

## بررسی مشکلات ویژه در گرماسنجی مواد پرتوزا

سعید زینالی هریس<sup>\*</sup>، کمال محمدی فرد

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

### چکیده

از زمان کشف مواد پرتوزا در سال ۱۸۹۶ توسط هنری بی کوریل، دانشمندان به شدت علاقمند به مطالعه خواص مختلف مواد پرتوزا از جمله خواص حرارتی و ترموفیزیکی این مواد شدند. پروژه مانهاتان و مواد پرتوزای مصنوعی که بعدها به وجود آمد، منجر به گسترش فعالیت‌ها در راستای به دست آوردن داده‌های ترموفیزیکی مواد پرتوزا شد. اطلاعات پیرامون خواص این مواد با کمک راکتورهای هسته‌ای گسترش پیدا کرده است. به دلیل شرایط خاص مواد پرتوزا، مطالعات گرماسنجی در مورد این مواد از حساسیت‌های بالایی برخوردار است و مشکلات این گونه اندازه‌گیری‌ها در مورد این مواد نیز، در مقایسه با مواد طبیعی دیگر، گسترده‌تر است. گرماسنجی مواد پرتوزا دارای دو مشکل اساسی است: اولی اثرات تخریب حرارتی و دومی مصونیت آزمایشگر در مقابل تابش‌های پرتوزا که در این مقاله این دو مشکل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

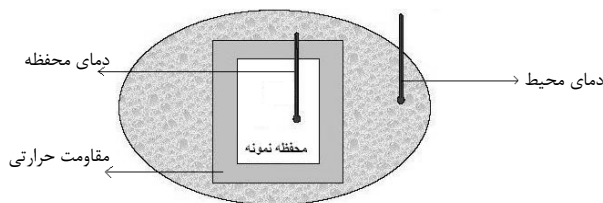
**کلمات کلیدی:** گرماسنجی، مواد پرتوزا، حفاظت از تابش، گرماسنج، گرمای تخریب

### ۱- مقدمه

تجزیه و تحلیل بهتر نتایج استفاده شود. در این مقاله، توضیحی مختصر از مزایا و معایب گرماسنج‌های مورد استفاده در تعیین خواص مواد پرتوزا و همچنین بررسی گرماسنج‌های پیشنهادی با ابعاد بزرگ و مناسب برای اندازه‌گیری خواص مواد هسته‌ای زاید تولید شده، ترانسورائیک<sup>۱</sup> فعالیت مواد زاید تخریب شده با پرتوهای گاما در طی فرایند گرماسنجی ارائه شده است [۱ و ۲]. گرماسنجی به‌عنوان یکی از فنون سنجش غیر مخرب<sup>۲</sup> NDA برای تعیین توان خروجی مواد هسته‌ای تولیدکننده گرما به کار می‌رود. فن<sup>۳</sup> گرماسنجی عبارت است از تعیین خواص واحد جرم مواد پرتوزا در طی اندازه‌گیری ترکیبی توان حرارتی به‌وسیله گرماسنجی و ترکیب ایزوتوپ آن از طریق طیف‌بینی پرتوهای گاما یا طیف‌بینی جرمی. فن<sup>۴</sup> گرماسنجی در ایالات متحده و

گرماسنجی، اندازه‌گیری کمی گرماست. کاربرد گرماسنجی شامل اندازه‌گیری گرمای مخصوص عناصر، ترکیبات، آنتالپی تغییر فاز و مقدار گرمای حاصل از تابش‌های هسته‌ای است. گرماسنجی برای اندازه‌گیری کمی خواص حرارتی مواد هسته‌ای اولین بار در سطح گسترده در ایالات متحده به کار رفته است. به علت دقت بالا و اندازه‌گیری کمی خواص حرارتی با مقادیر جزئی مواد، در مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی، این روش به‌عنوان اولین تکنیک سنجش گرمای ویژه برای پلوتونیم و تری‌تینیم مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور اندازه‌گیری ترکیب ایزوتوپ پلوتونیم با استفاده از طیف سنجی پرتو گاما لازم است که اندازه‌گیری گرماسنج به گرم پلوتونیم تبدیل شود. یک روش گرماسنجی صحیح، اجازه می‌دهد که از آن برای اندازه‌گیری تغییرات ترموفیزیکی و همچنین تولید استاندارد ثانویه جهت تصحیح خطاهای دیگر روش‌های سریع غیر مخرب و

1. Transuranic  
2. Nondestructive Analysis



شکل ۱- تصویر طرح گونه حداقل اجزای لازم

### جهت اندازه‌گیری حرارتی [۳]

گرماسنج‌های جریان حرارتی به‌طور گسترده جهت اندازه‌گیری‌های حرارتی به‌کار می‌روند. این گرماسنج‌ها دارای دقت بالا بر اساس حسگرهای دمایی سیم نیکل می‌باشند که در یک پل وتستون به هم وصل شده‌اند. از یک حمام آب با دمای کنترل شده با دقت بالا برای یک دمای ثابت منبع و یک چاه حرارتی نامحدود استفاده می‌شود. آزمایشگاه ملی لوس آلاموس (LANL) از یک نمونه از این گرماسنج‌ها که در شکل (۲) دیده می‌شود برای اندازه‌گیری پلوتونیم و تریتم استفاده می‌کند.

شکل طرح گونه از گرماسنج (گرادیان- پل وتستون) در شکل (۳) نشان داده شده است. در این گونه، دو ماریچ به‌صورت هم‌مرکز پیچیده شده‌اند و یک جفت ماریچ مرکزی با فاصله حرارتی بین دوجفت قرار گرفته‌اند. در گرماسنج پل دوگانه، همچنین، منبع حرارتی در زیر و هم محور با نمونه حرارتی قرار گرفته است [۲].

گرماسنج‌های با حجم بالا (LVC)<sup>۱</sup> توانایی اندازه‌گیری توان خروجی از یک محفظه با قطر ۶۰ سانتیمتر و ۲۰۸ لیتر حجم را دارد. یک LVC همچنین شامل یک حسگر جریان حرارتی پیل حرارتی می‌باشد که برای گرماسنج حالت جامد توسعه داده شده است. محفظه ۲۰۸ لیتری به‌وسیله یک جابجاکننده محفظه بالا برده شده و در روی ستون LVC قرار داده می‌شود [۴]. تصویری از این نوع گرماسنج در شکل (۴) نشان داده شده است.

اروپا به‌صورت متداول جهت اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی پلوتونیم و مواد هسته‌ای طی ۴۰ سال گذشته به‌کار رفته است [۲].

فن گرماسنجی در مقایسه با دیگر روش‌های آنالیز شیمیایی و سایر روش‌های NDA منافع زیادی دربر دارد که تعدادی از آن‌ها عبارتند از:

۱- اندازه‌گیری حرارتی به‌وسیله گرماسنج، کاملاً مستقل از ماده و نوع ساختار بوده و به فرایند رقیق‌سازی نیازی ندارد.

۲- استاندارد فیزیکی خاصی لازم نیست.

۳- فن گرماسنجی می‌تواند برای تولید استانداردهای ثانویه در مورد سیستم فناوری نوترون و پرتوهای گاما به‌کار رود.

۴- گرماسنجی، خیلی دقیق و تقریباً عاری از انحراف است و انحراف می‌تواند به‌صورت کتی در طی درجه‌بندی تعیین شود.

۵- ملاحظات ایمنی بحرانی و محدوده حجم محفظه اندازه‌گیری مواد را می‌توان تنها در گرماسنج اندازه گرفت.

۶- گرماسنجی تنها فن اندازه‌گیری عملی در دسترس برای بسیاری از ترکیبات تریتم است [۲].

محدودیت‌های این فن نیز عبارتند از:

۱- فن گرماسنجی شدیداً مستقل از توزیع مواد هسته‌ای در ساختار است.

۲- دقت در مورد مواد با ترکیب ایزوتوپیک ناهمگن به‌دلیل عدم اطمینان از تعیین توان مخصوص مؤثر کاهش می‌یابد.

۳- اندازه‌گیری گرماسنجی از روش‌های دیگر NDA طولانی‌تر است.

۴- گرماسنج نمی‌تواند تفاوت بین گرمای تولید شده به‌وسیله تخریب پرتوزا و گرمای تولید شده به‌وسیله منابع دیگر، از جمله تغییر فاز و واکنش‌های شیمیایی را، تشخیص دهد [۲].

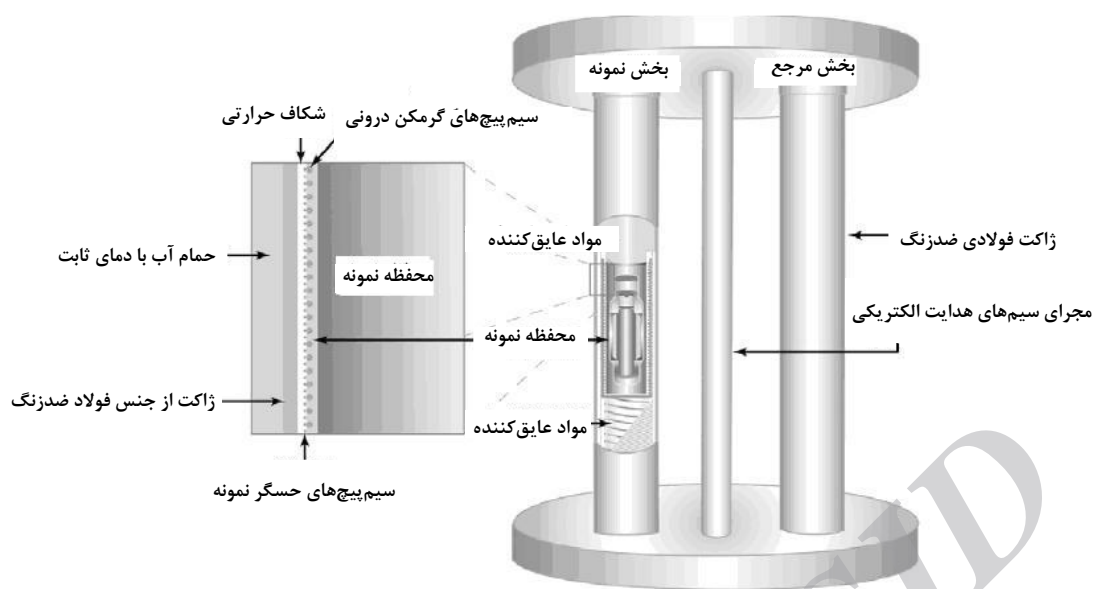
## ۲- انواع گرماسنج‌ها و شیوه اندازه‌گیری

تمامی گرماسنج‌ها همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است به‌صورت عمومی حاوی ۴ جزء هستند:

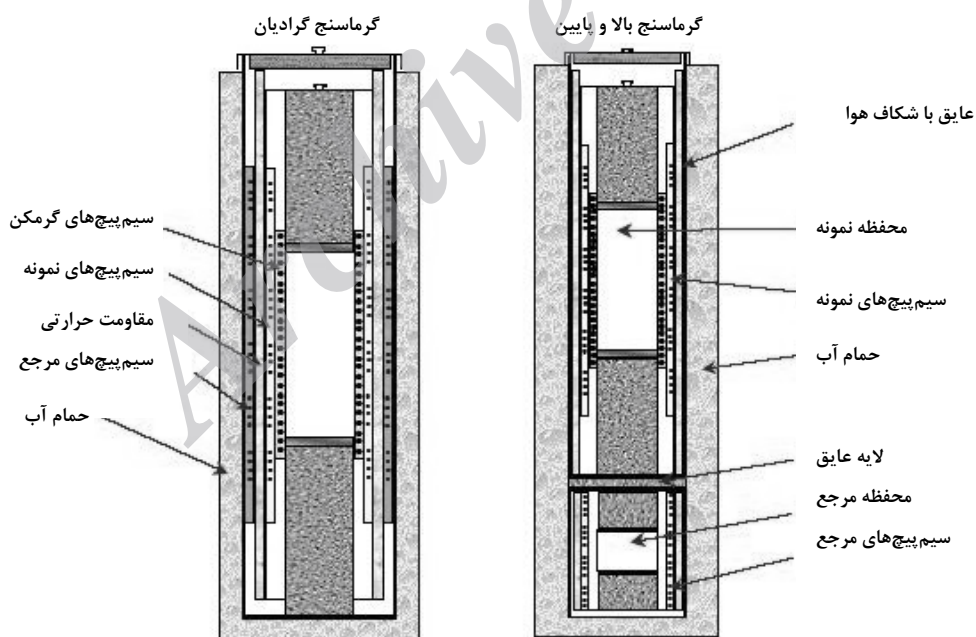
۱- محفظه نمونه

۲- مقاومت حرارتی کاملاً مشخص و تعریف شده

1. Large Volume Calorimeter



شکل ۲- شکل طرح گونه گرماسنج جریان حرارتی دو پله<sup>۱</sup> با اجزای اصلی مشخص شده [۲]



شکل ۳- شکل طرح گونه گرماسنج پل و تستون به دو شکل گرماسنج گرادیان و گرماسنج قسمت بالا و پایین [۲]

اندازه‌گیری‌های پرتوزایی با استفاده از گرماسنج یکی از تصحیحات مهم باید برای اتلاف انرژی حرارتی به خاطر فوتون‌هایی باشد که جذب را در جایی که منبع پرتوزا قرار گرفته است ترک می‌کنند. [۴].



شکل ۵- تصویر یک گرماسنج حالت جامد با دقت بالا در حمام آب به همراه یک لپ تاپ IBM جهت جمع آوری داده‌ها [۵]

سیستم گرماسنجی تایلکال<sup>۱</sup> یک گرماسنج برای سنجش نمونه‌های پرتوزا است، که از صفحات فولادی (جاذب) و صفحات جرقه زن (مواد فعال) ساخته شده است. سیستم شامل یک منبع پرتوزای متحرک می‌باشد که برای درجه‌بندی تایلکال استفاده می‌گردد. در این سیستم، یک کپسول حاوی سزیم ۱۳۷ با منبع تابشی گاما هست که داخل سیال در درون لوله‌های درجه‌بندی حمل می‌شود، این تابش‌ها در تمام سلول‌های<sup>۲</sup> گرماسنج نفوذ می‌کند [۶]. از یک شیشه ساخته شده سه جزئی سدیم آلومینوفسفات<sup>۳</sup> به‌عنوان فاز پوششی برای سرامیک فسفات کلسیم استفاده می‌شود که به‌عنوان نگهدارنده مواد زاید پرتوزا حاوی هالیدها در گرماسنج بکار می‌رود. برای تهیه این شیشه ویژه فرایند خاصی به‌کار می‌رود. طی فرایند فراورش و ساخت شیشه مورد نظر، شیشه تا حدودی جامد بلوری<sup>۴</sup> می‌شود، سپس به‌منظور بهبود پایداری حرارتی و مقاومتی آن به‌منظور خروج از حالت شیشه‌ای مقادیر اندکی از افزودنی‌هایی نظیر  $B_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$  و  $ZnO$  به مقدار کمتر از ۱۰٪ مولی به ترکیب اضافه می‌گردد. مطالعات انجام گرفته نشان‌دهنده آن است که

1. TileCal
2. Cell
3. NaAlP
4. Crystalline Solid



شکل ۴- تصویر یک LVC با یک گرماسنج در وضعیت بالایی بعد از اینکه محفظه گرماسنج ۲۰۸ لیتری پر شده است [۴].

تصویری از یک نمونه کوچک گرماسنج حالت جامد در شکل (۵) نشان داده شده است. این گرماسنج از حسگر جریان حرارتی پیل حرارتی استفاده می‌کند. این گرماسنج در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس طراحی و ساخته شده و سیستم گرماسنج حالت جامد نامیده می‌شود. یک جفت هماهنگ شده از حسگرهای جریان حرارتی پیل حرارتی به‌عنوان جابجا شونده در حسگرهای پیل و تستون بکار رفته است. اختلاف الکتریسیته بین خروجی نمونه و خروجی پیل حرارتی منبع با استفاده از نانولمتر اندازه‌گیری می‌شود [۵].

زمانی که پرتوزایی به‌وسیله گرماسنجی اندازه‌گیری می‌شود، یک جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرد که تابش‌ها را جذب و آنها را تبدیل به گرما نماید تا قابل اندازه‌گیری باشد. زمانی که کیفیت تابش و حساسیت گرماسنج قابل ملاحظه باشد، ابعاد و جنس جاذب را می‌توان بهینه نمود. زمانی که تابش‌های بتا ساطع شود، استفاده از جاذبهایی نظیر آلومینیم و مس مؤثر خواهد بود. در حالی که برای تابش‌های گاما، سرب یا تنگستن جهت جلوگیری از خروج انرژی تابشی از سلول گرماسنج مناسب خواهد بود. هر چقدر ضخامت جاذب افزایش یابد مقدار انرژی خروجی از جاذب کاهش می‌یابد و در مقابل ظرفیت حرارتی جاذب، افزایش یافته دقت اندازه‌گیری حرارتی را کاهش می‌دهد. با وجود این در

۲- مقدار حرارت اندکی که در مدت گرماسنجی مواد پرتوزا آزاد می‌شود.

۳- انجام آزمایش کمی مواد پرتوزا

در مطالعات گرماسنجی مواد پرتوزا بررسی اثر حرارتی ناشی از تخریب زنجیره‌ای این مواد نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد. مطالعه تخریب حرارتی به‌وسیله گرماسنجی برای تشخیص نیمه عمر ایزوتوپ‌ها به کار گرفته می‌شود. نیمه عمر پلوتونیم از تخریب حرارتی به‌وسیله گرماسنجی دیفرانسیلی و گرماسنج بونسن به‌دست آمده است که خطای حاصل از این دو سیستم حدود ۱٪ است [۹].

اندازه‌گیری حرارت تخریبی برای تولیدات شکافت هسته‌ای، به‌عنوان عاملی مهم در طراحی راکتور و آنالیز ایمنی آن به شمار می‌رود. نظریه‌هایی که می‌توانند حرارت منجر به تخریب تولیدات شکافت هسته‌ای را پیش‌بینی کنند، همانند نظریه (وی - ویگنر)<sup>۳</sup> باید به‌وسیله اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرند. در سال ۱۹۴۴ ایی و کانن [۹] از پروژه مانهاتان گزارشی از اندازه‌گیری تخریب تولید شکافت هسته‌ای از اورانیم فعال شده را منتشر کردند. آنها یک تکه اورانیم فعال شده را به‌وسیله یک طناب در داخل فلاسک پر از آب قرار دادند و برای تغییر دما از دماسنج بکمن استفاده کردند. به این ترتیب کل سیستم در داخل حمام آب قرار داشت و تشکیل یک گرماسنج داده بود. کل تجهیزات در یک گوشه‌ای از یک آزمایشگاه با دمای بالا، در داخل یک محفظه سربی ۸ اینچی قرار گرفته بود. جانستون در سال ۱۹۶۵ مشاهدات گرماسنجی تولیدات شکافت هسته‌ای را که حرارتش از سوخت پلوتونیم بود منتشر کرد و کارش را با استفاده از یک میکروگرماسنج با نمونه‌ای شامل ۴۰ میکروگرم  $PuO_2$  غیر قابل تابش در داخل دو کپسول آلومینیومی به انجام رساند [۱۰].

زنجیره تخریب  $^{228}Th$  و  $^{229}Th$  در شکل (۶) نشان داده شده است. در بین بچه‌های  $^{229}Th$ ، ایزوتوپهای  $^{213}Bi$  و  $^{209}Tl$  نسبت شاخه‌ای<sup>۴</sup> نسبتاً بالایی دارند. فعالیت این گونه‌ها بعد از چندین ماه به حالت تعادل عمومی مؤثر با فعالیت  $^{229}Th$  می‌رسد. تخریب این بچه‌های  $^{232}U$  و  $^{233}U$  بخش اندکی از حرارت کل تولیدی را شامل می‌شود [۱۱].

شیشه تولیدی دارای دمای بالای شیشه‌ای شدن (Tg) و پایداری حرارتی بالایی بوده و از توانایی بالایی به‌منظور نگهداری زباله‌ها و مواد زاید پرتوزا برخوردار می‌باشد [۷].

عملکرد گرماسنج کاوشگر دیفرانسیلی نوسانی<sup>۱</sup> (ODSC) و تکنیک (لیزر- فلش)<sup>۲</sup> در تعیین ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی مواد بر پایه زیرکونیا، در مقایسه با پتانسیل سوخت هسته‌ای نیز بررسی شده است. مواد مورد آزمایش، عبارت‌اند از  $(Zr_{1-x-y}O_2)$  یا  $Me=Ce$  یا  $Y_xEr_yMe_zO_2$ . گرمای ویژه اندازه‌گیری شده حدود ۰/۴ ژول به‌ازای واحد جرم برای اختلاف یک درجه کلونین  $(\frac{J}{kg})$  و ضریب هدایت حرارتی در محدوده ۲ تا ۳ وات به ازای اختلاف یک درجه کلونین در واحد طول  $(\frac{Watt}{K.m})$  (۲-۳) می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری (ODSC) برای تعیین گرمای ویژه (Cp) ضروری است و ضریب هدایت حرارتی از دو اندازه‌گیری مکمل هم که یکی با نمونه‌های نازک و دیگری با نمونه‌های ضخیم انجام شده، استنتاج گردیده است. تکنیک (لیزر- فلش) مستقیماً ضریب نفوذ حرارتی نمونه را تعیین می‌کند، در نتیجه گرمای ویژه Cp با مشخص شدن ضریب هدایت حرارتی تعیین می‌شود. اندازه‌گیری ODSC از طریق موقعیت نمونه روی حامل، تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه، این مسئله، قابلیت تکرار پذیری آزمایش‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. تکرارپذیری اسکن به‌وسیله تکنیک (لیزر- فلش) از دقت بالایی برخوردار است. ضریب هدایت حرارتی با افزایش غلظت پایدارکننده (Y, Er) کاهش می‌یابد. این مسئله بر اساس مدلی که شامل غلظت و ابعاد موقعیتهای اکسیژن است قابل توجیه می‌باشد [۸].

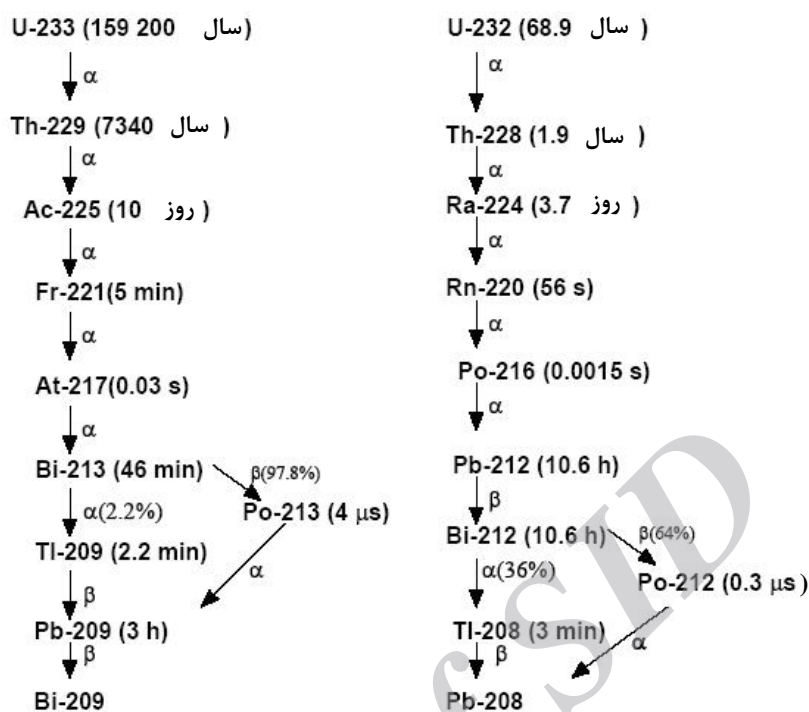
### ۳- ملاحظات حرارت تخریب

حرارت تخریب، حرارت مربوط به انرژی می‌باشد که در نمونه ذخیره می‌شود و سپس به‌صورت تابش ساطع می‌گردد. این مسئله از سه دیدگاه قابل ملاحظه است:

۱- حرارت زیادی که از مقادیر زیاد ایزوتوپ‌های پرتوزا از قبیل تولیدات شکافت هسته‌ای بعد از خاموش کردن راکتور وجود دارد.

3. Way and Wigner  
4. Branching Ratio

1. Oscillating Differential Scanning Calorimeter  
2. Laser- Flash Technique



شکل ۶- تخریب پرتوزای بچه‌های اورانیوم ۲۳۳ و ۲۳۲ ( $^{233}\text{U}$  و  $^{232}\text{U}$ ) [۱۱]

پارامترهای فعالیت ویژه با واحد کوری برگرم ( $\text{Ci}\cdot\text{g}^{-1}$ ) به ترتیب عبارتند از: ( $\text{Th-232}: 1\cdot 10^{-7}$ ), ( $\text{V-238}: 3\cdot 10^{-7}$ ), ( $\text{In-115}: 5\cdot 10^{-12}$ ) و ( $\text{Re-187}: 4\cdot 10^{-8}$ ) (مینای محاسبات فعالیت کبالت ۶۰ حدود  $1\cdot 10^3 \text{ Ci}\cdot\text{g}^{-1}$  است که هر کوری معادل با  $3.7\cdot 10^{10}$  تجزیه در ثانیه است.) [۱۲].

عمده تابش‌های این ایزوتوپها شامل ذرات  $\alpha$  و  $\beta$  است که تابش نافذی ندارند و در نتیجه برای جابجایی این ذرات نیاز به پوشش و محفظه قوی نیست، حتی زمانی که سری تخریب‌های ایزوتوپ‌هایشان را نیز در نظر بگیریم. ولی محافظت در برابر مسمومیت فلزات سنگین نباید فراموش شود.

#### ۴-۲ ایزوتوپ‌های پرتوزای مصنوعی و تولیدات شکافت

##### هسته‌ای

تولیدات شکافت هسته‌ای ذرات پرتوزایی هستند که به ترتیب به وسیله تابش‌های بتا و گامای ذرات دیگر مورد تخریب قرار می‌گیرند. این مواد از نظر خواص دارای نیمه عمر کوتاه و فعالیت

#### ۴- ملاحظات ایمنی

جهت بررسی ملاحظات ایمنی که لازم است هنگام انجام گرماسنجی مواد پرتوزا مورد توجه قرار دهیم، بایستی با نوع مواد پرتوزا از نظر میزان تابش‌ها و ماندگاری آنها بیشتر آشنا شویم. در این بخش، انواع مواد پرتوزا را از این دیدگاه بررسی می‌کنیم و سپس موارد ایمنی مورد نیاز را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم.

#### ۴-۱ مواد پرتوزای طبیعی

این مواد در طبیعت به وفور یافت می‌شوند و همانطوری که انتظار می‌رود دارای نیمه عمر زیادی هستند. (بالای  $10^9$  سال). بیشتر این مواد به صورت ایزوتوپ‌های پرتوزا موجود هستند و از لحاظ گرماسنجی مشکل خاصی ندارند. ۶۳٪ رنیم موجود را ایزوتوپ‌های پرتوزای ۱۸۷ تشکیل می‌دهند. ۹۵/۷۲٪ ایندیم را ایزوتوپ‌های پرتوزای ۱۱۵ ( $\text{In-115}$ ) تشکیل می‌دهند.  $\text{Th-232}$  و  $\text{V-238}$  تنها ذرات طبیعی موجود هستند. برای این چهار ایزوتوپ مقادیر

در بحث تابش زمان کم آزمایش و دور بودن از منبع تابش بسیار حایز اهمیت است. هرچقدر فاصله کمتر، خطر برای آزمایشگر بیشتر (قانون مربع معکوس). استفاده از حفاظ باعث کاهش شدت تابش می‌شود که این بر عهده فلز جاذب مورد استفاده در گرماسنج است که بین آزمایشگر و منبع تابش قرار گرفته است. البته نوع محفظه به نوع تابش بستگی دارد. استفاده از هر سه روش برای محافظت آزمایشگر توصیه می‌شود.

#### ۶- اتفاقات بحرانی

بسیاری از اکتینیدها به صورت خود به خود و همچنین زمانی که یک نوترون، گیر می‌اندازند، می‌توانند شکافته شوند. بنابراین در صورتیکه مواد حاصل از شکافت هسته‌ای به مقدار کافی موجود باشند، یک واکنش زنجیره‌ای می‌تواند جایگزین شود و مقداری نوترون و اشعه گاما آزاد کند. برای انجام واکنش شکافت هسته‌ای خود به خودی، نیاز است که جرم مواد قابل شکافت به یک حد بحرانی رسیده باشد. این مقدار بحرانی بستگی به شکل ظاهری ماده و وجود مواد منعکس کننده نوترون دارد. به عنوان مثال، جرم بحرانی برای یک کره غیر انعکاسی از جنس اورانیم محتوی V-235، 93.5%، برابر ۴۸/۶ کیلوگرم است. یک کره انعکاسی آبی محتوی یک محلول آبی با غلظت ۵۲ گرم V-235 به ازای هر لیتر آب تنها دارای جرم بحرانی ۰/۸۴ کیلوگرم می‌باشد. اگر شخصی در مطالعات گرماسنجی خود نیاز به مواد شکافت هسته‌ای دارد باید احتمال خطرات بحرانی را در نظر بگیرد. معمولاً مقدار مواد پرتوزای شکافت هسته‌ای که در مطالعات گرماسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد به حدی نیست که ایجاد مشکلات جدی نماید. به طور مثال، حتی اگر از پلوتونیم در مقادیری کمتر از ۱۵۰ گرم استفاده شود، مشکلات ایجاد شده بسیار کم خواهد بود [۲۲-۱۸].

#### ۷- عملیات از راه دور گرماسنج‌ها

##### ۷-۱ گلاو باکس<sup>۱</sup>

ویژگی گرماسنجی عناصر ترانسورائیک این است که باید تمهیداتی برای حمایت از آزمایشگر و همچنین جلوگیری از انتشار آلودگی در محیط در نظر گرفته شود. یکی از کارهایی که می‌توان انجام داد، آن است که از یک سیستم کاملاً بسته استفاده کنیم تا آزمایشگر

بالا هستند. به عنوان مثال La-140 دارای نیمه عمر ۴۰/۲ ساعت و فعالیت ویژه  $۵.۶ \times 10^6$  (Curie/g) است. بنابراین در هنگام استفاده از این مواد، محافظت در مقابل تابش‌ها مسئله‌ای ضروری است. خوشبختانه برای گرماسنجی معمولی می‌توان از عنصرهایی با ایزوتوپ‌های غیر پرتوزا استفاده کرد. مطالعات خود گرمایشی برای تولیدات شکافت هسته‌ای، نیاز به استفاده از ایزوتوپ ویژه دارد. تولید ایزوتوپ‌های پرتوزا به وسیله استفاده از شتاب‌دهنده‌های ذرات پر انرژی و ذرات پرتوزا که در طبیعت یافت نمی‌شوند در جدول نوکلیدس موجود است [۱۳].

#### ۳-۴ مواد ترانسورائیک

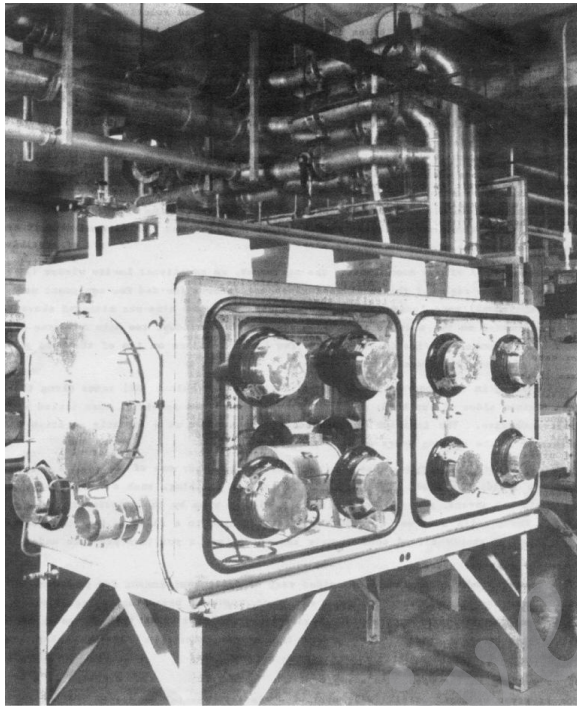
موادی که در جدول تناوبی، عدد اتمی بیشتر از ۹۲ دارند جزء مواد ترانسورائیک قرار می‌گیرند. این مواد به صورت مصنوعی تولید می‌شوند و در مقایسه با تولیدات شکافت هسته‌ای عمر بیشتری دارند و عموماً پرتوهای آلفا و گاما منتشر می‌کنند، اگر چه تعداد اندکی از آنها پرتو بتا نیز ساطع می‌کنند. در جایجایی فلزات سنگین پرتوزای سمی باید کمال احتیاط را در نظر گرفت زیرا بسیاری از مواد ترانسورائیک مخصوصاً Pu-239، قابلیت شکافته شدن هسته‌ای دارند و باید در طراحی تجهیزات مربوط به این مواد دقت لازم اعمال گردد. همچنین در مطالعه ایزوتوپ‌های اورانیم با قابلیت شکافت هسته‌ای بالا همین موارد را باید در نظر گرفت [۱۴].

#### ۵- حفاظت در برابر تابش

تابش‌های هسته‌ای که در فرایند گرماسنجی مواد پرتوزا با آن مواجه هستیم عموماً آلفا و بتا و گاما هستند. این تابش‌ها به صورت سخت (اشعه گاما) و یا نرم (ذرات آلفا و بتا) می‌باشند. نوع حفاظت خارجی از آزمایشگر بستگی به ویژگی‌های این ذرات دارد. ذرات آلفا تا زمانی که به لایه خارجی پوست نرسند خطری ایجاد نمی‌کنند و دارای نفوذ کمی هستند ولی ذرات بتا قابلیت نفوذ بیشتری نسبت به ذرات آلفا دارند. در حالت کلی به سهولت می‌توان آزمایشگر یا تکنیسین را در برابر این تابش‌ها محافظت نمود. قسمت مشکل و مسئله ساز، حفاظت در برابر تابش‌ها گاما می‌باشد که باید جهت محافظت تکنیسین از محافظ قوی استفاده شود. سه پارامتر عمومی جهت حفاظت از تابش وجود دارد که عبارت‌اند از: زمان، فاصله و محفظه [۱۷-۱۵].

1. Glove Box

پلاستیک در راستای مرکز پلمپ بریده می‌شود. انتقال به داخل جعبه ساده تر است و فقط یک پلمپ چهار لایه پلاستیک دارد. جعبه‌های مورد استفاده در تحقیق معمولاً دارای حفره‌های انتقالی به قطر ۲۲/۵ اینچ می‌باشند. نکته‌ای که در انتقال مواد باز باید در نظر گرفت مهارت باز کردن درزهای پلمپ شده است.



شکل ۷- گلاوباکس مورد استفاده در آزمایشگاه آرگونه ایالات متحده [۲۴]

سیستم تهویه گلاوباکس‌ها متفاوت از سیستم‌هایی است که در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرند و اساس کار آنها به صورت یک مرتبه عبور است. هوا در هنگام ورود به داخل جعبه و همچنین در هنگام خروج، صاف می‌شود. هوای آزمایشگاهی معمولی برای گلاوباکس مناسب نبوده و هوای خشک شده عاری از گازهای موجود یا هوای اتمسفری بی اثر خشک شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملیات سیستم تهویه بسیار مشکل است. طراحی سیستم تهویه باید به صورتی باشد که امکان جریان هوای کافی برای اهداف عملیاتی در حالی که فشار منفی دیفرانسیلی (۱/۰- تا ۰/۲) اینچ آب است دارا باشد. اگر دستکشها یا صفحات به‌طور ناگهانی شکسته شوند سیستم باید قادر باشد که این موج ناگهانی هوا را کنترل کند [۲۴].

تماس مستقیمی نداشته باشد، این سیستم، گلاو باکس است. طراحی گلاوباکس‌ها متفاوت بوده و به صورت‌های گوناگون طراحی می‌شوند که در واقع این طراحی‌ها به کاربرد آنها بستگی دارد ولی اکثر آنها تقریباً هم شکل هستند. نوعی که اینجا توضیح داده می‌شود بر اساس طراحی استندلر، اهاتون و دانستر<sup>۱</sup> است [۲۳] ابعاد گلاو باکس‌ها باید به صورتی باشد که آزمایشگر بتواند به وسیله گلاو پورته‌ها به هر قسمت از آن دسترسی داشته باشد و این نیازمند تعبیه مناسب گلاوپورته‌هاست.

در ساختمان گلاوباکس‌ها از چوب، پلاستیک، آلومینیم و فولاد استفاده می‌شود. استفاده از فولاد نرم و رنگ زدن روش مناسب و ارزانی برای ایجاد مقاومت خوردگی است. کف‌ها و دیواره‌های گلاوباکس از صفحات و ورقه‌های فلزی درست شده است. در گلاوباکس‌ها دو نوع صفحه مرئی وجود دارد: یکی آن دسته که برای گلاوپورته‌ها استفاده می‌شوند به قطر ۶-۸ اینچ و دیگری صفحاتی که برای روشنایی و دیدن داخل گلاوباکس تعبیه شده اند. گلاوباکس‌های مورد استفاده در تحقیق دارای پنجره‌هایی با شیشه‌های ایمنی است که این شیشه‌ها از نوع شیشه‌های جلوی اتومبیل می‌باشند. البته باید در نظر داشت که گلاوپورته‌ها دید داخل گلاوباکس را تا اندازه‌ای محدود می‌کنند. مواد دیگری که در صفحات گلاوباکس‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل صفحات شیشه‌ای آب دیده و پلاستیکی‌هایی مانند لوسیت می‌باشند. گلاوپورته‌ها از پلاستیک ساخته می‌شوند و در داخل حفره‌هایی که بر روی صفحه مرئی است قرار می‌گیرند. تمام حفره‌ها به شکل بیضی یا دایره هستند. در اطراف گلاوپورته‌ها رینگهای لاستیکی و فلزی قرار گرفته‌اند. شکل (۷) تصویری از گلاوباکس پلوتونیمی است که در بخش فناوری شیمیایی در آزمایشگاه بین المللی آرگونه در ایالات متحده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از منابع آلودگی محیط، نقل و انتقال مواد به داخل و خارج گلاوباکس است. یکی از روش‌های معمول انتقال مواد استفاده از کیسه‌های پلاستیکی غیر الکتریکی سربسته می‌باشد که معمولاً از جنس پلی وینیل کلراید به ضخامت ۲۰ میلی متر است. از تکنیکهای مختلفی برای انتقال مواد استفاده می‌شود ولی عموماً جهت انتقال به خارج از جعبه سه پلمپ حرارتی وجود دارد و

1. Standler, Ahaton & Danster



از توضیحات فوق در مورد گلاوباکس و پیچیدگی‌های آن واضح است که گرماسنجی در چنین وسایلی مشکل و اغلب خسته کننده است. وسایل گرماسنجی نیازمند اصلاحاتی برای عملیات گلاوباکس می‌باشند. خود گلاوباکس برای تطابق با گرماسنج و وسایل جانبی آن نیازمند طراحی ویژه‌ای است.

#### ۲-۲ هود

مدت زمان زیادی است که هود برای عملیات شیمیایی شامل مواد پرتوزا مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی از زمانی که احتمال گسترش آلودگی در مقایسه با یک جعبه بسته (گلاوباکس) بیشتر شده است، بیشتر عملیاتی که در مورد مواد ترانسورانیکی انجام می‌گیرند در سیستم‌های بسته انجام می‌شوند. با وجود این به دلیل مشکلاتی که در هنگام کار با یک گرماسنج قطره‌ای با دمای بالا در یک گلاوباکس وجود دارد محققین از هود بزرگی که شامل راکتوری با سوخت پلوتونیم می‌باشد استفاده می‌کنند، که موفقیت آمیز بوده است [۲۵].

قرار دادن نمونه در داخل یک گرماسنج قطره‌ای کاری بسیار دشوار است که نیازمند مهارت ویژه‌ای است. شکل (۸) یک گرماسنج قطره‌ای را که در داخل محفظه بزرگ آلومینیمی به ابعاد ۷ اینچ در ۱۰ اینچ و ارتفاع ۸ اینچ قرار دارد را نشان می‌دهد. قسمت جلویی هود به وسیله درهایی به عرض ۴ فوت بسته شده‌اند، هر یک از این درها شامل پنجره‌هایی از جنس لوسیت به مساحت ۳ فوت مربع می‌باشد. پنجره‌های روی در نزدیک تجهیزات هر کدام دارای دو دستکش ساق بلند نئوپرن هستند. در روی دیواره‌های هود نیز، که نزدیک تجهیزات هستند، پنجره لوسیت به ابعاد ۲۳ اینچ در ۱۶ اینچ قرار گرفته است. در سمت راست این پنجره دو عدد دستکش نئوپرنی (برای کنترل تجهیزات در حین آزمایش) قرار گرفته است و یک پنجره دیگر با همان اندازه در بالای محفظه پیرومتر در داخل دیوار قرار داده شده است و در سمت راست آن، دو عدد دستکش نئوپرنی برای اضافه کردن به ترکیبات داخل هود تعبیه شده است. دو عدد پنجره لوسیت در بالای هود نور خوبی به وسیله لامپ‌های فلورسنت مهیا می‌کند. تمامی کف و دیوارهای آلومینیمی هود و تمام حفره‌ها و شکافهای محسوس، به وسیله یک ماده چسبنده لاستیکی از جنس سیلیکون پوشیده شده است. داخل هود همیشه مقدار کمی فشار منفی وجود دارد حتی زمانی که

۲/۳ درها باز باشد. پروبهای (میله نازک و بلند) نمایش تابش در خارج از هود قرار گرفته اند و اگر لازم باشد یکی از آنها می‌تواند متحرک باشد و در داخل هود قرار گیرد. آزمایشگر قبل از ورود به هود باید چکمه پلاستیکی مناسب، کاور، دستکش و کلاه پلاستیکی پوشیده باشد. کلاه پلاستیکی شامل یک لوله پلاستیکی است که به وسیله آن هوای تصفیه شده برای آزمایشگر تأمین می‌شود. این هوا به صورت پیوسته بوده و باعث ایجاد یک فشار مثبت در زیر هود می‌شود. هود باعث می‌شود که کنترل خوبی بر روی موادی شامل پلوتونیم وجود داشته باشد و همچنین فرصت مناسبی برای استفاده از وسایل آزمایشگاهی و سهولت در تنفس بوده و نیز حفاظ خوبی برای آزمایشگر در مقابل پرتوهای آلفاست. قیمت یک گرماسنج با سیستم هود کمتر از قیمت یک گرماسنج با ساختار گلاوباکس است.

#### ۳-۷ غارها

غارها یا سلول‌های داغ حفاظ مناسبی برای آزمایشگر در مقابل تابش‌های خطرناک گاما ایجاد می‌کنند. ایزوتوپ‌ها هنگامی که جابجا می‌شوند از خود پرتوهای آلفا ساطع می‌کنند، بنابراین باید برای پیشگیری از گسترش آلودگی تمهیداتی در نظر گرفته شود. همانطوری که در بخش‌های قبلی متذکر شدیم گرماسنجی تولیدات شکافت هسته‌ای بدون تخلیه حرارت تخریب امکان‌پذیر نیست. مشکل عملیات گرماسنجی در داخل غار استفاده از وسایل کنترل از راه دور می‌باشد و باید از افراد متخصصی که با وسایل گرماسنجی کاملاً خودکار با قابلیت کنترلی بالا آشنا هستند استفاده شود. توضیح روشنی از یک سلول داغ (غار) باعث ایجاد سوالات متعددی می‌شود. توضیحات بعدی مبتنی بر گزارش کلمن و همکاران و ماو و همکاران می‌باشد [۲۶-۲۷].

در واحدهای کوچکتر می‌توان بعضی ایزوتوپهای بالغ بر ۱۰ کوری به دست آورد که این مستلزم استفاده از کنترل کننده است. عموماً دیواره‌های محفظه غار از چندین اینچ فولاد با ۳ یا ۴ فوت بتن ساخته شده است [۲۷]. کنترل کننده‌هایی که در این مجموعه استفاده می‌شوند از نوع ترکیبی می‌باشند. نمای این مجموعه شامل پنجره‌ها، پریسکوپ، آینه‌ها و تلویزیون می‌باشد. پنجره‌های مورد استفاده از نوع پنجره‌های دوجداره با ضخامتی حدود ۱ اینچ شیشه سربی است که با محلول  $ZnBr_2$  پر شده است که در نتیجه خود

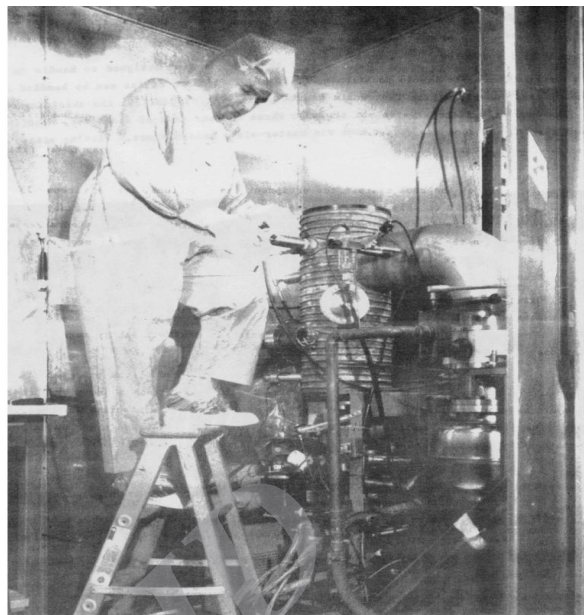
مدنظر قرار گیرد. یک نمونه رفتار ضربانی پیوسته و تابش داریم در مواد نیمه هادی وجود دارد که بیانگر تابش‌های گاما است. همچنین کابلها و سیم کشی‌ها می‌توانند تحت تأثیر میدان‌هایی با شدت تابشی بالا قرار بگیرند.

آزمایشگری که دمای نمونه را به وسیله پیرومتری آپتیکی اندازه‌گیری می‌کند باید امکان تغییر خواص اپتیک شیشه را به‌عنوان نتیجه خطر تابش در نظر بگیرد. خواص انتقالی از پنجره‌ها و منشورها باید به دقت در طول آزمایش در حالتی که با تابش بالا روبرو هستیم مورد توجه قرار گیرد تا باعث ثبت اشتباهی دما نگردد [۲۸].

### ۹- پاکسازی تجهیزات و مهارت‌ها

یک آزمایش پرتوزا زمانی یک آزمایش خوب است که پاکسازی تجهیزات و مواد مضر که در پایان مطالعه باقی می‌مانند در دستور کار قرار گیرند. در ایالات متحده قوانین فدرال مربوط به کار با مواد پرتوزا دارای جزئیاتی در مورد بسته‌بندی، انتقال و دفع زباله‌های حاصل از پاکسازی در عملیات آزمایشگاهی است [۲۹]. نوع فرایند پاکسازی به خود آزمایشگر بستگی دارد. توضیحات خوبی از فنون پاکسازی در استانداردهای آیرس ( پاکسازی راکتورهای هسته‌ای و تجهیزات) ارائه شده است. فرایندهای پاکسازی که برای وسایل آزمایشگاهی به کار گرفته می‌شوند شامل تمیز کردن سطوح با محلولهای تمیز کننده ( شامل تمیزکننده فراسوخت)، تمیز کردن با فشار جت، پاشیدن سریع ماسه روی سطوح یا در صورتی که سطوح کوچک باشند تا دفع کامل آنها وسایل در داخل یک محفظه قرار داده شوند. این فرایندهای پاکسازی نتیجتاً برای دفع دو نوع زباله خشک و تر است. اگر گرماسنجی فقط برای مقدار بسیار کمی ماده پرتوزا باشد، زباله‌های تولید شده در سطح پایینی قرار می‌گیرند، ولی اگر ۱۰ نانوکوری از ترانسورانیک‌ها به ازاء هر گرم زباله باشند دیگر آن را در سطح پایین نمی‌دانیم.

برای دفع بیشتر زباله‌های خشک با سطح پایین از دفن سطحی در زیر زمین استفاده می‌شود، اگر چه می‌توان از روش‌های ساده‌ای چون سوزاندن نیز استفاده کرد. زباله‌های تر، در صورت امکان ابتدا حجمشان کاهش می‌یابد و سپس در داخل سیمان یا سایر مواد قابل انجماد تثبیت می‌شوند و در داخل زمین دفن می‌گردند. در



شکل ۸- هود مخصوص جهت تعبیه کیسول حاوی نمونه پرتوزای داخل گرماسنج قطرهای با دمای بالا [۲۵]

پنجره‌ها چندین فوت ضخامت خواهند داشت. تهویه هوا در داخل غارها به‌صورت پیوسته و با یک فشار منفی انجام می‌شود. تهویه هوا بخش بسیار مهم مجموعه است که حتی در زمانهای تعطیلی کامل واحد باید برای کنترل انتشار تابش‌های آلفا از ایزوتوپها، فعال باشد. نقل و انتقال مواد به داخل و خارج مجموعه به‌وسیله سبدها، کیسه‌ها، کیف‌ها و گاری‌های محفظه دار انجام می‌گیرد. این که تنها نمونه‌های محدودی از گرماسنجی در داخل غارها صورت می‌پذیرد به این دلیل است که این تجهیزات محیط مناسبی برای یک گرماسنجی ایده‌آل نیستند.

### ۸- استاندارد وسایل مورد استفاده در گرماسنجی از دیدگاه حفاظتی و خطر تابش

آزمایشگری که گرماسنجی را به‌وسیله عملیات از راه دور که در بخشهای قبلی توضیح داده شد، انجام می‌دهد باید این مطلب را در نظر بگیرد که تجهیزات خود را تا حد امکان دور از سیستم بسته مورد استفاده، نگهداری کند. تعمیر وسایلی که در گلاوپورت‌ها و کنترل‌کننده‌ها قرار دارند تقریباً کاری غیر ممکن است. بعضی از وسایل نسبت به تابش حساس هستند و زمانی که باید در میدان‌هایی با شدت تابش بالا استفاده شوند، بایستی این مسئله در

- [6] M. A. Pouchon, C. Degueldre, P. Tissot, "Determination of the thermal conductivity in zirconia based inert matrix nuclear fuel by oscillating scanning calorimetry and laser flash", *Thermochemica Acta*, Vol. 323, pp. 109-121, (1998).
- [7] A. Banenjee, S. Raju, R. Divakar, E. Mohandas, "High temperature alloy D9 using, drop calorimetry based enthalpy increment measurements", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 28, pp. 97-108, (2007).
- [8] A. Katz, A. R. Brough, R. J. Kirkpatrick, L.J. Struble, G. K. Sun, J. F. Young, "Cement solidification of simulated off-gas condensates from vitrification of low-level nuclear waste solutions", *Waste Managements*, Vol. 21, pp.543-553, (2001).
- [9] A. Stanimirovic, G. Vukovic, K. Maglic, "Thermophysical and thermal optical properties of vanadium by Millisecond calorimetry between 300 and 1900K", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 20, pp. 325-332, (1999).
- [10] J. C. Lashley, A. Migliori, J. Singleton, R. McQueeney, M.S. Blaue, R. A. Pereyra, J. L. Smith, "The electron heat capacity of High-purity alpha and stabilized-delta Plutonium", *JOM*, Vol. Sep., pp.34-37, (2003).
- [11] V. E. Viola, R. Bougault, "Calorimetry", *The European Physical Journal A*, Vol. 30, pp. 215-226, (2006).
- [12] H. Kleykamp, "Selected thermal properties of beryllium and phase equilibria in beryllium systems relevant for nuclear fusion reactor blankets", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.294, pp. 88-93, (2001).
- [13] R. Colle, B. E. Zimmerman, "A dual- compensated crygenic microcalorimeter for radioactivity standardizations", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 56, pp.223-230,(2001).
- [14] M. Loidl, E. Leblanc, M. Rodrigues, B. Leprince, L. Eglin, H. Rotzinger, M. Link, A. Burk, T. Scarbrough, A. Fleischmann, C. Enss, "Nuclear and atomic, data determination with metallic magnetic calorimeters", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 559, pp. 769-771, (2006).
- [15] Y. Linard, I. Yamashita, T. Atake, J. Rogez, P. Richet, "Thermochemistry of nuclear waste glasses: an experimental determination", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 286, pp. 200-209, (2001).
- [16] C. Genazzini, R. Zerbino, A. Ronco, O. Batic and G. Giaccio, "Hospital waste ashes in Portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1643-1650, (2003).
- [17] I. Bohnet, D. Kummerow, K. Wick, "Influence of radiation damage on the performance of a lead/scintillator calorimeter investigated with 1-6 Ge V electrons", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 490, pp. 90-100, (2002).

ایالات متحده زباله‌هایی که شامل بیش از ۱۰ نانوکوری ترانسورائیک بر هر گرم زباله و به TRU موسوم است باید از سایر زباله‌های غیر TRU جدا و در روی زمین انبار شوند. بنابراین امکان بروز مشکل حتی برای کسی که مهارت پاکسازی دارد در مطالعات گرماسنجی غیر قابل اجتناب است [۲۹].

### ۱۰- نتیجه‌گیری

مطالعات گرماسنجی مواد پرتوزا دارای حساسیت‌ها و شرایط ویژه‌ای است که هنگام انجام این گونه آزمایش‌ها بایستی مورد توجه قرار گیرد. اولین مشکل در راستای گرماسنجی این مواد بررسی اثر تخریب حرارتی آن‌ها است که بایستی در محاسبات، مد نظر قرار گیرد. دومین مشکل اثرات تابش‌های مواد پرتوزا می‌باشد که چه در بحث گرماسنجی مواد هسته‌ای طبیعی و چه در بحث گرماسنجی مواد زائد هسته‌ای جهت حفظ ایمنی آزمایشگر بایستی مورد توجه جدی قرار گیرد. همچنین موارد ایمنی و بازدارنده نظیر مدت در معرض تابش، فاصله از مواد پرتوزا و همچنین استفاده از تجهیزات و محفظه‌های ایزوله نیز کاملاً رعایت گردد.

### مراجع

- [1] C. R. Rudy, D. S. Bracken, M. K. Smith and M. J. Schanfein, "Calorimetry of TRU waste materials" *Spectrum 2000 International Conference on Nuclear and Hazardous Waste Management Chattanooga, TN*, September 24-28,(2000).
- [2] D.S. Bracken and C. R. Rudy, "Principles and applications of calorimetric assays", *LA-UR-07-5226*, Los Alamos National Laboratory University of California Report, (2007).
- [3] C. Y. Yi, "Measurement of escape energy from absorber in calorimetric determination of 192Ir radioactivity", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 522, pp.591-594, (2004).
- [4] E. Strachenko, G. Blanchot, M. Bosman, M. Cavalli-Sforza, A. Karyukhin, S. Kopikov, A. Miagkov, M. Nessi, A. Shalanda, M. Soldatov, A. Solodkov, A. Soloviev, V. T. Sitnikov, A. Zaitsev, "Cesium monitoring system for ATLAS tile hadron calorimeter", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 494, pp.381-384, (2002).
- [5] I. W. Donald, B. L. Metcafe, "Thermal properties and crystallization kinetics of sodium aluminophosphate based glass", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 348, pp. 118-122, (2004).

- [18] R. I. Dzhelvadin, " The LHCb hadron calorimeter", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 494, pp. 332-339, (2002).
- [19] International Atomic Energy Agency, Symposium on the OKlo Phenomenon, Ribreville, Gabon, Vienn, (1975).
- [20] Katz, J. J. and Rabinowitch,, The chemistry of Uranium , National Nuclear Energy Series, Manhatan Project Technical Section, Division VIII, Vol. 5, Mc Grow-Hill, New York, (1951).
- [21] Clark, H.K., Handbook of Nuclear Safety, DP-532, Dupont , (1961).
- [22] Appleton, G. J. and Dunster H. J., Recommended practice in the safe handling of Plutonium in laboratories and plants, AHSB(PR) R6, United Kingdom Atomic Energy Authority, (1961).
- [23] Oetting F. L., The Chemical Therodynamics of Nuclear Materials IV, The high temperature enthalpies of Plutonium monocarbide and Plutonium sesquicarbide, J. Nuclear Mater. , 88, 267-272, (1980).
- [24] Balakin, S. A. Skorov, D. M. and Yartsev, V. A., Methods of determining the thermophysical properties of reactor materials at elevated temperature, Energy, Ser. 41, no. 4, 271-273, (1976).
- [25] Day, R.A. and Canon, Direct calorimetric study of fission product decaying active slugs, National Nuclear Energy Series, Manhatan Project Technical Section, Division IV, Plutonium Project Record, Mc Grow-Hill, New York, (1951).
- [26] Moe, H. J. Lasuk, S.R. and Schumacher, Radiation safety technical training course, ANL-7291, Argonne National Laboratory, Sep. (1966).
- [27] Kibbey, A. H. and Godbee, H. W., A State of the art report on low level radioactive waste treatment, ORNL/TM-&427, Oak Ridge National Lab., Sep. (1980).
- [28] Steindler, M. J., Comments on the Handling of plutonium, aNL-6021, Argonne Nat. Lab. Jun. (1959).
- [29] Abousahl, S., Vanbelle, p. and Ottmar, H., Measurment of the Pu content and isotopic abundances by combined calorimetry, Neutron Coincidence Counting and Gammma Spectrometry, Proc. 25th Annual ESARDA Symp., May, 13-15, Stochholm, Sweden, (2003).

Archive of SID