل ديد خوبي مي دهد.

یعنی همهٔ دادهها در توزیع نرمال روی مقدار میانگین قرار بگیرند، مدل CAM به مدل سنی مشترک تبدیل می شود. برای بهدست آوردن میانگین نδها در این مدل هم با توجه به وجود خطا برای هریک از وDها از میانگین وزندار استفاده می شود. به هریک از دادهها وزنی مساوی با معکوس مربع خطای استاندارد (معکوس واریانس) داده می شود و سپس از رابطهٔ (۷) میانگین محاسبه می شود.

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

در این رابطه، _i۵ها وزن_iδها محسوب میشوند و از آنجا که وزن در تعریف میانگین وزندار عکس واریانس است:

$$\omega_i = \frac{1}{\sigma^{\tau} + s_i^{\tau}} \tag{A}$$

برای تعیین مقادیر δ و σ علاوه بر رابطهٔ (۷) به معادلهٔ دیگری نیاز است که نشاندهندهٔ ارتباط بین δ و σ باشد که رابطهٔ (۹) این امکان را فراهم می کند.

$$\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}^{\mathsf{r}} \left(\delta_{i} - \delta \right)^{\mathsf{r}} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{i} \tag{9}$$

پارامترهای $\delta \ o \ o \ v$ ا روشهای بر آورد بیشینهٔ درستنمایی استاندارد (Standard Maximum likelihood) و خطای استاندارد از روش معکوس ماتریس (Methods) و خطای استاندارد از روش معکوس ماتریس دادههای مشاهدهای (NAA). یکی از روش های ساده تعیین می شوند (ریکی، ۱۹۸۸). یکی از روش های ساده برای به دست آوردن مقادیر $\sigma \ o \ \delta$ استفاده از روش های عددی است. برای مثال می توان به σ مقادیر مختلفی نسبت داد و بر اساس هر کدام $i \omega$ ها را محاسبه کرد و سپس این $i \omega$ های محاسبهای ثانویه را از $i \omega$ های اصلی اولیه کم کرد و حاصل این تفاضل را در هر مرحله باید به صفر نزدیک کرد تا به این ترتیب بهترین σ حاصل شود. خطای استاندارد آن ها از روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می آید:

$$se\left(\hat{\delta}\right) = \left(\sum_{i=1}^{n} \omega_{i}\right)^{\frac{-1}{\gamma}} \tag{(1)}$$

$$Se(\hat{\sigma}) = \left(\tau \sigma^{\tau} \sum_{i=1}^{n} \omega_{i}^{\tau}\right)^{\frac{-1}{\tau}}$$
(11)

کمیتهای محاسبه شده	ايرا ۳	ايرا ∨	ايرا ۱۲
مقدار D _b به روش CAM	140,44±4,4. (Gy)	۱۳۳,۳±۹,۸۹ (Gy)	409,9V±11,94 (Gy)
بيش پراکنش (σ)	۲۰,۹۱/	7.21,25	<u>/</u> ۴,•۹
(\pmb{D}_r) نرخ دز	1,01±.+14 (Gy/ka)	1,14±•,14 (Gy/ka)	(Gy/ka)
سن بەدستآمدە	۸۲,۸±۹,۹ (ka)	۱۰۴,۴± ۱۳,۷ (ka)	۱۲۰,۵ ± ۹,۸ (ka)

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



loge De (رودنایت، ۲۰۰۶) (رودنایت، ۲۰۰۶) (رودنایت، ۲۰۰۶)



log_e D_e

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

قسمت خطچین نشاندهندهٔ دادههایی است که صفرشدگی کامل دارند و توریع نرمال بریدهشده با قسمتهای خطچین بهخوبی مشخص است. برای بهدست آوردن *d* برای این مجموعه بهدست آوردن چهار کمیت نیاز است (گالبریت و روبرتس، ۲۰۱۲). ۱. نسبت دانههایی که بهطور کامل در معرض نور قرار گرفتهاند و صفرشدگی کامل دارند. ۲. نقطهٔ قطعشدگی توزیع نرمال که نشاندهندهٔ *d* درست در MAM خواهد بود (شکل ۵).

۴. انحراف معیار در توزیع نرمال برای بهدست آوردن این چهار کمیت به حل معادلات پیچیدهای نیاز است و برنامهٔ آن توسط لاسلت و گالبریت نوشته شده است (گالبریت و همکاران، ۱۹۹۹).

۴. نتایج سن یابی

نمودارهای شعاعی و تابع چگالی احتمال مربوط به نمونههای ایرا ۳، ایرا ۷، ایرا ۱۲، ایرا ۲ وایرا 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 وایرا ۱۰ از طریق MAM و CAM محاسبه شده است و همراه با مقادیر σ ، نرخ دز و سن نمونهها در جدولهای ۲ و ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. نتایج مربوط به تعیین سن نمونهٔ ایرا ۲ و ایرا ۱۰ از طریق روش MAM

کمیتهای محاسبهشده	ايرا ١٠	ايرا ۲	
مقدار <i>D_b</i> به روش CAM	104,99±11,77 (Gy)	140,44±44,10 (Gy)	
مقدار <i>D_b</i> به روش MAM	99,^1°±1+,11 (Gy)	97,97±1,77 (Gy)	
بيشپراکنش (σ)	:/ ** ,v\$	% \% ,F1	
(\pmb{D}_r) نرخ دز	۱,۸۲±۰,۱۴ (<i>Gy</i> /ka)	۱,۶۲±۰,۱۴ (Gy/ka)	
سن بهدستآمده از طریق MAM	64,41 ± 9,11 (ka)	۴۱,۶۸±۶,۱۲ (ka)	



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

آمده،

نمودار تابع چگالی احتمال و نمودار شعاعی D_e های بهدست آمدهٔ مربوط به نمونه های 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 متمر کزبودن درصد زیادی از دادهها حول مقدار خاصی است. این پیک خاص در همهٔ سه نمونه تقریباً منطبق با دزی است که از طریق CAM به دست آمدهاست. اما همان طور که در شکل ۶ قسمت گ و م مشخص است، نمودارها حالت زنگولهای ندارد و بنابراین اکثریت دادهها حول یک مقدار مشخص قرار نمی گیرند و داده ابه وضوح در De های مختلف حالت پخش شدگی دارند؛ البته در نمونهٔ ایرا D_e =100 (شكل ۶−م) يك پيك مشخص تقريباً روى ۱۰ قرار دارد که نشاندهندهٔ تمرکز اعداد بازهٔ انتهایی D_e، حول این مقدار است. نحوهٔ پراکندگی دادهها در نمودار شعاعی هم همین مسئله را تأیید می کند. دادههای ایرا ۳، ايرا ٧ و ايرا ١٢ عمدتاً در بازهٔ [٢٥، ٢٥-] قرار مي گيرند (شکل ۶، ایرا۳–الف)، ایرا ۷–ج) وایرا ۱۲–ر)). حال آنکه پراکندگی دادهها در نمودار شعاعی دادههای ایرا ۲ و ایرا ۱۰ بیانگر متمرکزنبودن دادهها در آن بازه است (شکل ۶، ایر ۲۱–ک) و ایر ۱۰۱–ل)).

به علاوه کمیت بیش پراکنش که با رابطهٔ (۸) محاسبه می شود کمک می کند تا مقدار پراکندگی به طور کمی اندازه گرفته شود. بنابراین برای همهٔ داده ها این کمیت محاسبه شده است. کمیت بیش پراکنش برای داده های ایرا ۳، ایرا ۷ و ایرا ۱۲ به تر تیب ۲۰/۹۱ درصد، ۲۱/۲۶ درصد و و ایرا ۱۰ به تر تیب ۲۰/۹۱ درصد و ۲۰/۹۳ درصد محاسبه شد (جدول ۳). با توجه به اینکه اگر کمیت بیش پراکنش کمتر از ۲۰درصد باشد، می توان نتیجه گرفت که نمونه همگن بوده و به قدر کافی نور خورده است و با صفر شدگی کامل همراه است (اولی و همکاران،۲۰۰۴)، برای داده هایی که کمیت بیش پراکنش برای آن ها حدود ۲۰ درصد به دست

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.

شایستهٔ یادآوری است که پدیدهٔ اشباع شدگی کوار تز در برخی الیکوت های نمونهٔ ایرا ۱۲ دیده شد (شکل ۲-ه). این امر می تواند موجب شود سن متوسط به دست آمده به واقع حداقل سن نمونهٔ ایرا ۱۲ باشد؛ بنابراین پراکندگی گسترده در دزهای اندازه گیری شده در بیشتر این نمونه ها، می تواند علاوه بر صفر شدگی ناقص سیگنال در اثر نور، ناشی از اشباع شدگی کوار تز نیز باشد. اگر چه برای الیکوت های استفاده شده برای اندازه گیری De نمونه های ایرا ۲ و ایرا ۱۰ اشباع شدگی مشاهده نشد اما اگر دانه های کوار تز این نمونه ها متأثر از این پدیده باشند، نتایج به دست آمده از روش حداقل سن، کمتر از سن حقیقی آن ها خواهد بود.

۶. نتيجه گيري

شرایط تشکیل رسوب، در بهدست آمدن D_eها با دامنهٔ تغییرات بزرگ یا کوچک و همچنین پراکندگی یا تراكم آنها، تأثير بسيار مهمي دارد. يكي از اين شرايط، صفر شدگی کامل و دیگری صفر شدگی ناقص است. در صورتی که دانههای تشکیلدهندهٔ رسوب همگن بوده و صفرشدگی کامل اتفاق افتاده باشد، D_e ها پراکندگی ندارند و همه تقريباً حول يک مقدار ثابت قرار مي گيرند. اگر صفرشدگی ناقص باشد، دانه هایی که صفرشدگی كامل برایشان اتفاق افتادهاست، سن كمتر و بقیه برحسب زمان نورخوردگی و میزان خارجشدن سیگنال رخشانی قديمي سن بيشتري را نشان ميدهند. كميتي كه پراکندگی D_eها بین دادهها را توضیح میدهد، بیش پراکنش نام دارد که از طریق معادلهٔ ۸ محاسبه میشود؛ البته بیشپراکنش میتواند به دلایل دیگر ازجمله نايكنواختي دز راديواكتيو براي دانههاي 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،

۵. بحث

کوارتز در پراکندگی D_e ها، برای اندازه گیری دقیق تر 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 زمین شناسی و اطلاعات جانبی محیطی پرداخته نشده است و در پژوهشهای بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

تش**کر 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 شفیلد 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.

می توان به خوبی از CAM، سن نمونه ها را محاسبه کرد. در صورتی که کمیت بیش پراکنش از حدود ۲۰ درصد تجاوز کند، باید از روش دیگری استفاده شود. اگر فرض بر آن باشد که اصلی ترین عامل بیش پراکنش صفر شدگی ناقص است، در آن صورت طبیعتاً حداقل *p*ها نزدیک تر به واقعیت هستند. در این صورت می توان از MAM برای سن یابی نمونه استفاده کرد. این روش طوری طراحی شده است که برای به دست آوردن سن درست نمونه روی سن یابی به روش MAM تنها اکتفا به کمیت بیش پراکنش و نحوهٔ توزیع داده ها روی نمودار شعاعی یا تابع چگالی احتمال کفایت نمی کند و برای اطمینان حاصل کردن باید شواهد زمین شناسی و محیطی نیز بر صفر شدگی ناقص حکم کند. به علاوه به علت امکان وجود اشباع شدگی

- 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 singlealiquot 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.