



دستور کار آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی

تهیه و تنظیم

رضاملک زاده (کارشناس آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی، کارشناس ارشد فیزیک پزشکی)

دکتر توحید مرتضی زاده (دکترای فیزیک پزشکی)

با همکاری:

دکتر جلیل پیرایش اسلامیان

عضو هیئت علمی گروه فیزیک پزشکی

مهر ۱۳۹۸

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

معرفی آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی گروه فیزیک پزشکی

آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی تجهیزات مطلوبی در زمینه پایش پرتوهای فردی و محیطی، انواع چشمه های پرتوزا استاندارد، انواع حفاظ های پرتویی پرسنل درمانی و تجهیزات کنترل کیفی دستگاه های تصویر برداری پزشکی را دارا می باشد که برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی توانایی انجام مطالعات بروزی را در این زمینه ها میسر کرده است. از جمله این تجهیزات می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مجموعه کامل اسپکتروسکوپی پرتوهای گاما
- مجموعه کامل دزیمتری ترمولومینسانس (شامل TLD reader، دزیمتر های GR-200)
- مجموعه کامل گاما کانتر جهت محاسبه و تعیین تابش گامای منعکس شده به وسیله یک رادیو نوکلئید در نمونه بیماران
- مجموعه کامل دزیمترها و فانتوم های کنترل کیفی دستگاه های رادیولوژی، ماموگرافی و سی تی اسکن
- دو مجموعه کامل آشکار ساز گایگر- مولر مدل NT-112
- فانتوم استاندارد CTDI جهت کنترل دوز و کیفیت تصویر سی تی
- فانتوم نیم تنه معادل بافت بدن جهت کنترل دوز
- دزیمتر محیطی UV-Vis-IR meter
- کیت چشمه های مرجع آزمایشگاهی: Co-60، Cs-137 و Am-241
- کیت صفحات جاذب سربی در ضخامت های مختلف
- انواع روپوش های سربی مانند: گردنبند، دستکش، لباس و شیشه سربی
- دستگاه آموزشی فلوروسکوپی اشعه ایکس

دکتر جلیل پیرایش اسلامیان

مدیر گروه فیزیک پزشکی

پاییز ۱۳۹۸

فهرست

(۱) طیف سنجی گاما

۱	آشنایی با آشکارسازهای سوسوزن و طیف یک ماده پرتوزا (اسپکتروسکوپی گاما).....	۶
۱-۱	هدف آزمایش.....	۶
۲-۱	وسایل آزمایش.....	۶
۳-۱	تئوری آزمایش.....	۶
۴-۱	روش کار.....	۱۹
۵-۱	پرسش ها.....	۱۹

(۲) ترمولومینسانس دزیمتری

۲	آشنایی با نحوه انجام و خوانش دزیمترهای ترمولومینسانس.....	۲۰
۱-۲	هدف آزمایش.....	۲۰
۲-۲	وسایل آزمایش.....	۲۰
۳-۲	تئوری آزمایش.....	۲۰

(۳) ضمایم

۱	راهنمای تصویری نحوه کار عملی آزمایش طیف سنجی گاما.....	۳۵
۲	منابع و ماخذ.....	۴۲

نکات ایمنی کار در آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی

- ۱) چشمه رادیواکتیو را هرگز لمس نکنید و در مسیر پرتوهای آن قرار نگیرید.
- ۲) چشمه پرتوزا را تنها در زمان اندازه گیری از جای خود بیرون بیاورید.
- ۳) پس از اتمام کار چشمه های مورد استفاده را در جای خود قرار دهید.
- ۴) در هنگام کار کردن با دستگاه هایی که دارای ولتاژ بالا هستند، مراقب باشید که با بخش های فلزی سیم ها تماس نداشته باشید.
- ۵) جهت هرگونه جابجایی وسایل آزمایشگاه با مسئول آزمایشگاه هماهنگی های لازم را انجام دهید.
- ۶) هنگام کار با آشکارسازهای سوسوزن مراقب باشید تا به آنها ضربه ای وارد نشود چون شکننده هستند.
- ۷) در آزمایشگاه دزیمتری و حفاظت پرتویی، رعایت اصول حفاظت پرتویی (برقراری حداقل فاصله ممکن از منبع پرتوزا، استفاده از حفاظ های پرتویی و کار در حداقل زمان ممکن با مواد پرتوزا) الزامی است.

آشنایی با آشکارسازهای سوسوزن و طیف یک ماده پرتوزا (اسپکتروسکوپی گاما)

۱-۱ هدف آزمایش

به دست آوردن طیف انرژی گسیلی یک عنصر پرتوزا و محاسبه قدرت تفکیک انرژی، شناسایی مواد پرتوزا نامعلوم، شناسایی پدیده های مختلف در اثر عبور پرتو از ماده (پدیده فوتوالکتریک، کامپتون، تولید زوج و تابش ترمزی) از بخش های مختلف طیف انرژی.

۱-۲ وسایل لازم

چشمه پرتوزا، منبع تغذیه ولتاژ بالا، آشکارساز سوسوزن، دستگاه MCA، کامپیوتر مجهز به نرم افزار Cassy Lab، کابل های رابط، حفاظ های سربی.

۱-۳ تئوری آزمایش

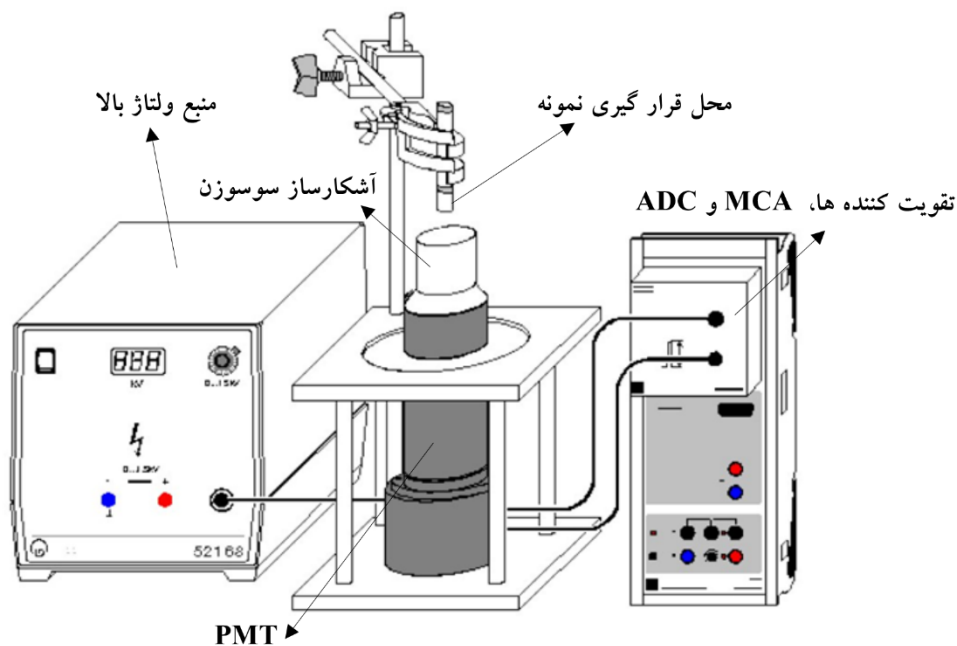
۱-۳-۱ اسپکتروسکوپی پرتوهای گاما

در آزمایشگاه های آنالیز هسته ای برای شناسایی و اندازه گیری پرتوزایی و غلظت رادیونوکلیدهای تابش کننده پرتوهای گاما در نمونه های مختلف از روش اسپکتروسکوپی پرتوهای گاما^۱ استفاده میشود. وقتی پرتوهای گامای تابشی از نمونه به وسیله ی دستگاه اسپکتروسکوپی گاما جمع آوری، شناسایی و آنالیز می شوند، طیف انرژی گاما^۲ به دست می آید. آنالیزهای کیفی و کمی جزئی تر این طیف منجر به شناسایی و اندازه گیری غلظت پرتوزایی رادیونوکلیدهای موجود در نمونه ی مورد اندازه گیری می شود. اسپکتروسکوپی پرتوهای گاما روش بسیار مهمی است زیرا بسیاری از چشمه های پرتوزا، پرتوهای گاما با انرژی و شدت های مختلف تابش می کنند. طیف انرژی پرتوهای گاما، متشکل از پیک های تیز می باشد. تعداد این پیک ها و انرژی آنها مختص هر رادیونوکلید است. این ویژگی برای تعیین رادیونوکلیدها به کار گرفته می شود که به آن آنالیز کیفی گفته می

^۱ Gamma-ray spectroscopy

^۲ Gamma energy spectrum

شود. به علاوه شدت هر پیک با پرتوایی هر رادیونوکلید متناسب است. تحت شرایط اندازه گیری معین، مقایسه ی شدت پیک ها در نمونه استاندارد و چشمه پرتوای ناشناخته، تعیین پرتوایی رادیونوکلیدهای موجود در نمونه را امکان پذیر می کند. این مرحله از اندازه گیری را آنالیز کمی می نامند. لازم است بدانیم که آنالیز کمی قویاً به آنالیز کیفی یعنی شناسایی صحیح پیک های گاما و رادیونوکلیدهای مربوطه بستگی دارد.



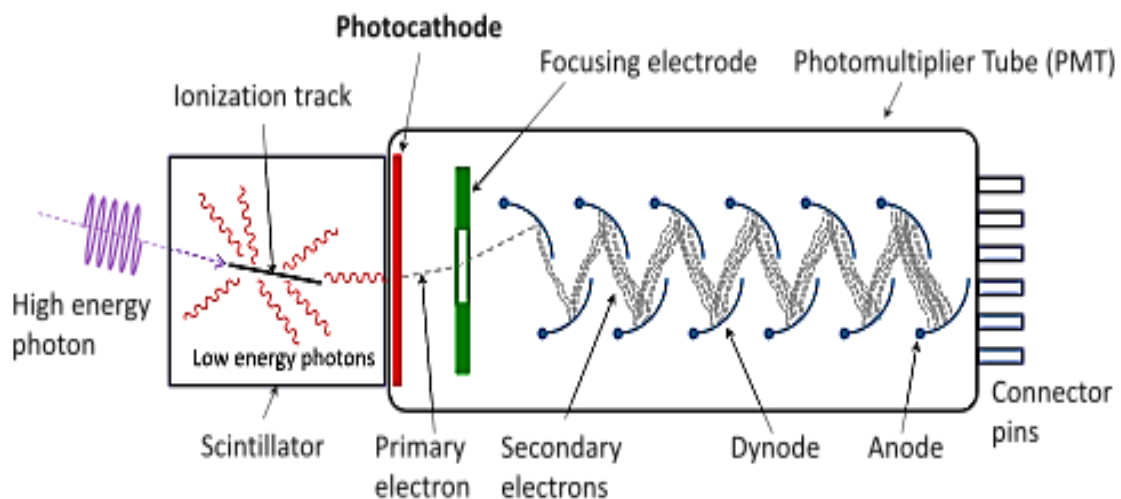
شکل ۱ اجزای طیف نگاری پرتوهای گاما

۱-۳-۲ آشکارساز سوسوزن^۳

قسمت اصلی هر دستگاه اسپکتروسکوپی گاما، آشکارساز آن است. واکنش فوتونهای گامای ورودی با آشکارساز، سیگنال های الکتریکی تولید می کند. در اکثر آزمایشگاه ها برای آشکارسازی پرتوهای گاما در نمونه های خاصی از کریستال سوسوزن یدور سدیم^۴ فعال شده با تالیوم استفاده شود که تابش گاما را به نور تبدیل می کند. مبنای اصلی آشکارسازهای سوسوزن بر اساس خواص ویژه تولید لیانی یا فلاش نور حاصل از مواد رادیو اکتیو است. فلاشهای ضعیف یا سوسوزنی، توسط تیوب تکثیرکننده نوری آشکار شده و تقویت می شوند. سوسوزنی متناسب با انرژی ذرات برخوردی است و لذا اطلاعات مربوط به انرژی ذرات به دلیل خطی بودن مشخصه، از ولتاژ خروجی تیوب تکثیر کننده نوری^۵ (PMT) بدست می آید.

^۳ Scintillation Detector
^۴ NaI (TI)
^۵ Photo Multiplier Tube

به موادی که در روش های اندازه گیری رادیو ایزوتوپی دارای خواص لیانی هستند، سوسوزن گویند. فرآیند سوسوزنی یک فرآیند پیچیده است. در ابتدا سوسوزن انرژی پرتو را که موجب تحریک یا یونش برخی اتم ها میشود، جذب میکند. سپس اتم در زمان بسیار کوتاه به حالت پایه بر میگردد و تولید نور یا فوتون میکند. هر چه انرژی جذب شده از ذرات عبوری در ماده بیشتر باشد، اتمهای سوسوزن بیشتری تحریک میشوند. انرژی انتقالی از فوتون ها به فرآیند اندرکنش بستگی دارد. پس از تولید نور، نور وارد توسط تیوب تکثیرکننده نوری میشود. تیوب تکثیرکننده نوری یکی از اساسی ترین قسمتهای یک سیستم آشکارسازی سوسوزن است. کار اصلی آن تبدیل نور سوسوزن به سیگنال الکتریکی با انجام یک تقویت خطی بزرگ می باشد. اولین و مهمترین تیوب تکثیرکننده نوری قسمت فوتوکاتد می باشد که قسمتی از انرژی فوتون تابشی را به الکترونها میدهد. تعداد الکترونها خارج شده تابع شمارش فوتونهایی است که با فوتوکاتد برخورد میکنند. الکترونها گسیل شده توسط سطح فوتوکاتد در میدان الکتریکی شتاب میگیرند و به طرف داینود رانده میشوند. داینود صفحه ای است با رویه خاص که الکترونها به آسانی از آن کنده میشوند. هر الکترونی که به داینود میرسد، بسته به انرژی که در میدان الکتریکی دریافت میکند، الکترونها را از آن جدا میکند. سپس الکترونها را که از داینود گسیل میشوند، به طرف دومین داینود شتاب میگیرند و هر یک از الکترونها چندین الکترون دیگر را از این داینود جدا میسازند و این فرآیند چندین بار تکرار میشود. آخرین داینود در ته تیوب تکثیر کننده نوری، آند نام دارد که چون تمام الکترونها در آن جمع میشوند دارای سیگنال منفی در حد نانو است. شکل سیگنال حاصل از آشکارسازی پرتوهای گاما در سوسوزن به شکل نمائی است. پس از تبدیل نور به جریان در تیوب تکثیر کننده نوری به وسیله سیستم های الکترونیکی پرتوها شمارش و پردازش می شوند. نحوه کار آشکارسازهای سوسوزن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ نحوه عملکرد آشکارساز سوسوزن و تیوب تکثیر کننده نوری

نور تولید شده به وسیله ی تیوب تکثیر کننده نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود که ارتفاع پالس آن متناسب با انرژی پرتوهای گامای ورودی است. سیگنالهای خروجی از آشکارساز به وسیله ی سیستم تحلیلیگر ارتفاع پالس^۶ ثبت شده و به صورت شمارش بر حسب انرژی پرتوهای گاما رسم میشود. بنابراین، آشکارساز حالت جامد پرتوهای گامای ورودی را مستقیماً به پالس الکتریکی تبدیل کرده و به سیستم تحلیلیگر ارتفاع پالس میفرستد. با توجه به خواص و نوع آشکارسازی، کریستال یدور سدیم نیاز به خنک شدن ندارد؛ اما اختلاف زیاد در قدرت تفکیک باعث میشود در بسیاری از موارد همچون شناسایی و اندازه گیری چشمه هایی با چندین رادیونوکلید، آشکارسازهای ژرمانیم خالص^۷ (نوع دیگری از آشکارساز های پرتو گاما می باشند) به آنها ترجیح داده شوند. چون حمل دستگاه های مجهز به این آشکارسازها به دلیل نیاز به مخزن خنک کننده حاوی نیتروژن مایع یا سیستم خنک کننده الکترو مکانیکی مشکل است، به همین دلیل تلاشهای زیادی انجام میشود تا آشکارسازهای نیمه هادی که در دمای اتاق کار میکنند، توسعه داده شوند. آشکارسازهای نیمه هادی CdZnTe یا HgI₂ از این دسته هستند. این گروه از آشکارسازها قدرت تفکیک بهتری نسبت به آشکارسازهای یدور سدیم دارند، هر چند که قدرت تفکیک آنها به حد کریستالهای ژرمانیم نمیرسد. بنابراین آشکارسازهای ژرمانیم خالص بهترین انتخاب برای آشکارسازی و شناسایی پرتوهای گامای تابشی از مواد هسته ای هستند. از این میان آشکارساز ژرمانیم با خلوص بالا با قدرت تفکیک در حدود ۲ keV برای پیک انرژی گامای ۶۶۲ keV مربوط به سزیم-۱۳۷، کاربرد بیشتری دارد. این نوع از آشکارسازها امکان تعیین دقیق تر انرژی پیک ها، جداسازی پیک های نزدیک به هم و آشکارسازی پیک های گامای ضعیف را در حضور شمارش زمینه ی زیاد فراهم می کنند.

۳-۳-۱ دستگاه طیف نگاری پرتوهای گاما با بازده زیاد

این دستگاه مجهز به آشکارساز سوسوزن یدور سدیم است که به دلیل بازده بالا برای اندازه گیری نمونه های با پرتوایی کم مانند تعیین غلظت رادیونوکلیدهای موجود در مواد غذایی به کار گرفته میشود. آشکارساز سوسوزن یدور سدیم قدرت تفکیک خوبی مانند آشکارساز ژرمانیم خالص ندارد. دستگاه طیف نگاری پرتوهای گاما با بازده بالا مجهز به آشکارساز یدور سدیم نیاز به مخزن نیتروژن مایع ندارد؛ اما پیش تقویت کننده^۸، منبع ولتاژ بالای معین برای آشکارساز^۹، تقویت کننده خطی^{۱۰}، مبدل قیاسی به عددی^{۱۱}، تحلیلیگر چندکاناله^{۱۲} و سیستم جمع آوری اطلاعات دارد. در این سیستم برای کاهش اثرات زمینه روی

^۶ Pulse Height Analyzer (PHA)

^۷ Pure Germanium Detector

^۸ Pre amplifier

^۹ High voltage power supply

^{۱۰} Linear amplifier

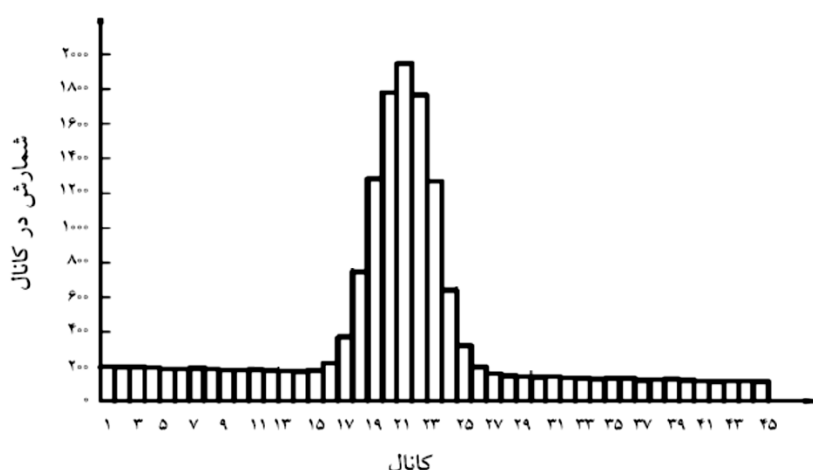
^{۱۱} Analog to digital converter (ADC)

^{۱۲} Multi-channel analyzer (MCA)

نمونه مورد شمارش باید آشکارساز داخل حفاظ مخصوص سربی قرار داده شود. در سیستمهای تجاری، اغلب پیش تقویت کننده، منبع ولتاژ و تقویت کننده اصلی به همراه فتومولتی پلایر و آشکارساز در یک مجموعه قرار داده شده و با پروب 13 به برد سیستم مبدل قیاسی به عددی و تحلیلگر چندکاناله متصل میشود.

۴-۳-۱ آنالیز طیف گامای بدست آمده

در طیف نگاری پرتوهای گاما با آشکارساز حالت جامد، فوتون های تابشی از نمونه با کریستال آشکارساز اندرکنش داده و پالس هایی متناسب با انرژی فوتون جذب شده در آشکارساز تولید می کنند. دامنه (ارتفاع) پالس تولید شده متناسب با انرژی فوتون های جذب شده در آشکارساز است. هر پالس تقویت شده پس از شکل داده شدن بر اساس ارتفاع (دامنه) پالس مرتب می شود و نمودار هیستوگرامی (شکل ۳) به صورت شمارش در واحد انرژی از فوتون های وارد شده تهیه میشود. با جمع آوری شمارش ها، پیک های گاما پدیدار میشوند. در اولین مرحله آنالیز طیفی هر انرژی گاما به رادیونوکلید پدیدآورنده آن نسبت داده می شود (این امر با فرض اینکه سیستم کالیبره انرژی شده باشد). برای آنالیز طیفی لازم است پیک های گاما شناسایی شده و سطح زیر پیک آنها محاسبه شود. به همین دلیل باید ابتدا ناحیه مورد نظر تعیین شود. این ناحیه شامل گروهی از کانالهای متوالی انتخاب شده است. پهنای این ناحیه از طریق تعداد کانال های در نظر گرفته شده تعیین می شود.



شکل ۳ هیستوگرام طیف گاما

۱-۳-۵ تحلیلگر ارتفاع پالس (PHA) یا تحلیلگر تک کانالی^{۱۴} (SCA)

تحلیلگر ارتفاع پالس یا تحلیل گر تک کانالی ابزاری الکترونیکی است که پالس هایی با ولتاژ (ارتفاع) واقع در محدوده ای از قبل تعیین شده را می پذیرد و پالس های با ولتاژ خارج از این محدوده را رد میکند. یک SCA با دو کنترل، یکی کنترل حد آستانه و دیگری کنترل پهنای پنجره شناخته میشود و توسط آنها محدوده ارتفاع پالس تعیین میشود. برای مثال اگر در پاسخ به پرتو X یا γ پالس هایی با ولتاژ متغیر از ۱ تا ۱۰ ولت بوسیله تقویت کننده خطی تولید شده باشد برای انتخاب پالس هایی با ولتاژ بین ۵ و ۶ ولت لازم است آستانه SCA در ۵ ولت و پهنای پنجره به ۱ ولت تنظیم شود. در این حالت SCA وقتی پالس خروجی دارد که پالس ورودی در این محدوده باشد. در بسیاری از دستگاهها برای کنترلهای حد آستانه و پهنای پنجره از پیک ولتاژ و درصد پهنای پنجره استفاده میشود. برای مثال اگر بخواهیم پالس هایی را انتخاب کنیم که بین ۵ و ۶ ولت قرار بگیرند، پیک ولتاژ در ۵/۵ ولت (وسط محدوده) تنظیم میشود و درصد عرض پنجره با استفاده از رابطه (۱) انتخاب میشود:

$$(۱) \quad [۱۰۰ \times (\text{پیک ولتاژ} / \text{عرض پنجره})] = \text{درصد پهنای پنجره}$$

یا درصد $۱۸ = [۱۰۰ \times (۱ \div ۵/۵V)]$ و به همین صورت عرض پنجره ۲۰ درصد برای پیک ولتاژ ۱/۴ ولت برابر خواهد بود با ۲۰ درصد $= [۱۰۰ \times (۱/۴V \div X)]$ یا $V ۰/۲۸$. در این مورد پنجره بطور متقارن در طرفین پیک ولتاژ تنظیم خواهد شد. بنابراین پالس های در محدوده $[۰/۲۸ \div ۲] - ۱/۴$ تا $[۱/۴ + (۰/۲۸ \div ۲)]$ یا $۱/۲۶$ تا $۱/۵۴$ ولت انتخاب خواهند شد. همانطور که بعداً شرح داده خواهد شد ارتفاع پالس می تواند متناسب با انرژی پرتو باشد، در نتیجه کنترل های پیک ولتاژ و درصد پنجره غالباً بطور مستقیم برحسب انرژی E و درصد ΔE مشخص میشوند. البته فرض بر این است که ضریب کالیبراسیون ولتاژ نسبت به انرژی با زمان ثابت است.

اگر مراحل را که به تولید پالس ولتاژ در یک آشکارساز جرقه زن منتهی شد، در نظر بگیریم در طی این مراحل پرتو گاما با واکنش های فوتوالکتریک، کمپتون و تولید جفت، با بلور برهمکنش میکند. در نتیجه، یک الکترون یا جفت الکترون-پوزیترون پرنرژی تولید میشود که تمام انرژی خود را در حجم کوچکی از دست می دهند. مقداری از این انرژی به نور (و در PMT به پالس الکتریکی) تبدیل شده و در تقویت کننده خطی تقویت میشود. ارتفاع (دامنه یا ولتاژ) پالس خروجی تقویت کننده طبق رابطه (۲) با چهار مؤلفه یعنی مقدار انرژی جذب شده از پرتوگاما (E_d)، ضریب تبدیل نوری بلور جرقه زن (L_{eff}) که برای هر بلور مقدار ثابتی است، بهره PMT (G_{pm}) و بهره تقویت کننده (G) تناسب مستقیم دارد:

¹⁴ Single Channel Analyzer (SCA)

$$V = .E_d . L_{eff} . G_{pm} . G K \quad (2)$$

متغیر G_{pm} تابع ولتاژ PMT است. اگر G و G_{pm} ثابت بمانند، ارتفاع پالس آشکارساز جرعه زن فقط تابع میزان انرژی جذب شده از پرتوگاما (E_d) خواهد بود. اگر E_d افزایش یابد ارتفاع پالس نیز افزایش می یابد. قابلیت اندازه گیری انرژی یک آشکارساز جرعه زن به دلیل رابطه خطی بین V و E_d است. ولی در برخورد پرتو گاما با انرژی معین با بلور، همواره مقدار انرژی (E_d) ثابتی جذب نمیشود. انرژی جذب شده (E_d) به نوع برخورد (بعنوان مثال فوتوالکتریک، کمپتون یا تولید جفت) بستگی دارد. در برخورد فوتوالکتریک تمام انرژی پرتوگاما جذب بلور میشود ($E = E_\gamma$). در کمپتون و تولید جفت، E_d همواره کمتر از E_γ است و رابطه ای بین E_γ و ارتفاع پالس وجود ندارد. بنابراین در اندازه گیری انرژی با آشکارساز جرعه زن فقط فرایندهای فوتوالکتریک انتخاب میشود. این کار توسط PHA یا SCA صورت می گیرد. در شکل ۴ طیف معمول پرتو گاما و مناطق طیفی مربوط به واکنش های کمپتون و پس پراکندگی نشان داده شده است.

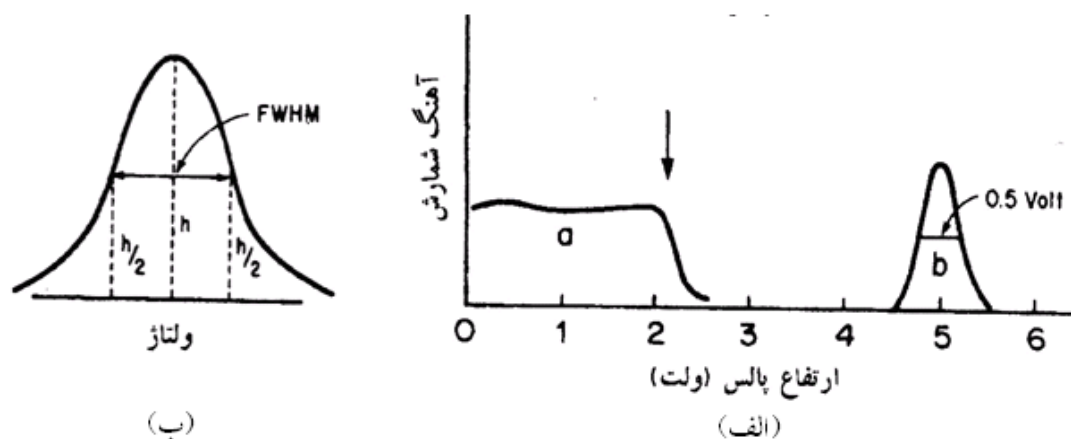


شکل ۴ طیف پرتو گاما و مناطق مختلف طیفی

در شکل ۵ توزیع ارتفاع پالس ناشی از آشکارساز $NaI (Tl)$ را برای پرتو گامای تک انرژی نشان می دهد که حاصل برهمکنش چندین هزار پرتو گاما است. در اینجا برهمکنش های فوتوالکتریک و کمپتون مهم است. این طیف به دو منطقه a و b تقسیم شده است. ناحیه a کفه کمپتون نامیده میشود. پالس های این ناحیه در نتیجه برهمکنش کمپتون ایجاد شده اند. بسته به مقدار انرژی الکترون کمپتون، پالس با دامنه های مختلفی تولید میشود. چون پرتو گاما در برخورد کمپتون همه انرژی خود را به الکترون نمی دهد و حداکثر انرژی انتقالی وقتی است که فوتون گاما کاملاً باز گردد، وقوع آن با لبه کمپتون که در شکل (۴) با فلش نشان داده شده، مطابقت دارد. منحنی زنگوله ای شکل ناحیه b ، فوتوپیک نامیده میشود. پالس های این ناحیه اساساً از طریق برهمکنش فوتوالکتریک تولید شده اند. تعداد کمی از پالس های این ناحیه ممکن است ناشی از یک یا چند برهمکنش

کمپتون پس از یک برهمکنش فوتوالکتریک باشد. بنابراین جذب انرژی گاما در بلور از طریق چند برهمکنش بیش از تک برهمکنش است و برای هر پرتوگاما احتمال وقوع چند برهمکنشی بسیار کمتر از تک برهمکنش فوتوالکتریک یا کمپتون است. فوتوپیک را پیک جذب کلی نیز می نامند. چون این دو ناحیه معمولاً با فاصله از یکدیگر جدا میشوند، منطقه فوتوالکتریک با استفاده از یک PHA می تواند براحتی انتخاب شوند. برای اینکار، حد آستانه و پنجره PHA طوری تنظیم میشود که فوتوپیک داخل آن واقع شود. مثلاً در شکل (۵) پنجره PHA بترتیب به ۴/۵ و ۵/۵ ولت تنظیم شده است. یک قاعده ساده برای انتخاب عرض پنجره پرتوگاما، انتخاب تقریباً دو برابر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز اطراف انرژی پرتوگاما است.

در هر سیستم آشکارساز (NaI (TI)، مراحل آشکارسازی پرتوگامای عبوری از همخط ساز و اندازه گیری انرژی آن طی میشوند. در دوربین های گاما (که به جای یک PMT از تعداد زیادی PMT استفاده میشود) برای تعیین انرژی پرتوگاما، باید مقدار کل نور تولیدی در بلور را اندازه گرفت. در دوربین جرعه زن، کل نور تولیدی بین همه یا تعداد زیادی PMT توزیع میشود. بنابراین برای تعیین مقدار کل نور، خروجی تمام PMT ها جمع میشود تا پالسی معادل آنچه در یک آشکارساز NaI (TI) با یک PMT تولید می گردد بدست آید. پالس مجموع، پالس Z نامیده میشود.



شکل ۵ توزیع ارتفاع پالس حاصل از آشکارساز جرعه زن (NaI(TI) در پاسخ به پرتوگامای تک انرژی. (الف) توزیع طیفی به دو ناحیه مجزای a و b تقسیم شده است. منطقه a (کفه کمپتون) اصولاً ناشی از برهمکنش کمپتون پرتو گاما در بلور NaI (TI) است. لبه کفه کمپتون (با فلش مشخص شده) نشان دهنده حداکثر انرژی انتقالی پرتو گاما به الکترون در اثر برهمکنش کمپتون است. منطقه b (فوتوپیک) در اثر برهمکنش پرتو گاما با بلور از طریق فوتوالکتریک است. اندازه باریکی عرض فوتوپیک به قدرت تفکیک انرژی بهتر آشکارساز دلالت دارد. (ب) از نظر کمی، قدرت تفکیک انرژی با FWHM اندازه گیری میشود. h بلندی پالس است.

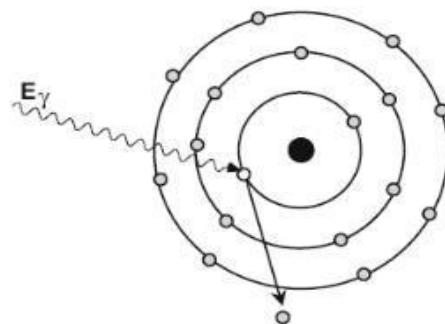
۱-۳-۶ اجزای تشکیل دهنده طیف

به طور ایده آل در طیف نگاری پرتوهای گاما هیچ شمارشی بجز شمارش کامل انرژی پیک ناشی از اثر پدیده فوتوالکتریک فوتونها با ماده آشکارساز نباید رخ دهد. البته شمارش زمینه محیطی را نیز باید به آن اضافه کرد؛ ولی در طیف گامای به دست آمده از هر چشمه گاما، بعضی رویدادها ملاحظه میشوند که فقط مربوط به واکنش گاما با آشکارساز نمی باشد. اندرکنش پرتو گاما با ماده سوسوزنی در آشکارساز به چهار صورت زیر انجام میشود:

- (۱) اثر فوتوالکتریک^{۱۵}
- (۲) پراکندگی کامپتون^{۱۶}
- (۳) تولید زوج^{۱۷}
- (۴) تابش ترمزی^{۱۸}

(۱) اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک برخورد فوتونها با الکترونها ی مقید اتم هست که فوتون همه انرژی اش را به الکترون منتقل میکند. مقداری از انرژی صرف غلبه بر انرژی بستگی الکترون میشود و انرژی باقیمانده به الکترون بصورت انرژی جنبشی منتقل میشود. در پدیده فوتوالکتریک، تمام انرژی پرتوهای گاما به الکترون منتقل میشود. بنابراین به ازای هر یک از پرتوهای گاما یک فوتوپیک در طیف ظاهر خواهد شد. البته احتمال این اندرکنش به انرژی پرتوهای گاما و عدد اتمی مواد نیز بستگی خواهد داشت.



شکل ۶ مکانیسم اثر فوتوالکتریک

^{۱۵} Photoelectric effect

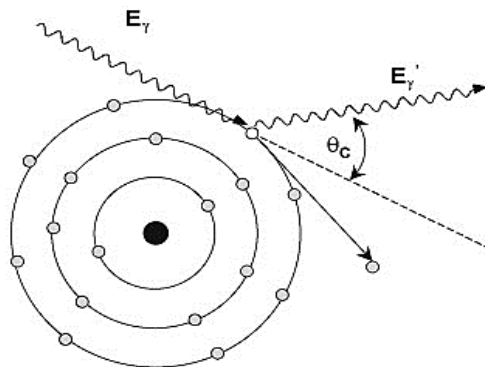
^{۱۶} Compton scattering

^{۱۷} Pair production

^{۱۸} Bremsstrahlung

۲) پراکندگی کامپتون

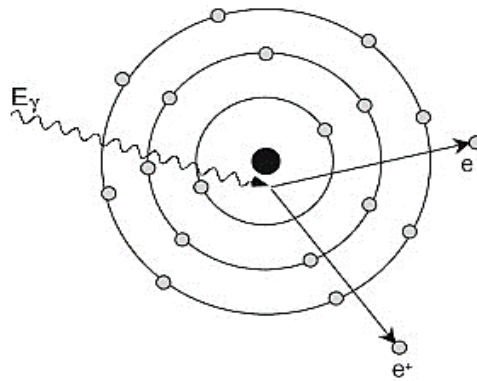
پراکندگی کامپتون در برخورد بین فوتون و الکترون مداری بیرونی (با قید کمتر) است. پس از برخورد، جهت فوتون تغییر میکند و الکترونی از اتم گسیل میشود، اتلاف انرژی فوتون بین انرژی بستگی کوچک مدار الکترون و انرژی جنبشی رسیده به الکترون پراکنده شده تقسیم میشود. بنابراین در طیف یک پیوستار مشاهده خواهد شد. اما در پیوستار کامپتون، یک لبه به نام لبه کامپتون و قللهای که به قله backscatter منسوب است، مشاهده خواهد شد.



شکل ۷ مکانیسم اثر کامپتون

۳) تولید زوج

در نتیجه برخورد فوتونهای گاما به حفاظ سیستم طیف نگاری گاما و مواد دیگر اطراف آشکارساز، زوج الکترون - پوزیترون تولید میشود. این اتفاق زمانی رخ میدهد که پرتوهای گاما تحت تاثیر میدان الکتریکی قوی نزدیک هسته مواد جاذب قرار میگیرند. هر کدام از این ذرات دارای جرمی معادل 511 keV است و در نتیجه جهت تولید زوج یون حداقل انرژی لازم 1022 keV می باشد. مازاد انرژی بصورت انرژی جنبشی زوج یون ظاهر میشود. عملاً تولید زوج e^- و e^+ در پایین تر از $1/022 \text{ MeV}$ از اهمیتی برخوردار نبوده ولی در انرژی های بالاتر از 5 MeV پدیده غالب خواهد بود. باید دقت کرد که وجود پیک گامای 511 keV همیشه به دلیل رخداد پدیده نابودی نیست. وجود فوتون 511 keV در طیف به دست آمده میتواند به این علت باشد که ممکن است رادیونوکلیدی پوزیترون هایی تابش کند که قسمتی از فرایند تجزیه آن باشند. این موضوع در صورت وجود رادیونوکلیدهایی مانند ^{65}Cu و ^{22}Na رخ میدهد. بنابراین در تفسیر مشاهده پیک 511 keV باید دقت بیشتری کرد. چون در مشاهده این پیک طیف گامای جمع آوری شده به دلیل تجزیه پوزیترون رادیونوکلید یا بروز پدیده تولید زوج در حفاظ بر اثر برخورد فوتونهای پراانرژی تولید زوج میکند. این پدیده ممکن است در پی برخورد پرتوهای کیهانی پراانرژی به حفاظ یا مواد پیرامونی نگهدارنده سیستم نیز اتفاق بیفتد.



شکل ۸ فرآیند تولید زوج

۴) تابش ترمزی

در فیزیک به یک تابش الکترومغناطیسی که از کند شدن یا تند شدن، سریع ذرات باردار حاصل می شود تابش ترمزی می گویند. تابش ترمزی، ذره باردار می تواند انرژی خود را از دست بدهد و در جریان این فرایند یک یا چند تابش پدید آید. تابش ترمزی زمانی در اسپکتروسکوپی دیده می شود که نمونه تحت اندازه گیری، حاوی رادیونوکلیدهای تابش کننده ذرات بتا باشد، در طیف گامای به دست آمده، پیوستگی برمشترانگ مشاهده خواهد شد. رادیونوکلیدهایی مانند ^{32}P و ^{90}Sr گسیل کننده ذرات بتا هستند که ممکن است در چشمه اندازه گیری شده وجود داشته باشند. عملاً این پیوستگی زمانی مشاهده و بزرگ میشود که انرژی ذرات بتا از 1 MeV بیشتر باشد در مورد ^{28}Al این انرژی برابر $8/2\text{ MeV}$ است. وجود این تابش باعث افزایش قابل ملاحظه ای در زمینه پیک های موجود در ناحیه انرژیهای کم (از حدود 500 KeV به پایین) شده و دقت اندازه گیری را کاهش میدهد. میتوان با قرار دادن مواد جاذب نزدیک به چشمه، پرتوهای ترمزی را کاهش داد؛ ولی کاملاً قابل اجتناب نیست. این فاصله باید از فاصله چشمه تا آشکارساز کمتر باشد. در این حالت مقداری از ذرات بتای ساطع شده از چشمه جذب شده و به آشکارساز نمیرسد. پس راه حل مناسب و عملی قرار دادن فاصله های موجه و قابل انجام بین چشمه و آشکارساز یا استفاده از جاذب نزدیک به چشمه و تکیه بر قانون عکس مجذوری برای کاهش شدت پرتوهای ترمزی در آشکارساز است. البته این امر باعث جذب مقداری از پرتوهای گامای کم انرژی خواهد بود؛ ولی باید توجه داشت تحت شرایط خاصی سود آن به از دست دادن مقدار کمی از شمارش های گاما میچربد.

بنابراین در طیف بدست آمده، اولین قله به فوتوپیک مشهور است و مربوط به حالتی است که فوتون تمام انرژی خود را از دست می دهد. در این صورت انرژی متناظر با این قله متناظر با انرژی فوتون خواهد بود. دومین قله بعد از فوتوپیک لبه کامپتون است که متناظر با انرژی فوتونهایی است که انرژی خود را در اثر برخورد کامپتون از دست می دهند. الکترونهاي بوجود آمده در اثر این بر

همکنش با ذرات ماده، معمولاً تمام انرژی خود را از دست میدهند و سهم شان در پاسخ آشکارساز بصورت طیف پیوسته ای است که به پیوستار کامپتون مشهور است. قله بعدی Back scattering است که در اثر پراکندگی سربه سر کامپتون با حفاظ آشکارساز بوجود می آید و در نهایت قله آخری از حفاظ سربی بوجود می آید.

۱-۳-۷ کالیبراسیون انرژی^{۱۹}

کالیبراسیون انرژی، توسط طیف چشمه های گسیلنده گاما با انرژی مشخص انجام می شود. چشمه مورد استفاده جهت کالیبراسیون انرژی باید انرژی های گامایی داشته باشد که همه ناحیه انرژی استفاده شده در طیف نگاری را بپوشاند. برای تعیین انرژی های گاما در طیف فقط کافی است چشمه شمارش شود. براساس دستورالعمل ارایه شده در استاندارد ANSI^{۲۰} N42.14، طیف گاما وقتی جمع آوری میشود که اختلاف در تعیین محل پیک کمتر از ۰,۲ کیلو الکترون ولت باشد؛ یعنی اختلاف انرژی به دست آمده با انرژی واقعی قابل انتظار از جدول انرژی برای رادیونوکلید مورد نظر بیش از ۰,۲ کیلو الکترون ولت اختلاف نداشته باشد. برای اندازه گیری انرژی، طیف سنج گاما با شمارش یک سری از چشمه های استاندارد گسیلنده گاما که پرتوهای با انرژی معین منتشر می کنند کالیبره می گردد. یک آنالیزور تک کاناله یا چند کاناله می تواند جهت پیدا کردن ارتفاع پالس بر حسب ولت که مطابق با آهنگ شمارش ماکزیمم قله فوتوالکتریک است بکار رود. منحنی انرژی گاما متناسب با ارتفاع پالس قله فوتوالکتریک خط مستقیمی خواهد بود که از مرکز عبور می کند. چنانچه کالیبراسیون خطی نباشد هر نقطه را باید با دقت بررسی نمود. اگر همه نقاط بطور صحیحی رسم شده باشند هرگونه انحنای نسبت به خط مستقیم به دلیل خطی نبودن تقویت کننده می باشد. عدم عبور خط کالیبراسیون از مرکز به علت وجود تفکیک کننده پالسهای کوچک در قسمتی از فرایند تقویت خواهد بود. جهت انجام عملی کالیبراسیون انرژی، روی نوک قله اول پوینتر را قراد داده و کلیک راست می کنیم. از پنجره ظاهر شده گزینه Energy Calibration را انتخاب می کنیم. پیک انتخاب شده مربوط به انرژی ۱۱۷۳ کیلو الکترون ولت می باشد. سیستم کانال مورد نظر پیک را برای انرژی ۱۱۷۳ کیلو الکترون ولت انتخاب می کند. سپس به صورت خودکار محور انرژی که بر اساس کانال های ۰ تا ۱۰۲۴ بود مرتب می شود.

جدول ۱ چشمه های استاندارد گاما برای طیف سنجی با قدرت تفکیک پایین

انرژی گاما (MeV)	نیمه عمر	نوکلئید
0.662	31/1 سال	¹³⁵ Cs

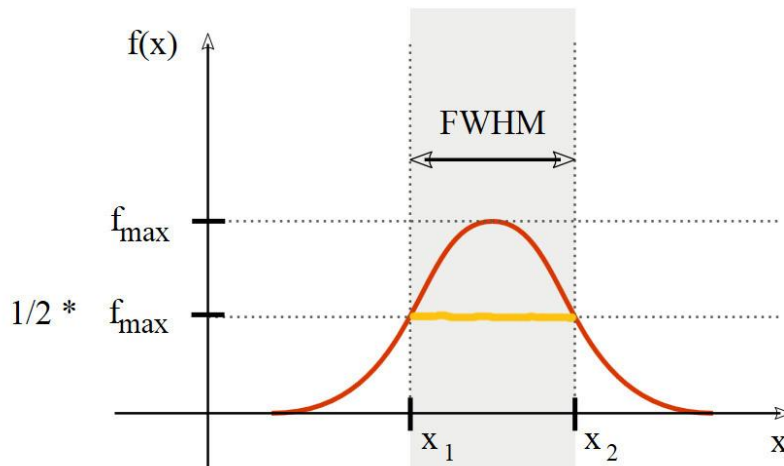
^{۱۹} Energy calibration

^{۲۰} American National Standards Institute

1/153	5/25 سال	^{60}Co
1/333		
1/135	312/5 روز	^{54}Mn
1/511		
1/255	2/61 سال	^{22}Na

۱-۳-۸ قدرت تفکیک (رزولوشن) انرژی

قدرت تفکیک یک قله فوتوالکتریک به طریقی متفاوت از آنچه که در طیف سنجی نوری معمول است، تعریف می شود. در طیف سنجی گاما تفکیک بصورت عرض قله فوتوالکتریک در نصف ارتفاع تقسیم بر موقعیت آن تعریف می شود. شکل ۹ کمیت های مورد بحث را نشان می دهد. قدرت تفکیک نسبت ساده ای است و بنابراین کمیت ها می توانند در هر واحد مناسب مثلاً MeV، keV و mm و یا بطور ساده بر حسب تعداد سطر روی کاغذ اندازه گیری شوند. در بعضی از مواقع قدرت تفکیک بصورت عرض کامل در نصف ارتفاع ماکزیمم^{۲۱} یا «FWHM» بیان گردیده و اغلب بصورت درصد ذکر می شود.



شکل ۹ نحوه به دست آوردن قدرت تفکیک انرژی (محور x نشان دهنده انرژی می باشد).

قدرت تفکیک قله فوتوالکتریک که بوسیله $\frac{\Delta E}{E}$ بیان می گردد و در آن ΔE عرض نسبی قله در نصف ارتفاع ماکزیمم است.

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (۳)$$

^{۲۱} Full width at half maximum

۴-۱ روش کار

- ۱- مازول منبع تغذیه (ولتاژ بالا) را به آرامی تا ۵۰۰ ولت زیاد می کنیم.
- ۲- نرم افزار Cassy lab را اجرا کرده و طیف پرتو زمینه را در مدت ۶۰ ثانیه اندازه گیری نمایید.
- ۳- اکنون چشمه کبالت ۶۰ یا چشمه سزیم ۱۳۷ در مقابل آشکارساز قرار داده و طیف مربوط را بدست می آوریم.
- ۴- با استفاده از چشمه مشخص استفاده شده، کالیبراسیون انرژی را انجام میدهیم.
- ۵- مقدار رزولوشن انرژی را برای پیک کبالت ۶۰ محاسبه کنید.
- ۶- یک چشمه مجهول را قرار داده و از روی طیف آن، نوع ماده پرتوزا را تشخیص دهید.
- ۷- بعد اتمام آزمایش، به آرامی (با شیب کم) ولتاژ را از ۵۰۰ به صفر رسانده و منبع تغذیه را خاموش می کنیم.

۵-۱ پرسش ها

- ۱- پیک های اضافی در روی طیف کبالت 60 مربوط به چه پدیده هایی هستند؟
- ۲- رزولوشن یک آشکارساز به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۳- آیا می توان با آشکارساز گایگر مولر طیف عناصر را به دست آورد؟
- ۴- چرا قله های دو پیک کبالت با هم برابر نیستند؟

آشنایی با نحوه انجام و خوانش دزیمترهای ترمولومینسانس

۱-۲ هدف آزمایش

معرفی روش اندازه گیری دز پرتویی با استفاده از مواد ترمولومینسانس^{۲۲} (TL)، آشنایی با دزیمترهای ترمولومینسانس^{۲۳} (TLD) با تاکید بر دزیمتری بالینی^{۲۴}، منحنی درخشندگی، آنیل کردن و نحوه آماده سازی و خوانش قرص های TLD

۲-۲ وسایل آزمایش

قرص های TLD، قرائتگر قرص های TLD، هولدر آنیل قرصهای TLD، کوره مخصوص آنیل، فانتوم معادل بافت بدن، کامپیوتر مجهز به نرم افزار TLD Reader، کابل های رابط، ظرف نگه داری و جابجایی قرص ها.

۳-۲ تئوری آزمایش

۱-۳-۲ پدیده درخشش

پدیده درخشش، فرایند تابش نور مرئی از یک ماده به دلایلی غیر از تابش حاصل از گداختگی را شرح می دهد. مواد درخشنده می توانند انرژی را جذب کنند، بخشی از آن را در خود نگه دارند و آن را به نور مرئی تبدیل و سپس ساطع نمایند. فلورسانس (تابش آنی)، فسفرسانس (تابش با تاخیر) و ترمولومینسانس (تابش به وسیله گرمادهی) شکل های خاصی از پدیده درخشش هستند.

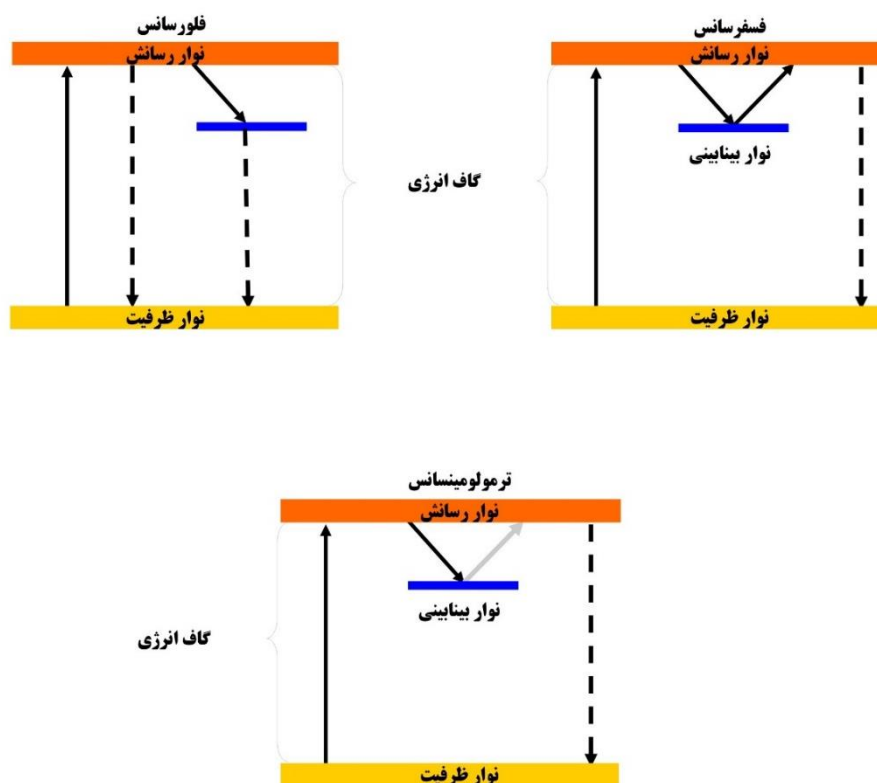
در نمای ساده‌ای از یک بلور، در هر اتم الکترونها در ترازهای انرژی مجزایی قرار دارند که آخرین تراز انرژی را تراز ظرفیت می نامند و تراز هدایت در مواد نیم هرسانا و عایق با یک محدوده ممنوعه انرژی از آن بالاتر قرار میگیرد. هنگامی که اتمها به صورت یک شبکه منظم قرار میگیرند این ترازها در یکدیگر ادغام شده و نوار یا باند انرژی را تشکیل میدهند. بنابراین به جای تراز

^{۲۲} Thermo-luminescence Material

^{۲۳} Thermo-luminescence Dosimeters

^{۲۴} Clinical Dosimetry

ظرفیت، باند ظرفیت و به جای تراز ممنوعه، باند ممنوعه و به جای تراز هدایت، باند هدایت تشکیل می گردد (شکل ۱). حضور ناخالصی ها و نواقص در شبکه سبب تشکیل سطوح انرژی در باند ممنوعه میگردد. بعضی از این سطوح به باند هدایت و بعضی به باند ظرفیت نزدیکترند. سطوح انرژی که به باند هدایت نزدیکترند احتمال بیشتری برای به دام انداختن الکترون دارند و سطوحی که به باند ظرفیت نزدیکتر هستند حفره ها را به راحتی به دام می اندازند. انرژی مورد نیاز جهت گیراندازی الکترون و حفره از طریق اشعه یونساز تأمین میشود. بنابراین عبارت ترمولومینسانس است از آزاد شدن الکترونها از مراکز گیراندازی خود و بازترکیب آنها با حفره ها در مراکز گیراندازی حفره در اثر حرارت که در این فرآیند نور تولید میگردد. هر چقدر تابش یونساز بیشتری به بلور انتقال یابد در پی آن نور بیشتری تولید میگردد که از طریق ارتباط نور حاصل شده با دز، میتوان دز جمع آوری شده را بدست آورد.



شکل ۱ چند نمونه از مراحل انواع درخشش. فلورسانس: بازگشت فوری الکترون از وضعیت برانگیختگی به وضعیت پایدار یا از طریق مستقیم یا با استفاده از نوار انرژی بینابینی که به دلیل نقص یا وجود ناخالصی در بلور ایجاد می شود. فسفرسانس: بازگشت الکترون از وضعیت برانگیختگی به حالت پایدار با تاخیر و از طریق نوار های انرژی نیمه پایدار صورت میپذیرد. در این حالت انتقال مستقیم از وضعیت نیمه پایدار به وضعیت پایدار مجاز نیست. در این دو حالت هیچ انرژی جهت انتقال الکترون به حالت پایدار صرف نمیشود. ترمولومینسانس: در این حالت الکترون های برانگیخته شده در وضعیت نیمه پایدار به دام می افتند و توسط گرمادهی انتقال الکترون ها صورت می پذیرد.

سطوح نیمه پایدار در واقع دام الکترونی کم عمق یا سطحی هستند از این رو الکترون ها برای بازگشت از این سطح به سطح برانگیختگی یا نوار رسانش به انرژی نیاز دارند. این انرژی می تواند به شکل پرتوهای نور مرئی (تحریک نوری) و یا گرما (تحریک گرمایی) تامین شود. احتمال فرار یک الکترون از سطح نیمه پایدار به سطح برانگیختگی را نشان می دهد که از رابطه بولتزمن بدست آمده است:

$$P(T) = Se^{-\frac{\Delta E}{KT}} \quad (1)$$

که در آن S ضریبی ثابت که وابسته است به میزان فراوانی نقص در شبکه بلور، ΔE اختلاف انرژی بین وضعیت نوار رسانش و نوار بینابینی (معمولاً با نام "عمق دام" خوانده می شود)، K ثابت بولتزمن و T دما بر حسب کلوین می باشد. مشاهده میشود که با افزایش دما، احتمال فرار الکترون از دام زیاد می شود و در واقع سطوح نیمه پایدار عمیق تر نیز با افزایش دما تخلیه می شوند. به این فرایند اصطلاحاً ترمولومینسانس گویند. در دهه های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ درک روشن و مدلی از فرایند کلی ترمولومینسانس بوجود آمد. مشخص شد درخشش نور در بلور هایی که تحت عملیات حرارتی که باعث ایجاد بی نظمی و تنش در بلور می شود، بسیار مشهود تر است. همچنین این خواص وقتی اتم های خارجی در شبکه بلوری وجود داشتند بیشتر دیده شد. این موارد در توسعه مواد ترمولومینسانس به عنوان دزیمترهای ترمولومینسانس در دهه های بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳-۲ دزیمتر های ترمولومینسانس (TLD)

پدیده ترمولومینسانس دارای کاربردهای متنوعی است که از مهمترین آنها میتوان دزیمتری را ذکر کرد. کاربرد عملی ترمولومینسانس برای دزیمتری در سال ۱۹۵۱ گزارش شده است. هنگامی که مواد ترمولومینسانس پرتو دهی می شوند، انرژی پرتو در اثر فرآیندهای فیزیکی در ماده جذب می شود و باعث برانگیختگی الکترونها می گردد. الکترون- های برانگیخته شده به ترازهای انرژی بالاتر منتقل می شوند و به دلیل ناپایداری در زمان کوتاهی به حالت پایه قبلی بر میگردند که در مسیر بازگشت در دام های الکترونی که به واسطه ناخالصی و نقایص ذاتی در ماده ایجاد شده به دام میافتند و تا زمانی که مجدد انرژی دریافت نکنند در دام باقی میمانند. بدین ترتیب می توان گفت پرتوی برخوردی به ماده در آن ذخیره شده است. در صورتی که به وسیله گرما دوباره به ماده انرژی داده شود الکترون ها از دام آزاد شده و انرژی اضافی خود را با انتشار فوتون ترمولومینسانس انتشار می دهند. معمولاً گرمادهی به صورت خطی و تا دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد صورت می گیرد و دامهای الکترونی در دامهای مختلف تخلیه می شوند. در صورتی که شدت فوتونهای انتشار یافته بر حسب دما رسم شود منحنی بدست آمده را منحنی درخشندگی ماده ترمولومینسانس می نامند. سطح زیر منحنی درخشندگی متناسب با مقدار دز پرتوهای است

که به ماده برخورد نموده است. این پدیده جالب باعث شده تا موادی که این رفتار را از خود نشان می دهند به عنوان آشکارساز و یا دزیومتر پرتوهای یونساز مانند ایکس، گاما، بتا و نوترون مورد استفاده قرار گیرند و آنها را دزیومتر ترمولومینسانس با علامت اختصاری (TLD) می نامند. دزیومتر ترمولومینسانس دارای انواع مختلف با ترکیب شیمیایی و نام تجاری متفاوت می باشد. برخی از دزیومترها عدد اتمی آنها معادل به بافت بدن انسان است و این ویژگی منحصر به فرد باعث میشود تا پاسخ دزیومتر نسبت به پرتوهای فوتونی (ایکس و گاما) به انرژی پرتو بستگی نداشته باشد. لذا، هنگام دزیومتري با این نوع دزیومترها نیاز به تصحیح پاسخ دزیومتر نسبت به انرژی پرتو مورد اندازه گیری نیست و نتایج دزیومتري از دقت بالایی برخوردار است. بنابراین، این دزیومترها برای اندازه گیری پرتوگیری پرتوکاران و یا بیماران در فرآیندهای پرتو تشخیصی و پرتو درمانی کاربرد دارند. دزیومترهای TLD پس از هر بار قرائت اطلاعات ذخیره شده در آنها تخلیه شده و در نتیجه مجدداً برای انجام دزیومتري قابل استفاده می باشند.

دزیومتري فردی بر اساس استانداردهای بین المللی، سه کمیت مختلف شامل دز موثر (دز در عمق ۱۰ میلیمتری بافت بدن)، دز پوست و دز عدسی چشم (دز در عمق ۳ میلیمتری عدسی چشم) در پرتوگیری شغلی یا دزیومتري فردی پرتوکاران در فعالیت های مختلف پرتوی باید اندازه گیری شود. توسط قرص های TLD معادل بافت با اندازه های $1/3 \times 1/3$ میلیمتر به ضخامت ۰/۵ میلیمتر میتوان کمیت های فوق را اندازه گیری کرد. ویژگی های منحصر به فرد دزیومترهای TLD باعث شده تا طراحی دزیومتري فردی با استفاده از آنها به شکل دلخواه صورت پذیرد و کمیت های دزیومتري با دقت بالا اندازه گیری شوند. در فعالیت های رادیولوژی مداخله ای و آنژیوگرافی برای دزیومتري فردی حداقل ۳ کریستال TLD مورد استفاده قرار می گیرد و هر سه کمیت دزیومتر فردی یعنی: دز موثر، دز پوست و دز عدسی چشم اندازه گیری و یا حدود استاندارد پرتوگیری مقایسه می شوند.

در فعالیت های که پرتوکار با میدان های آمیخته نوترون-گاما مواجه می شود (مانند: نیروگاه -های هسته- ای، چاه پیمایی، رطوبت سنجی و کارهای پژوهشی) بر اساس استانداردهای بین المللی و ضوابط واحد قانونی ایران باید دزیومتر فردی نوترون-گاما استفاده شود و سهم دز نوترون و گاما به صورت جداگانه گزارش و ثبت شود. دزیومتري نوترون-گاما TLD، حاوی چهار کریستال TLD-600 و TLD-700 با آرایش ۶۷۷۶ میباشد و با توجه به اینکه TLD-600 نسبت به پرتوهای گاما و نوترون حساسیت داشته و TLD-700 فقط دز گاما را اندازه-گیری می نماید. در جدول شماره ۱ با مشخصات انواع مختلفی از دزیومترها آشنا میشوید.

جدول شماره ۱ مشخصات و ویژگی های مهم دزیمترهای ترمولومینسانس معروف

Dosimeter	Peak Temp (°C)	Sensitivity	Z _{eff}	Dosimetry Application
LiF: Mg, Ti (TLD-100)	۲۰۰	۱	۸/۳	X, beta & γ
⁶ LiF: Mg, Ti (TLD-600)	۲۰۰	۱	۸/۳	X, beta, n & γ
⁷ LiF: Mg, Ti (TLD-700)	۲۰۰	۱	۸/۳	X, beta & γ
LiF: Mg, Cu, P (TLD- GR200)	۲۲۰	۲۵	۸/۳	X, beta & γ
CaF ₂ :Dy (TLD- 200)	۱۸۰	۳۰	۱۶/۳	X, beta & γ
CaF ₂ : Mn (TLD-400)	۳۰۰	۱۰	۱۶/۳	X, beta & γ
CaSO ₄ : Dy (TLD-900)	۲۲۰	۲۰	۱۵/۳	X, beta & γ
Li ₂ B ₄ O ₇ : Mn (TLD-800)	۲۰۰	۰/۱۵	۷/۴	X, beta, n & γ

سهم دزهای نوترون و گاما قابل تفکیک است. این دزیمتر، یکی از گزینه های مناسب برای دزیمتری فردی در میدان های آمیخته نوترون-گاما است. ابعاد کوچک دزیمترهای TLD و معادل بافت بودن عدد اتمی موثر آنها این امکان را می دهد تا بتوان از آنها در دزیمتری بیماران بدون اینکه در کیفیت تصویر برداری پزشکی خللی ایجاد کند استفاده نمود. با توجه به اینکه دزیمترها معادل بافت بدن می باشند در هر نقطه ای که داخل بافت قرار گیرند دز مربوط به همان بافت را در پرتوگیری بیماران اندازه گیری می نمایند. کریستال ها را روی بدن بیمار نصب می نمایند و یا آنها را در حفره های داخل فانتوم مدل انسان (فانتوم راندو) قرار می دهند و در فرایندهای پرتو تشخیصی و پرتو درمانی پرتوگیری بیمار و اندام های داخل بدن را اندازه گیری می نمایند. دزیمتر TLD و فانتوم راندو دو ابزار ویژه ای هستند که در پژوهش های پرتو درمانی و پرتو تشخیصی در مراکز پزشکی استفاده می شوند.

۲-۳-۳ منحنی درخشندگی^{۲۵}

ماده ای با نقص هابب فرض می کنیم که یک دام الکترونی منفرد را ایجاد می کند. عمق انرژی حالت پایه در این دام برای مثال، E پایین تر از نوار رسانش است. در یک زمان t ، دمای ماده T (بر حسب کلوین) و دام های منفرد الکترون شامل n الکترون می باشند. توزیع انرژی الکترونها درون دام براساس توزیع بولتزمن بیان می شود. بنابراین P احتمال فرار یا رهایی یک تک الکترون از دام منفرد برابر است با:

$$P(T) = Se^{-\frac{E}{kT}} \quad (۲)$$

نرخ رهایی الکترون از دام برابر است با:

$$-\frac{dn}{dt} = nSe^{-\frac{E}{kT}} \quad (۳)$$

با فرض اینکه هیچ کدام از الکترونها رها شده مجدداً دام اندازی نمی شوند و همه آنها گذار ترمولومینسانس انجام می دهند، شدت درخشندگی ترمولومینسانس، به نرخ فوتونی تابشی و به تبع آن نرخ رهایی الکترون ها از دام ها بستگی دارد:

$$I = -C \frac{dn}{dt} = CnSe^{-\frac{E}{kT}} \quad (۴)$$

C ثابت مربوط به راندمان درخشش می باشد. اگر ماده به طور یکنواخت حرارت داده شود:

$$R = \frac{dT}{dt} \quad (۵)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = R \cdot \frac{dn}{dT} \quad (۶)$$

پس از جای گذاری در رابطه (۳) داریم:

$$\frac{1}{n} dn = -\frac{S}{R} e^{-\frac{E}{kT}} dt \quad (۷)$$

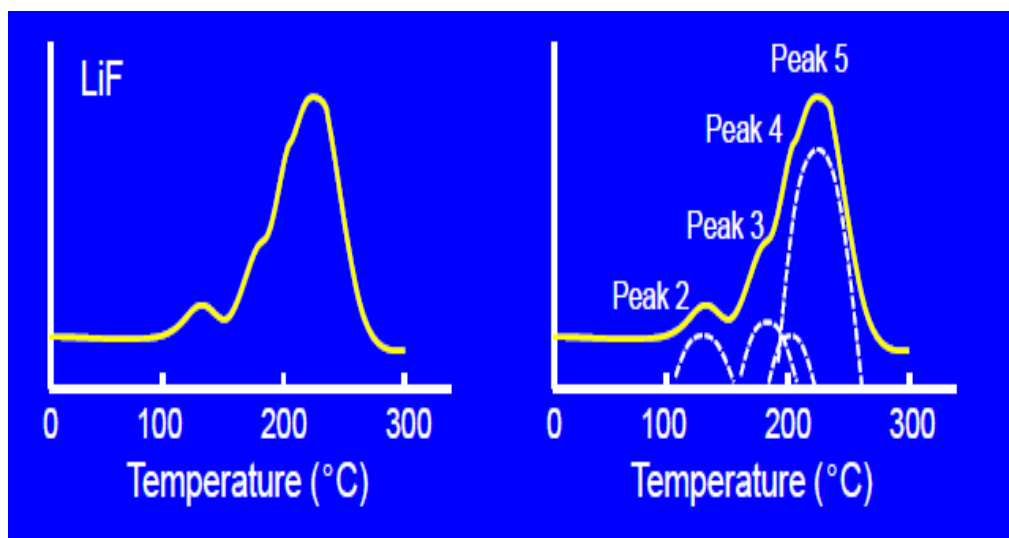
پس از انتگرال گیری داریم:

$$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -\int_{T_0}^T \frac{1}{R} S e^{-\frac{E}{kT}} dt \quad (۸)$$

که n تعداد الکترونهاى موجود در دام در زمان n_0 و دماى T_0 است. در انتها با جاىگذارى در رابطه (۴) خواهيم داشت:

$$I = n_0 C \exp - \left[\int_{T_0}^T \frac{1}{R} S e^{-\frac{E}{kT}} dt \right] S e^{-\frac{E}{kT}} \quad (9)$$

از اين رابطه شدت درخشندگى حاصل از الکترونهاى به دام افتاده در يك نوع دام منفرد با انرژى E محاسبه مى شود. نمودار I بر حسب T را منحنى درخشندگى گویند و در يك حالت ايده آل با وجود تنها يك سطح دام اندازى، ممکن است يکى از منحنى هاى نشان داد.



شکل ۲ منحنى هاى درخشندگى براى فسفر با يك سطح دام اندازى منفرد (با تشكر از كتاب گارليک^{۲۶})

همانطور كه از شكل ۲ مشاهده مى شود، در ابتدا براى دماهاى پايين، منحنى ها به صورت نمايى افزايش مى يابند و پس از رسيدن پيك درخشندگى به ميزان حداكثر، به صفر تنزل مى كنند. هر چه مقدار سطح دام اندازى E بزرگتر و S كوچكتر باشند، دماى پيك درخشندگى به بيشتريين مقدار خود مى رسد و بنابر اين پايدارى حرارتى دامهاى الکترونى بيشتري مى شوند. همچنين ارتفاع پيك يا سطح كل زير منحنى درخشندگى به عنوان روشى براى اندازه گيرى ميزان تابش پرتو يونيزان اوليه بكار ميرود. با افزايش R ، پيك درخشندگى به دماهاى پايين تر تغير مكان ميدهد.

۴-۳-۲ دزیمترهای لیتیوم فلوراید (LiF)

از جمله مهمترین و معروف ترین مواد ترمولومینسانس می توان به فلوراید لیتیوم (LiF)، بورات لیتیوم ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)، سولفات کلسیم (CaSO_4) و فلوراید کلسیم (CaF_2) اشاره کرد. که در این بین بیشترین و گسترده ترین تحقیقات بر روی لیتیوم فلوراید با توجه به ویژگی ها و کاربردهای ویژه آن انجام شده است.

فلوراید لیتیوم^{۲۷} (LiF)، یک هالید قلیایی با دانسیته ۲/۶۴ گرم بر سانتی متر مکعب و عدد اتمی موثر ۸/۳ است. دارای عدد اتمی نزدیک بافت بدن (۷/۴) بوده، مقاوم به ضربه شیمیایی است و به آرامی در آب حل می شود. پیچیدگی های زیادی در درک تئوری نتایج آزمایش بر روی این مواد وجود دارد و مهمترین دلیل آن عدم قطعیت زیادی است که در استاندارد سازی مواد ترمولومینسانس وجود دارد. به هر حال فرایند ترمولومینسانس در LiF:Mg:Ti پیچیده است و به شدت به چندین عامل بستگی دارد این عوامل عبارتند از: مقدار و نوع ناخالصی موجود در ماده، روش و شکل شیمیایی وارد کردن ناخالصی ها به درون شبکه در حین تولید. لیتیوم فلوراید با ناخالصی منیزیم و تیتانیوم (LiF:Mg:Ti) اولین بار توسط دانیلز در سال ۱۹۵۳ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. شرکت آمریکایی هارشا^{۲۸} فسفر LiF تجاری را با عنوان TLD-100، تهیه و تولید کرد همچنین ایزوتوپهای متغیر آن را تحت عناوین TLD-600 و TLD-700 تولید نمود. تفاوت این دزیمترها در مقدار ایزوتوپهای لیتیوم ۶ و لیتیوم ۷ است.

۵-۳-۲ قرائتگر قرص های ترمولومینسانس^{۲۹}

قرائتگر TLD را بر حسب نوع روش گرمادهی و کاربرد در دسته های مختلفی تقسیم بندی می کنند. این دستگاه ها می توانند به صورت دستی، نیمه یا تمام اتوماتیک کار کنند. دستگاه قرائتگر TLD موجود در آزمایشگاه دزیمتری گروه فیزیک

Lithium Fluoride^{۲۷}

Harshaw Chemicals^{۲۸}

TLD reader^{۲۹}

پزشکی، از نوع سیستم گرمادهی اهمی مدل ۷۱۱۳ ساخت شرکت ایمن گستر رامان کیش می باشد. در شکل زیر نمایی از قرائت گر موجود در آزمایشگاه را ملاحظا می فرمایید.



شکل ۳ دستگاه قرائت گر قرص های ترمولومینسانس مدل ۷۱۱۳

مشخصات عمومی برای هر قرائت گر TLD عبارت است از :

- ۱) سیستم گرمادهی
- ۲) سیستم نوری و آشکار سازی
- ۳) سیستم اندازه گیری جریان
- ۴) سیستم نمایشگر و ثبت کننده

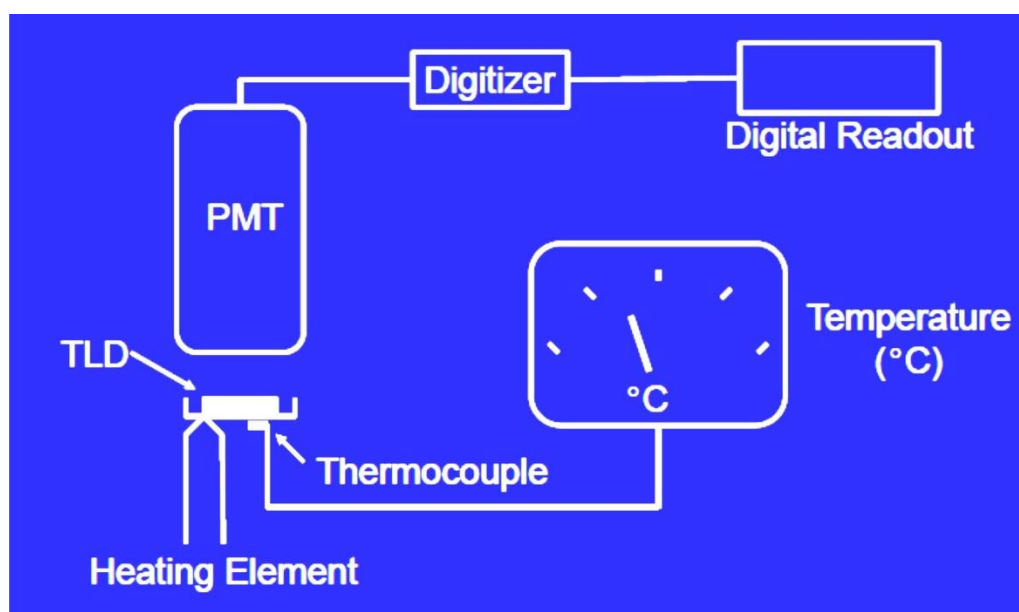
۲-۳-۵-۱ سیستم گرمادهی در قرائت گرها

تاکنون انواع مختلفی از مواد ترمولومینسانس در ساخت دزیمترها در شکل ها، سایزها و ترکیبات مختلف استفاده شده است. این تفاوت ها در خواص گرمایی، مهم و قابل توجه است. یک دز سنج ایده آل باید مسطح و تخت باشد. هدف اصلی چرخه گرمادهی، گرما دادن ماده ترمولومینسانس تا جایی است که الکترون ها از دامها آزاد شوند. با وجود این به منظور آزاد کردن الکترون ها از تمام دامها لازم است قبل از پرتودهی و انجام آزمایش با TLD ها آنها را آنیل (باز پخت) کرد. اصولا سیستم

گرمایش باید سریع و بی نیاز به خطی بودن باشد بعد از انجام آنیل توسط کوره نیز باید قرص ها سریعا سرد گردند. از انواع روش های گرمادهی می توان به روش های زیر اشاره کرد که در دستگاه های قرائت گر استفاده می شوند.

- (۱) گرمادهی اهمی تماسی
- (۲) گرمادهی از طریق گاز نیتروژن داغ
- (۳) گرمادهی از طریق امواج رادیویی
- (۴) گرمادهی به روش تابش مادون قرمز

در شکل زیر نمایی از مکانیزم عملکرد یک سیستم گرمادهی اهمی را برای قرائتگر TLD مشاهده می کنید.



شکل ۴ قرائت گر قرص های ترمولومینسانس با استفاده از سیستم گرمادهی اهمی تماسی

۲-۳-۵-۲ سیستم نوری و آشکار سازی

هدف از مجموعه نور و سیستم آشکار سازی، جمع آوری نور منتشر شده توسط ماده ترمولومینسانس، همه تابش های اپتیکی مثل تابش گرمایی مادون قرمز از المنت گرمادهی و تبدیل آنها به جریان (بار الکتریکی بر حسب کولن) برای نمایش و ثبت می باشد. شدت پیک نور تشعشعی در طول موج های مرئی تابش ترمولومینسانس برای دز جذبی در حدود چند میلی گری برابر، 10^{-10} تا 10^{-12} لومینسانس می باشد. تنها آشکار ساز نوری مناسبی که می تواند این مقدار ناچیز را آشکار سازی و تبدیل نماید، تیوب

تکثیر کننده فوتونی^{۲۰} (PMT) می باشد. طیفی تابشی تمام مواد ترمولومینسانس بین ۲۷۰ - ۷۰۰ نانومتر قرار دارند. پاسخ طیفی PMT وابسته به ترکیب فوتوکاتد و تابش طیف پنجره تیوب دارد. اوج حساسیت تمام تیوب ها حول ۴۰۰ nm بسته به تابش آبی LiF می باشد. اما در کنار تابش حاصل از قرص ها، تابش های گرمایی مزاحمی نیز توسط المنت یا سینی گرمادهی تولید می شود که سیستم تبعیض گر طیفی (یک فیلتر نوری است) تابش گرمایی ناخواسته را حذف میکند. اگر PMT به طور متوالی و طولانی در معرض پرتو دهی چشمه نوری باشد ممکن است فرسوده شود.

۲-۳-۵ سیستم اندازه گیری جریان

پس از تبدیل ترمولومینسانس به جریان الکترونی، به چندین روش امکان جمع آوری این جریان وجود دارد. بار های ایجاد شده از مرحله PMT به وسیله آمپلی فایر تقویت می شوند سپس توسط ولت متر تمام بار الکتریکی ثبت می شود. پس فراموش نکنیم که دستگاه قرائت گر تنها مقدار بار موجود روی قرص های TLD را گزارش میکند. در ادامه باید این اعداد بدست آمده توسط محقق به واحد های مربوط به دز پرتویی مانند mSv تبدیل شود.

۲-۳-۶ مراحل تجربی استفاده از TLD

یک چرخه کامل استفاده از دزیمترهای TL شامل مراحل زیر می شود:

- (۱) انبار و نگه داری
- (۲) انیل^{۳۱} یا باز پخت
- (۳) پرتو دهی
- (۴) قرائت

علازمه مزایایی چون کوچکی، حساسیت بالا، امکان استفاده چند باره از دزیمترهای ترمولومینسانس، در کار تجربی با TLD مشکلات و خطاهای قابل کنترلی وجود دارند ولی فرصت هایی نیز برای اصلاح اشتباهات در تمام این مراحل داریم. با شناخت این مراحل سعی خواهیم کرد اشتباهات و خطاهای موجود را کاهش دهیم تا دزیمتری مطمئن و قابل تکراری انجام دهیم.

^{۲۰} Photo Multiplier Tube
^{۳۱} Anniling

۲-۳-۶-۱ انبار و نگه داری

بعد از اتمام آزمایش قرص های TLD باید به شکل صحیح تا آزمایش بعدی انبار و نگه داری شوند. چرا که جنبه های زیادی از انبارداری دزیمترها می تواند به حساسیت، مقاومت، دقت و حداقل دز جذبی قابل آشکارسازی اثر کنند. اثرات عمده تولید شده به وسیله انبار داری و نگه داری دزیمترها می توانند در دو دسته تقسیم شوند:

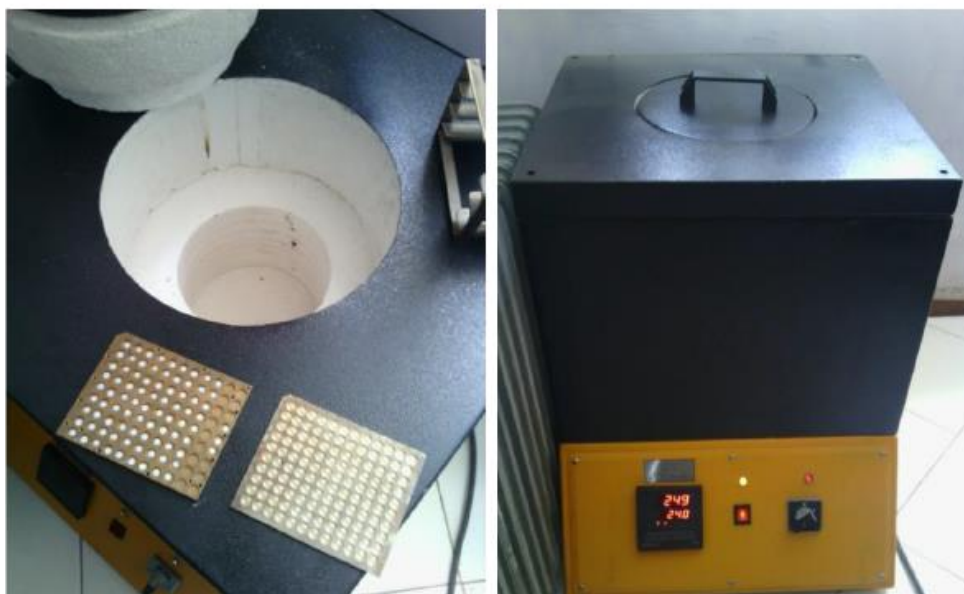
۱. عوامل محیطی مثل دما، رطوبت، اشعه فرابنفش و نور مرئی

۲. عوامل نگه داری فیزیکی مانند ضربه خوردن در حین توزیع و جمع آوری، تمیز کردن و ...

بنابراین قرص ها نباید در دما و رطوبت بالا، در معرض نور طبیعی خورشید یا مصنوعی قرار گیرند. همچنین ضربه خوردن یا افتاد قرص ها روی زمین بسیار آسیب میزند. به طور تجربی، مطالعه تعدادی از قرص ها موجود در آزمایشگاه دزیمتری که در حین آزمایش روی زمین افتاده بودند نشان داد که عملاً کارایی خود را از دست داده اند.

۲-۳-۶-۲ انیل یا باز پخت

هنگام شروع کار های عملی پایاننامه یا طرح تحقیقاتی، قرص های انبار شده باید قبل از انجام آزمایش عملی انیل گردند. اگرچه دزیمترهای منحصر به فردی ممکن است توسط سیستم گرمادهی قرائت گر انیل شوند ولی عمدتاً انیل کردن قرص های TLD توسط کوره های حرارتی مجزا انجام میشود که انواع مختلف قرص های TLD، شرایط انیل مختلفی دارند و در صورت رعایت نکردن صحیح پروفایل انیل باعث آسیب به TLD ها و گیر اندازهی مجدد الکترون ها در دام ها می شود. به عنوان مثال ثابت شده است که بهترین شرایط انیل قرص های TLD-100 در زمان ۱ ساعت و دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. قرص های موجود در آزمایشگاه از نوع قرصهای (LiF: Mg, Cu, P (TLD- GR200 می باشند. دارای عدد اتمی موثر ۸/۳ و حساسیتی حدود ۲۵ مرتبه بیشتر از (LiF: Mg, Ti (TLD-100 به پرتو ایکس و گاما دارند. قبل از هر بار استفاده این قرصها به منظور حذف تشعشعهای احتمالی باقی مانده و نامطلوب و جلوگیری از ایجاد خطا در دزیمتری توسط هولدر فلزی در کوره حرارتی با شرایط دمای ۲۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار می گرفتند. دقت شود که بعد از ده دقیقه حضور قرصها در دمای مورد نظر باید در همان دما از کوره خارج شوند و سریعاً سرد گردند.



شکل ۵ قرار گیری قرص های ترمولومینسانس در داخل هولدر فلزی جهت انجام انیل با استفاده از کوره

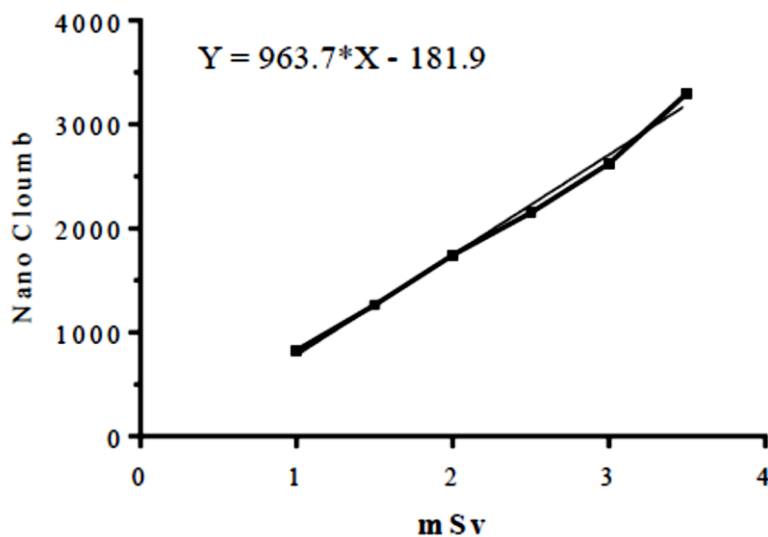
۳-۶-۳-۲ پرتودهی

کلید دزیمتری های TLD برای اندازه گیری پرتوهای ایکس، گاما، و بتا قابل استفاده است. برخی از آنها مانند TLD-600 و TLD-100 نسبت به پرتوهای نوترون نیز حساس هستند. در صورتی که TLD-700 نسبت به پرتو نوترون حساس نیست. این خاصیت باعث می شود تا بتوان با استفاده از دو عدد دزیمتر TLD-600 و TLD-700 در کنار هم در میدان های مخلوط نوترون و گاما دزیمتری نمود. لذا، از این طریق می توان سهم پرتوهای گاما و نوترون را از هم تفکیک کرد. بعد از انجام هر نوع پرتودهی، قرص ها توسط قرائت گر خوانش می شوند و مقدار بار موجود روی هر قرص بر حسب کولن بدست می آید. سپس باید ضرایب تصحیح^{۳۲} هر قرص را به آن اعمال کرد. قرص هایی که ضریب تصحیح آنها خارج از $۰/۹۲ - ۱/۰۸$ هستند باید دقت زیادی شود چرا که خطای بالایی احتمالاً خواهند داشت. بعد از اعمال ضرایب تصحیح با استفاده از منحنی کالیبراسیون، مقادیل بار بر حسب کولن رابه میلی سیورت تبدیل می کنیم.

قرصهای TLD موجود در آزمایشگاه بعد از خریداری شده جهت آماده سازی برای دزیمتری در آزمایشگاه شرکت پارس ایزوتوپ در کرج به ۵ گروه ۱۷ تایی تقسیم شدند. پس به هرکدام از گروهها، انرژیهای ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی سیورت داده شد. سپس

^{۳۲} Element Correction Coefficient

قرصها قرائت شده و ضرایب تصحیح بدست آمد سپس در ادامه به منظور رسم منحنی کالیبراسیون، نمودار کالیبراسیون قرصها بدست آمد.



شکل ۶ منحنی کالیبراسیون قرص های ترمولومینسانس (پایاننامه رضا ملک زاده^{۳۳})

با داشتن رابطه کالیبراسیون اکنون میتوان مقدار بار موجود روی هر قرص را به دوز دریافتی تبدیل کرد.

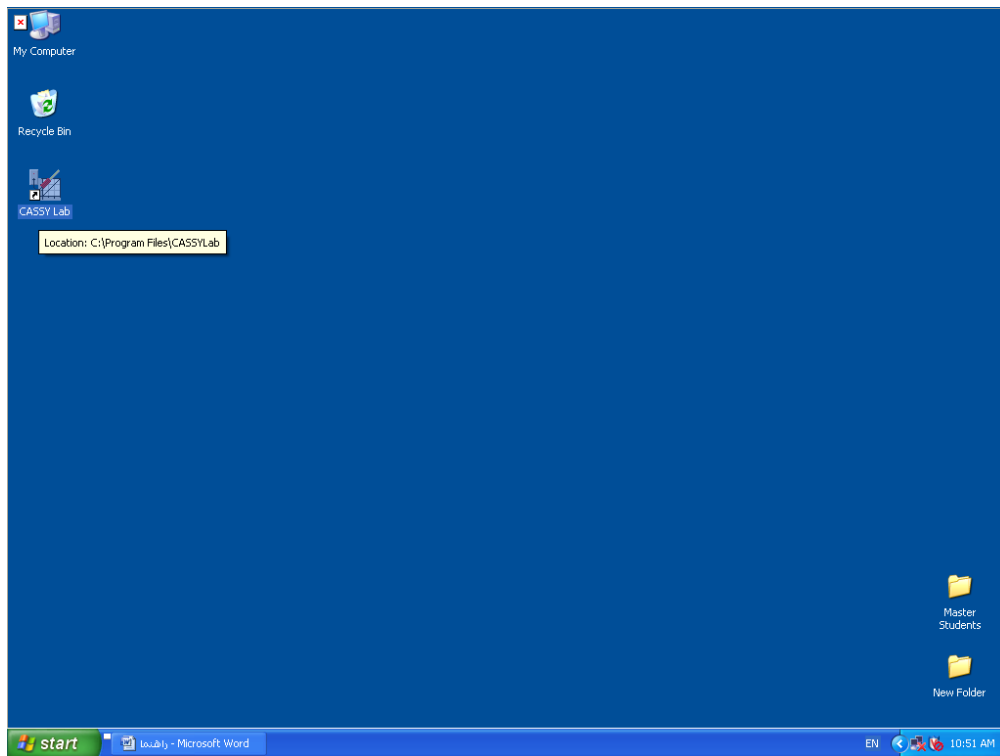
توجه: این آزمایش صرفاً برای اهداف تحقیقاتی دانشجویان تحصیلات تکمیلی گروه فیزیک پزشکی مورد استفاده قرار میگیرد.

^{۳۳} جهت مطالعه بیشتر می توانید به پایاننامه کارشناسی ارشد فیزیک پزشکی، آقای رضا ملک زاده موجود در گروه فیزیک پزشکی مراجعه کنید.

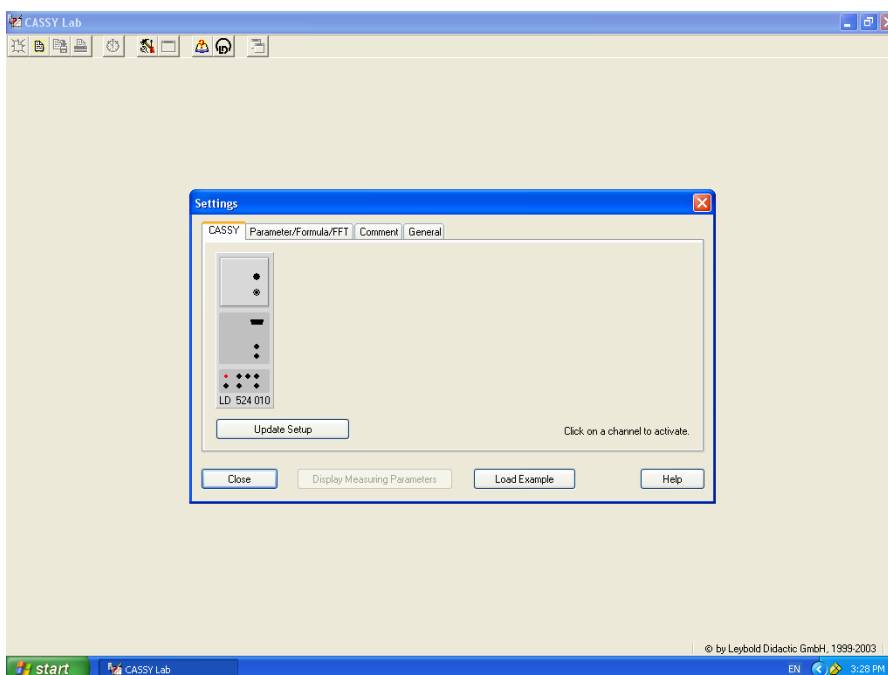
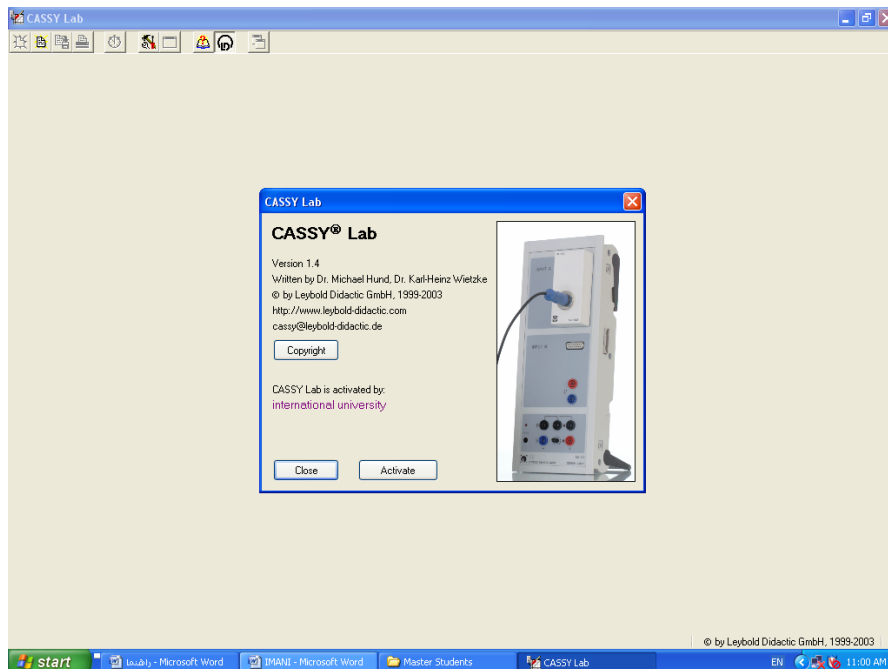
ضمائم

(۱) راهنمای تصویری نحوه کار عملی آزمایش گاما اسپکتروسکوپی

۱. اولین کار روشن کردن نرم افزار Cassy lab از روی دسکتاپ کامپیوتر می باشد. با دوبار کلیک روی آیکون، نرم افزار اجرا می شود.

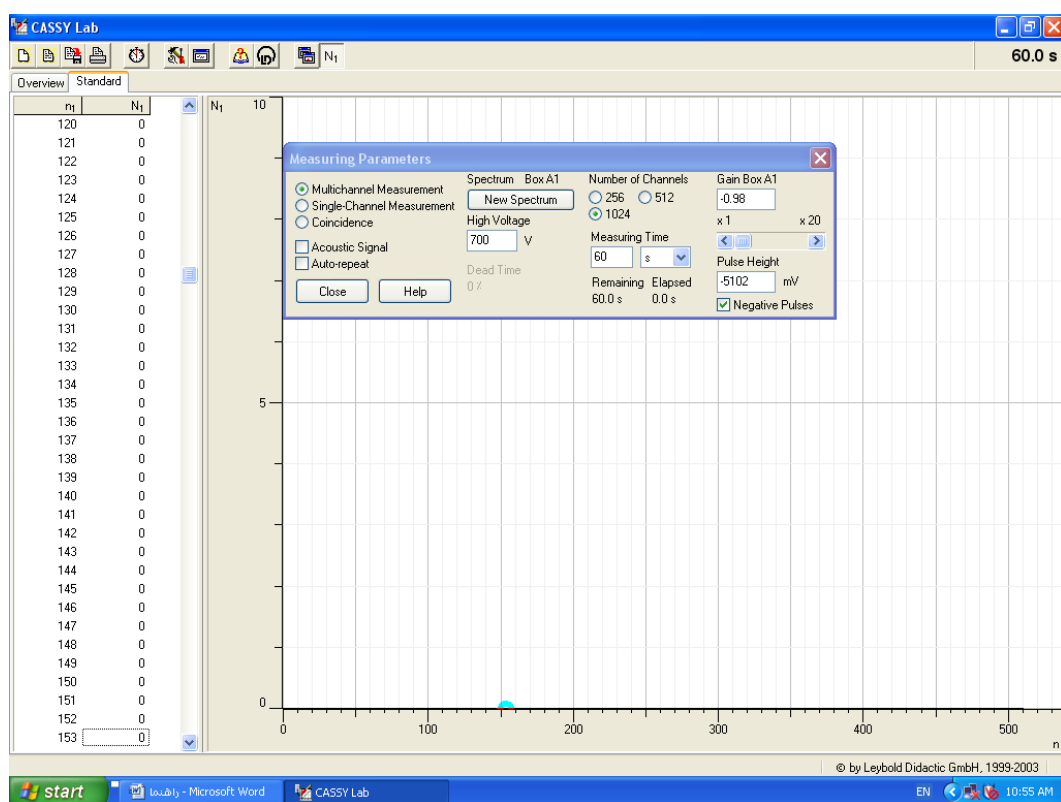


۲. بعد از باز کردن نرم افزار، این دو صفحه به ترتیب ظاهر خواهند شد. در صفحه دوم، با ظاهر شدن پنجره مربوط به Setting، روی کانال ورودی موجود در گزینه Cassy دو بار کلیک میکنیم. همچنین با کلید F5 نیز می توان پنجره تنظیمات را ظاهر کرد.

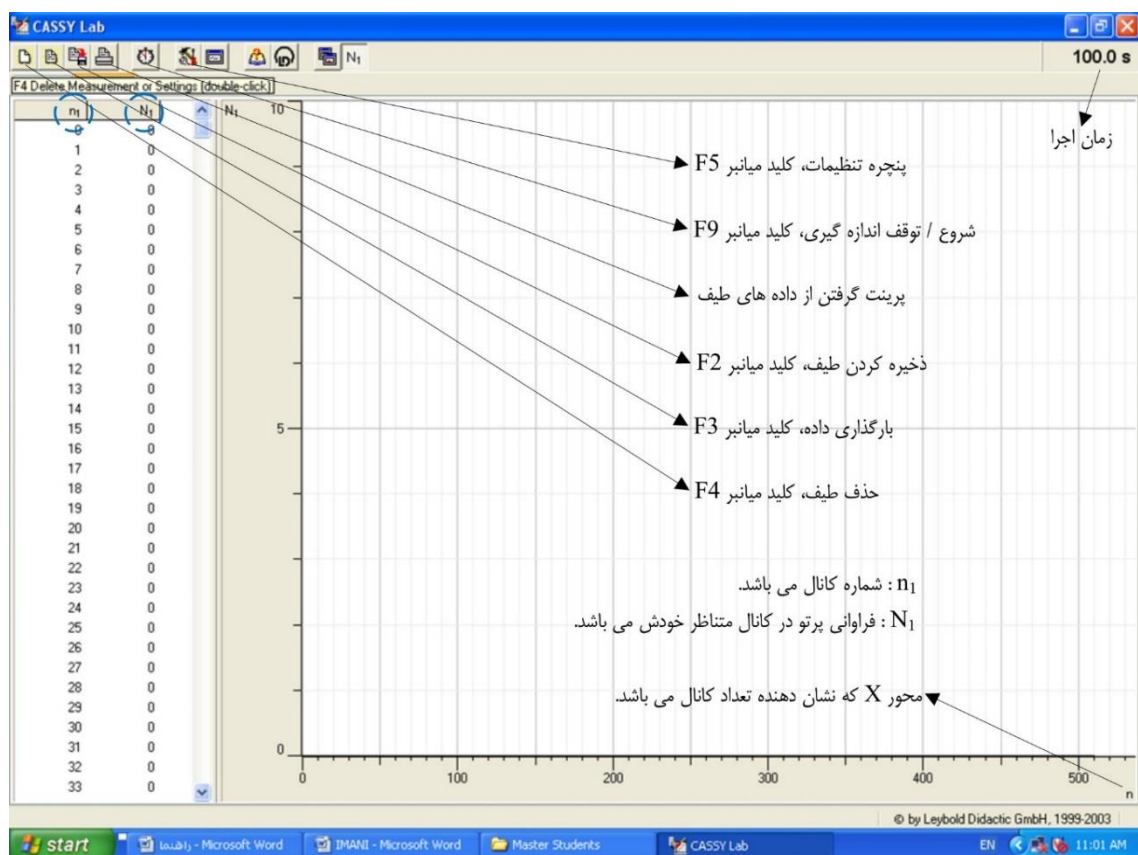


۳. در این مرحله، پنجره تنظیم پارامترها در صفحه نرم افزار ظاهر می شود. تنظیمات زیر را انجام می دهیم:

- (۱) در ستون اول، تنظیمات را روی فرم Multichannel Measurement قرار می دهیم.
- (۲) در ستون دوم، مقدار ولتاژ اعمال شده توسط منبع ولتاژ مشاهده میشود. برای این منظور دستگاه منبع ولتاژ را روشن کرده به آرامی به ولتاژ ۵۰۰ ولت میرسانیم این ولتاژ که به شکل دستی افزایش دادیم در صفحه نرم افزار ظاهر می شود.
- (۳) در ستون سوم، تعداد کانال های انرژی را روی گزینه ۱۰۲۴ کانال انتخاب می کنیم.
- (۴) زمان را روی ۶۰ ثانیه تنظیم میکنیم.
- (۵) سپس گزینه Close را کلیک میکنیم و پنجره تنظیمات را میبندیم.
- (۶) با کلیک روی گزینه Start یا کلید میانبر F9 اندازه گیری شروع می شود.

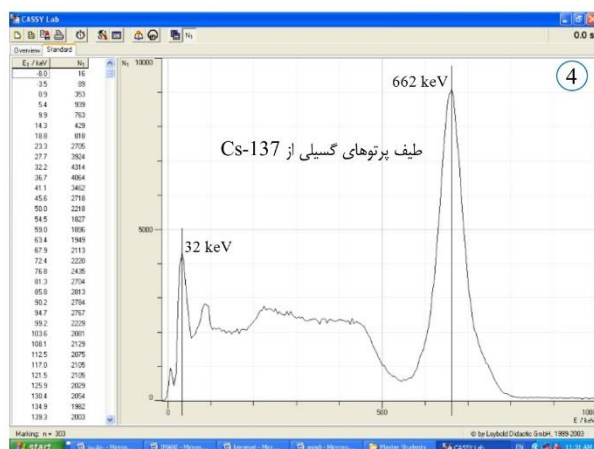
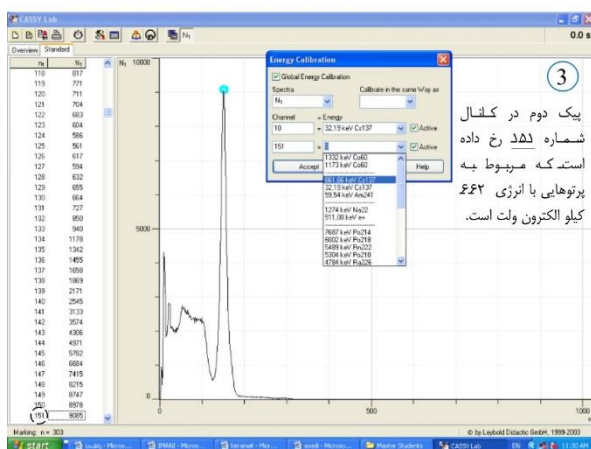
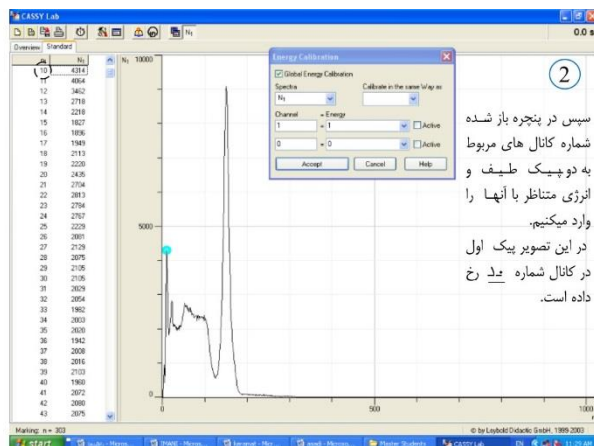
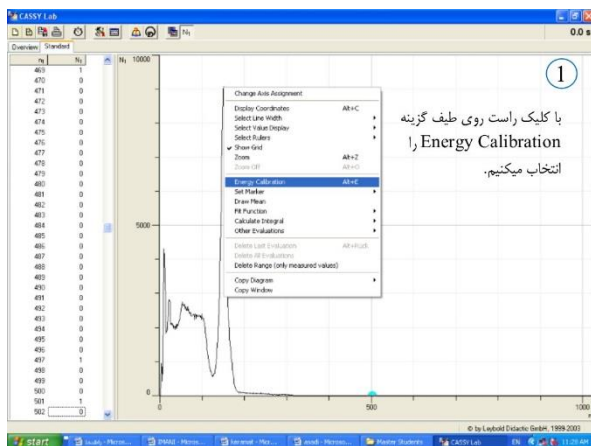


۴. در صفحه باز شده ابزار و اطلاعات مهم و مفیدی وجود دارند که در شکل زیر موارد کاربردی توضیح داده شده است.



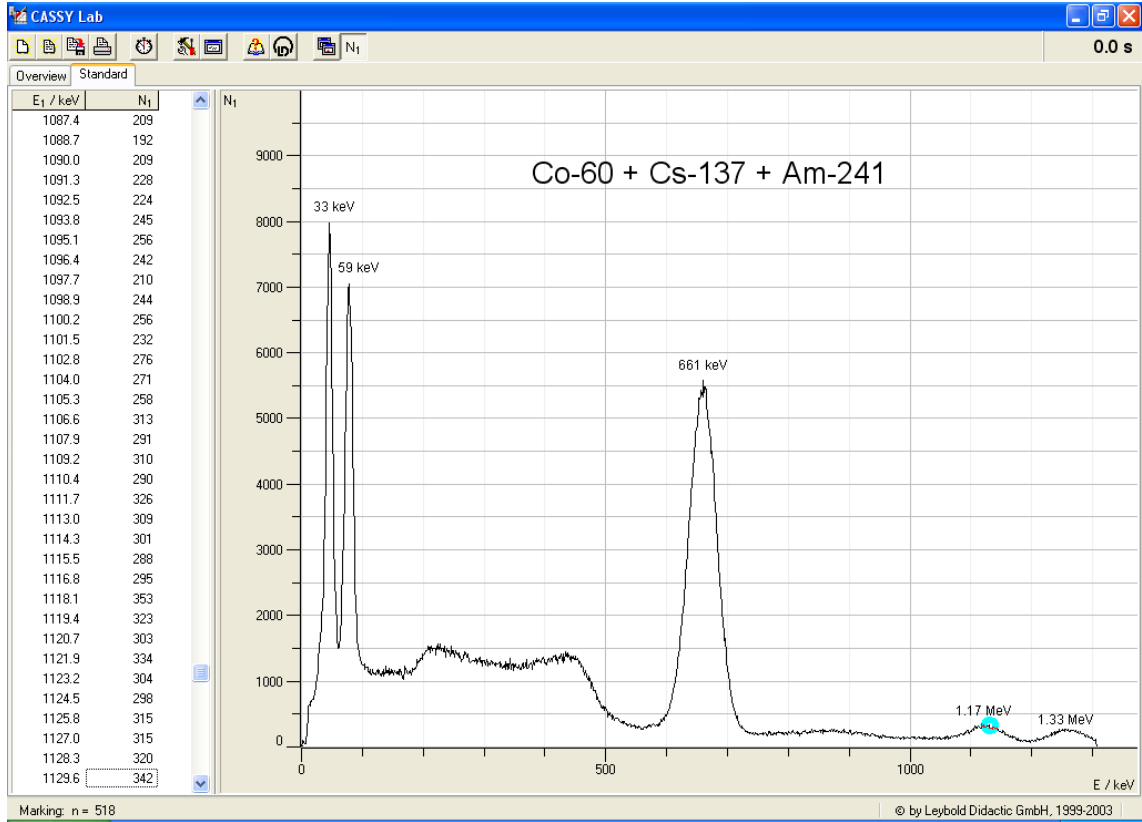
۵. کالیبراسیون انرژی

یکی از اصلی ترین بخش های طیف سنجی گاما، کالیبراسیون انرژی می باشد. تا زمانی که این کار انجام نشده است شناسایی مواد پرتوزای جدید امکان پذیر نمیباشد. بدین منظور در ابتدا از یک منبع پرتوزای شناخته شده موجود در آزمایشگاه استفاده می شود. در این جا ما از سزیم ۱۳۷ استفاده کرده ایم که میدانیم دو پیک با انرژی های ۶۶۲ و ۳۲ کیلو الکترون ولت دارد. بعد از رسم نمودار طیف پرتوهای منبع پرتوزا مراحل زیر را جهت کالیبراسیون انرژی انجام می دهیم.



اکنون بعد از کالیبراسیون انرژی می توانیم طیف پرتوهای گسیلی از هر نمونه پرتوزا را بدست آوریم. با کلیک روی F4 صفحه اندازه گیری پاک می شود. منبع رادیو پرتوزا را قرار می دهیم و F9 را فشار می دهیم تا اندازه گیری صورت پذیرد.

مثالی از طیف انرژی گسیلی از سه چشمه پرتوزا به طور همزمان



LABORATORY CLASSIFICATION

In order to radiation safety for classified and unclassified radiation workers

It is noted that

The *Radiation Protection and Dosimetry Laboratory* has been located in class "**Type C**" in terms of radiation safety due to the specific radioactive material in the laboratory.

Type: C

Radiotoxicity: class 1

Activity: less than 0.5 MBq

Ref: *Radiation Safety Requirements for Radionuclide Laboratories, Classification of radionuclide laboratories, ST Guide 6.1., issued on 30 May 1991.*

۲) منابع و ماخذ

۱. پایاننامه دکتری فیزیک پزشکی، شبیه سازی مونت کارلوی سیستم تصویربرداری برش نگاری رایانه ای نشر تک فوتونی و بررسی پارامترهای موثر بر کیفیت تصویر، دکتر جلیل پیرایش اسلامیان، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ۱۳۸۹.
۲. پایاننامه کارشناسی ارشد فیزیک پزشکی، مقایسه میزان دز دریافتی برست در آزمونهای آنژیوگرافی و آنژیو پلاستی کرونری با و بدون استفاده از حفاظ های بیسموت پلی اورتانی و بیسموت سیلیکونی، رضا ملک زاده، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ۱۳۹۷.
۳. دزیمتری ترمولومینسانس، نویسنده A.F.Mckinlay ترجمه نوید آقایی امیر خیزی و الهام شاه حسینی، انتشارات سایه نیما، تهران، ۱۳۹۰.
۴. مبانی آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای یونیزان، محسن حاجی زاده صفار، انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ۱۳۷۹.
۵. فیزیک و دستگاههای پزشکی هسته ای، ریچارد پوسنر، مائو پالمر، ادوارد پوسنر، ترجمه صالح صالحی ذهابی، انتشارات نور دانش، تهران، ۱۳۹۴.
۶. کاتالوگ های مربوط به دزیمتری گاما اسپکترومتری و دزیمتری ترمولومینسانس.
7. Radiation Safety Requirements for Radionuclide Laboratories, Classification of radionuclide laboratories, ST Guide 6.1., issued on 30 May 1991.
8. Garlick G F, Luminescent Materials, Oxford press, England, 1949.