

فصل اول

مقدمه

- ۱-۱: اصول فیزیکی دزیمتری نوترون، انواع برخورد های نوترون با هسته، برخورد نوترون با بافت و منابع مولد نوترون
- ۲-۱: دزیمتری فردی نوترون
- ۳-۱: دزیمتری فردی نوترون براساس ثبت رد پای هسته ای با استفاده از CR-39
- ۴-۱: روش های شبیه سازی معادلات ترابرد ذرات
- ۵-۱: ساختار شبکه عصبی بیولوژیک
- ۶-۱: پیشینه ی مطالعاتی
- ۷-۱: تعریف مسئله، فرضیات و اهداف

۱-۱: اصول فیزیکی و دزیمتری نوترون

نوترون یکی از ذرات تشکیل دهنده هسته اتم است که جرم آن کمی از پروتون بیشتر می باشد و به علت خنثی بودن از نظر بار الکتریکی، هیچ برهم کنش کولمبی بین نوترون و الکترون های اتم و یا هسته اتم اتفاق نمی افتد و تنها برهم کنش ممکن، برخورد هسته ای است که برای وقوع آن باید نوترون وارد هسته اتم شود یا به اندازه کافی به آن نزدیک شده باشد. پرتوگیری ناشی از نوترون ها بخشی از پرتوگیری طبیعی بشر را تشکیل می دهند و از طرف دیگر سیر تکاملی انسان نیز در جهت پیشرفت، در مناطقی که حتی تابش طبیعی وجود ندارد می تواند سبب افزایش پرتوگیری ناشی از نوترون می شود. در صنایعی از قبیل چرخه سوخت هسته ای، نیروگاه های تولید برق هسته ای، صنایعی که از چشمه های نوترونی استفاده می کنند و نواحی نزدیک به شتابدهنده های پزشکی می توان پرتوگیری ناشی از نوترون را متصور بود. میدان های نوترونی موجود در چنین تاسیساتی دارای طیف گسترده ای از نوترون های حرارتی تا چندین مگاالکترون ولت می باشند. نوترون در سال ۱۹۳۲ توسط چادویک (Chadwick) کشف گردید. این کشف منجر به حل بسیاری از فرضیه های مربوط به ساختمان هسته شد. نوترون ها به صورت آزاد پایدار نیستند و در اثر واپاشی آن ها یک پروتون و یک الکترون تولید می گردد. نیمه عمر نوترون آزاد حدود $11/7$ دقیقه می باشد.

۱-۱-۱: ویژگی های نوترون [۱]

نوترون ها معمولاً بر اساس انرژی جنبشی و نوع اندرکنش آن ها با مواد دسته بندی می شوند. گرچه تقسیم بندی یکسان و پذیرفته شده ای وجود ندارد ولی یکی از تقسیم بندی های مشهور به شرح زیر می باشد:

- حرارتی $> 0.4 \text{ eV}$
- میانی $0.4 \text{ eV} - 200 \text{ keV}$
- تند $200 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$

• نسبتی

$$10 \text{ MeV} <$$

به نوترون‌های متوسطی که انرژی آن‌ها بین 0.4 eV و 100 eV می‌باشد، نوترون‌های فوق حرارتی (Epithermal) گویند.

۱-۱-۱: نوترون‌های حرارتی

نوترون هنگام عبور از ماده به دنبال آنجا م برخوردهائی با اتم‌ها و مولکول‌های ماده انرژی خود را از دست می‌دهند، به طوری که توزیع انرژی آن‌ها همانند توزیع انرژی اتم‌ها و مولکول‌های ماده‌ای است که نوترون در آن قرار دارد. این نوترون‌ها در تعادل حرارتی با محیط اطراف شان می‌باشند و به همین علت نوترون‌های حرارتی نام گذاشته شده اند. در حالت تعادل، رابطه میان انرژی جنبشی نوترون‌ها و دمای محیط، از توزیع ماکسول-بولتزمن به دست می‌آید:

$$f_{(E)} = 2\pi \cdot (\pi kT)^{-1.5} \cdot e^{-E/kT} \cdot E^{1/2} \quad 1-1$$

که در آن:

$f_{(E)}$ کسر نوترون‌ها با انرژی E در واحد انرژی،
 K ، ثابت بولتزمن و برابر $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ و
 T ، دمای مطلق بر حسب K می‌باشد.

همچنین نوترون‌ها در تعادل حرارتی دارای توزیع سرعت ماکسول می‌باشند. بنابراین چگالی نوترون‌ها به صورت تابعی از سرعت به شکل زیر می‌باشد:

$$n(v)dv = 4nv^2 / \pi^{1/2} (m/2kT)^{3/2} \cdot e^{-1/2} \cdot v^2 m/kT dv \quad 2-1$$

که در رابطه فوق $n(v)dv$ چگالی نوترون با سرعت بین v و $v+dv$ ، m جرم نوترون، k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق بر حسب کلون می‌باشد. محتمل‌ترین انرژی نوترون‌های حرارتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_p = kT \quad 3-1$$

که مقدار آن در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر 0.0253 eV می باشد. رابطه ۱-۱ نشان می دهد که انرژی نوترون های حرارتی به دمای محیط بستگی دارد و نوترون های حرارتی دارای یک طیف پیوسته انرژی بوده و انرژی اغلب آن ها به محتمل ترین انرژی نزدیک می باشد. حد بالای انرژی نوترون های حرارتی معادل 0.04 eV در نظر گرفته می شود. این مقدار متناظر با یک افت شدید در سطح مقطع جذب این نوترون ها توسط کادمیم است. مهم ترین برهم کنش نوترون های حرارتی با ماده، جذب پرتوزا (n,γ) می باشد، اما برهم کنش های دیگری نیز مانند (n,p) ، (n,α) و $(n,\text{fission})$ ممکن است رخ دهد. در برخی هسته ها، مانند ^{10}B ، سطح مقطع برخورد نوترون با عکس سرعت نوترون ها رابطه مستقیم دارد.

۱-۱-۱: نوترون های میانی

نوترون های میانی اغلب در اثر برخورد الاستیک نوترون های تند با مواد با عدد اتمی پائین نظیر: کند کننده ها یا بدن انسان به وجود می آید. در برخورد الاستیک، انرژی و اندازه حرکت ذرات قبل از برخورد و پس از آن ثابت می ماند، نوترون های میانی عموماً دارای طیف انرژی متناسب با $1/E$ در گستره انرژی بین 0.04 eV و 200 keV می باشند. احتمال برخورد نوترون های میانی با مواد متناسب با عکس سرعت نوترون می باشد، اما در برخورد این نوترون ها با مواد دارای عدد اتمی متوسط و بالا، جذب رزونانسی برای برهم کنش های (n,p) ، (n,α) و $(n,\text{fission})$ و غیر الاستیک نیز ممکن است رخ دهد. در برخورد غیر الاستیک، تئوری های کلاسیک کاربرد ندارد و هسته هدف در حالت تحریک باقی می ماند.

۱-۱-۳: نوترون های تند

نوترون هایی که انرژی آن ها بیش از 200 keV باشد نوترون های تند اطلاق می شود. برخورد غالب بین نوترون های تند و مواد با عدد اتمی پائین برخورد الاستیک می باشد و هر چه انرژی نوترون و یا عدد اتمی ماده افزایش یابد احتمال برخورد غیر الاستیک نیز افزایش می یابد.

۱-۱-۴: نوترون‌های نسبیتی

نوترون‌های با انرژی بیش از 10 MeV را نوترون‌های نسبیتی می‌نامند زیرا سرعت آن‌ها با سرعت نور قابل ملاحظه است. برای این نوترون‌ها احتمال برخورد غیر الاستیک از برخورد الاستیک بیشتر است و برای مواد با عدد اتمی بالا احتمال برخورد الاستیک بسیار پائین و قابل صرف نظر کردن است. در انرژی‌های بالا احتمال از هم پاشی هسته نیز با خروج هسته‌هایی مانند آلفا وجود دارد.

۱-۱-۲: انواع برخوردهای نوترون با هسته [۲]

۱-۱-۲-۱: پراکندگی الاستیک (n,n)

در این برخورد، نوترون مقداری از انرژی جنبشی اولیه خود را با هسته‌های هدف که فقط یک برگشت را تحمل می‌کنند، تقسیم می‌کند و هسته را پراکنده می‌نماید. انرژی جنبشی هسته پس زده شده و نوترون پراکنده شده با انرژی جنبشی نوترون اولیه برابر خواهد بود و مجموع انرژی جنبشی در سیستم ثابت خواهد ماند. به همین شکل اندازه حرکت نیز ثابت می‌ماند و لذا تئوری های کلاسیک می‌تواند به کار رود.

۱-۱-۲-۲: پراکندگی غیرالاستیک ($n,n\gamma$)

این حالت مشابه پراکندگی الاستیک بوده، با این تفاوت که در این حالت مجموع انرژی جنبشی نوترون پراکنده شده و هسته پس زده شده از انرژی نوترون اولیه کمتر است و در واقع مقداری از انرژی جنبشی نوترون اولیه صرف تحریک هسته و در نتیجه هسته به حالت تحریک درمی‌آید و انرژی خود را با گسیل اشعه گاما از دست می‌دهد.

۱-۱-۲-۳: جذب (n,γ)

جذب نوترون‌های حرارتی تقریباً توسط کلیه هسته‌ها امکان پذیر است. در این برخورد نوترون فرودی جذب هسته شده و یک هسته مرکب به وجود می‌آورد که در حالت تحریک قرار دارد و انرژی تحریک را با گسیل یک یا چند فوتون گاما از دست می‌دهد.

۱-۲-۴: واکنش مولد ذرات باردار

در این حالت نوترون جذب هسته شده و در نتیجه ذرات باردار مانند : آلفا یا پروتون از هسته خارج می‌شوند. این برخورد را با علامت (n,p) و (n,α) نشان می‌دهند.

۱-۲-۵: واکنش‌های نوترون‌زا

در اثر برخورد نوترون با هسته، یک یا دو نوترون از هسته کنده می‌شوند که این واکنش‌ها با علامت $(n,2n)$ و $(n,3n)$ نمایش داده می‌شوند.

۱-۲-۶: شکافت

برخورد نوترون با هسته‌های قابل شکافت باعث تولید هسته مرکب شده که سپس هسته مرکب به دو پاره شکافت تقسیم می‌گردد و چند نوترون آزاد می‌گردند.

۱-۱-۳: برخورد نوترون با بافت

بافت زنده اساساً از عناصری با اعداد اتمی پائین، عمدتاً هیدروژن، اکسیژن، کربن و نیتروژن تشکیل شده است، که این عناصر کندکننده‌های موثری برای نوترون‌های تند می‌باشند. نوترون‌ها بدلیل عدم دارا بودن بار، نمی‌توانند مستقیماً یونسازی نمایند، بنابراین مهم‌ترین اثرات تخریبی در بافت در نتیجه تولید ذرات باردار در اثر اندرکنش گامای تولید شده در اثر جذب یا گیراندازی نوترون‌های حرارتی بوسیله هسته هیدروژن ایجاد می‌شود. در واقع، نوترون‌های حرارتی و نوترون‌های با انرژی میانی اساساً با دو عنصر بافت اندرکنش می‌کنند: ۱- گیراندازی و جذب در هیدروژن از طریق واکنش ${}^1_0n + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + \gamma$ ، که در این حالت نوترون جذب هسته هیدروژن شده و هسته دوتریوم و یک فوتون گاما با انرژی $2/2$ مگاالکترون ولت تولید می‌گردد. گامای حاصل بوسیله آثار فوتوالکتریک، کامپتون یا تولید جفت در بافت، الکترون تولید نموده و در نتیجه در طول مسیر یونسازی می‌نمایند. ۲- جذب در نیتروژن از طریق واکنش ${}^{14}_6N + {}^1_0n \rightarrow {}^{14}_7N + {}^1_1H$ و تولید هسته کربن و یک پروتون با انرژی $0/66$ مگا الکترون ولت که سبب یونسازی مستقیم در طول مسیرش می‌شود. جهت برآورد دز جذب شده یا معادل دز نوترون در انسان باید مشخصات میدان نوترون بویژه طیف انرژی

آن مشخص باشد. برهمکنش‌های نوترون با بافت و هم‌چنین ضرایب وزنی پرتو بشدت به انرژی نوترون بستگی دارند. گامای ساطع شده در اثر جذب نوترون توسط هسته هیدروژن در بافت مهم‌ترین سهم را در دز جذبی توسط انسان در انرژی‌های کمتر از 0.2 مگاالکترون‌ولت دارد و در انرژی‌های بیش از $1/2$ مگا الکترون‌ولت پروتون‌های پس زده شده در اثر برخورد الاستیک بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد.

مهم‌ترین اندرکنش نوترون تند با بافت، پراکندگی الاستیک می‌باشد. در یک برخورد، نوترون به طور متوسط نیمی از انرژی خود را به هسته هیدروژن منتقل می‌نماید. به طور مثال یک نوترون با انرژی 1 MeV به طور متوسط 20 برخورد انجام می‌دهد تا به تعادل حرارتی با بافت برسد و حدود 5 cm نیز مسافت طی می‌کند. نوترون حرارتی شده نیز چند سانتی‌متر در بافت نفوذ می‌کند تا توسط هسته هیدروژن یا نیتروژن جذب گردد. در بعضی حالات نوترون از سطح بدن پراکنده می‌شود که به این نوترون‌ها، نوترون‌های آبدو گویند. نوترون‌ها همچنین با سایر عناصر تشکیل دهنده بافت نیز برخورد انجام می‌دهند ولی متوسط انرژی منتقل شده در این حالت نسبت به انرژی منتقل شده به هیدروژن بسیار کمتر است. نوترون‌های با انرژی بین 0.5 MeV و 5 MeV حدود 90% انرژی خود را در بافت در اثر برخورد الاستیک با هسته هیدروژن از دست می‌دهند.

۱-۲: دزیمتری فردی نوترون

دزیمترهای نوترون به دو صورت فعال و غیر فعال تقسیم بندی می‌شوند، که نمونه فعال آن، تخمینی از دز دریافتی واقعی بدن را بدست می‌دهد، در حالی که نمونه غیر فعال، تخمین دز را پس از طی فرایند قرائت بدست خواهد داد. لذا مزیت عمده دزیمترهای فعال، ارائه اطلاعات دز به صورت سریع در میدان نوترونی می‌باشد، لذا به نظر می‌رسد که این نوع دزیمترها، سیستم مناسبی برای کاربرد در دزیمتری محیطی باشد. اما در اندازه‌گیری نوترون مشکلاتی وجود دارد که باید توجه ویژه‌ای به آن‌ها شود، اهم مشکلات مربوطه

عبارتند از: اولاً مقادیر بسیار کوچک واگذاری انرژی تابش های نوترونی در مواد می باشد، ثانیاً تشخیص این انرژی و تفکیک آن از تابش فوتون ها و الکترون ها بوده، ثالثاً عدم وجود دزیمتر نوترونی که بتواند در گستره وسیعی از انرژی نوترون ها پاسخ مناسبی داشته باشد، رابعاً هیچ برهم کنش نوترونی وجود ندارد که احتمال وقوع آن قابل ملاحظه باشد و در اثر آن تمامی انرژی نوترون به یک ذره باردار منتقل گردد (مثل فوتوالکتریک)، خامساً منابع مولد نوترون (به استثنای ژنراتورهای نوترون) بر خلاف چشمه های گاما، نوترون ها را با طیف پیوسته انرژی منتشر می نمایند و سادسماً تنها کارایی آشکارسازهای نوترونی بسیار کوچکتر از فوتون ها و یا الکترون هاست، بلکه برای ایجاد دز معادل یکسان، انرژی منتقلی بوسیله نوترون ها در آشکارساز، تقریباً ۱۰ برابر پائین تر از انرژی انتقالی توسط فوتون ها و الکترون هاست در نظر گرفته می شود [۳]. بنابراین جداسازی و تفکیک سیگنال های تولید شده بوسیله تابش های مختلف در یک میدان مختلط بسیار مهم و حساس است، خصوصاً در جایی که مولفه نوترونی، قسمت اعظم طیف را تشکیل نداده باشد، نمونه بارز از این نوع، کارکرد شتابدهنده های خطی در انرژی های بالاتر از ۱۰ MeV در یک مرکز درمانی پزشکی می باشد. مولفه های نوترونی در داخل اتاق درمان عموماً از سر دستگاه شتابدهنده و پراکندگی ناشی از آن، دیوارها و وسایل و تجهیزاتی که در اتاق درمان موجودند، ناشی می شود [۴]. اندازه گیری دز معادل در اینگونه میدان ها بوسیله دزیمترهای فعال در حضور میدان الکترومغناطیسی با فرکانس بالا، میدان فوتونی و تشعشعات پراکنده آن و از سوی دیگر طراحی دزیمتر و یا سیستمی که بتواند دز ناشی از نوترون در طیف انرژی گسترده را پیش بینی و اندازه گیری نماید بسیار مشکل می باشد. لذا پایش پرتوگیری شغلی در میدان های نوترونی، اساساً بوسیله سیستم های آشکارسازی غیراکتیو همچون آشکارسازهای ردپا، دزیمترهای آلبدو یا فیلم دزیمتری با استفاده از فیلترهای مختلف انجام می شود [۵]. پاسخ این سیستم های دزیمتری بشدت به انرژی نوترون بستگی دارد. بنابراین برای نوترون های با انرژی پائین و نوترون های حرارتی، دزیمترهای آلبدو، پاسخ مناسبی دارد. در حالیکه

آشکارسازهای ردپا، راندمان خوبی نسبت به نوترون های سریع از خود نشان می دهند. عموماً، دزیمترها با یک میدان نوترونی با توزیع انرژی متفاوت از آنچه که در عمل به منظور دزیمتری در آنجا بکار گرفته می شوند کالیبره می گردند که نتیجه آن ارزیابی نادرست دز می باشد. ارزیابی دز فردی از قبیل دز معادل $H_{p(10)}$ ، که توسط ICRP توصیه شده است، لزوم استفاده از دزیمترهای فردی با راندمان آشکارسازی نوترون ها در گستره وسیعی از انرژی را ایجاب می نماید. یکی از مهمترین سیستم های دزیمتری فردی، توانایی آن در اندازه گیری دزهای پائین می باشد. در واقع، کاهش حد دز سالانه به متوسط 100 mSv در ۵ سال بر اساس ICRP103، بیان کننده آن است که سطوح دز حتی در مقادیر پائین باید قابل اندازه گیری باشد. ویژگی دزیمترهای فردی براساس صحت کلی و محاسبه حد آشکارسازی پائین استوار است. توصیه های ارائه شده توسط ICRP103 برای صحت دزیمتری فردی عبارتند از:

- در محیط های کاری، جایی که انرژی و جهت میدان تابش به ندرت مشخص است، عدم قطعیت در مونیتورینگ فردی کارکنان در پرتوگیری خارجی با فاکتور $1/5$ متناسب می باشد.

- برای سطوح دز فردی در گستره دزهای پائین، کمتر از یک پنجم حد دز مربوطه، حداکثر فاکتور عدم قطعیت برابر ۲ می باشد، بدین معنی که عدم قطعیت مورد قبول برای $H_{p(10)}$ باید بین 30% - و 50% مقدار واقعی در 95% سطح اطمینان می باشد.

- برای سطوح دز فردی نزدیک به حدود دز، حداکثر فاکتور عدم قطعیت برابر $1/5$ در 95% سطح اطمینان می باشد.

صحت کلی یک سیستم دزیمتری با در نظر گرفتن آثار خطاهای راندمی و سیستماتیک بدست می آید، بطوریکه عدم قطعیت سیستماتیک معمولاً به وسیله منابع زیر ایجاد می شود:

۱. وابستگی پاسخ به انرژی و جهت پرتو،

۲. پاسخ غیر خطی،

۳. مه آلودگی و زمینه‌ای که به رطوبت و دما بستگی دارد،

۴. آثار ناشی از پرتوگیری نورانی ناخواسته،

۵. آثار ناشی از پرتوگیری‌های یونیزان به غیر از پرتو مورد اندازه‌گیری،

۶. آثار ناشی از شوک مکانیکی،

۷. خطای کالیبراسیون و

۸. تغییرات ناشی از پرتوگیری طبیعی زمینه محیطی.

و عدم قطعیت راندمی معمولاً بوسیله منابع زیر ایجاد می‌شود:

۱. ناهمگنی حساسیت آشکارساز و تعیین دز صفر برای کلیه دزیمترهای مورد استفاده،

۲. اغتشاش و اعوجاج در پارامترهای قرائت شده شامل حساسیت قرائت گر و زمینه. برای

دزهای نزدیک به حدود دز، عدم قطعیت مرکب (S)، بر اساس عدم قطعیت راندمی (δ_r)

و عدم قطعیت سیستماتیک (δ_s) از طریق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$S^2 = \delta_r^2 + \delta_s^2 \quad 4-1$$

بطوریکه δ_r می‌تواند بوسیله یک سری از اندازه گیری‌ها محاسبه شود و δ_s باید از

انحراف معیارهای جداگانه‌ای $\delta_{s,i}$ برای هر عدم قطعیتی که در δ_s مشارکت دارند بدست آید.

با در نظر گرفتن الزامات صحت کلی مندرج در ICRP برای دزهای نزدیک به حدود

دز، عدم قطعیت مرکب S باید براساس رابطه زیر استوار باشد:

$$S = \sqrt{(\delta_r^2 + \delta_s^2)} \leq 0.21 \quad 5-1$$

در خلال اندازه‌گیری‌های معمول، نتایج دزیمترها R_t شامل تابش‌های زمینه و پاسخ

نرمال دزیمترهای تابش ندیده، همراه با مؤلفه واقعی دز می‌باشد. دز واقعی از رابطه زیر

بدست می‌آید:

$$D = R_t - R_b \quad 6-1$$

- بطوریکه R_b مقدار متوسط دزیمترهای تابش ندیده و زمینه می باشد. توانایی یک دزیمتر فردی برای اندازه گیری دزهای پائین، قدرت تفکیک و جداسازی مقادیر R_t از R_b می باشد که این توانمندی توسط سه آستانه مختلف در ICRP ۱۰۳ مشخص شده است:
- حد تصمیم گیری (Decision)، صرفاً به قرائت زمینه مرتبط است و به عنوان حد بالای دزهای اندازه گیری شده با یک احتمال مشخص (معمولاً ۰.۹۵٪) بعنوان دز واقعی که به مقدار R_b هم بستگی نداشته باشد، تعریف می شود.
 - حد آشکارسازی، به عنوان کمترین دزی است که می تواند با یک سطح اطمینان (معمولاً ۰.۹۵٪) آشکارسازی شود، تعریف می گردد و به عنوان دقت اندازه گیری محسوب نمی گردد.
 - حد محاسبه، کمترین دزی است که می تواند با یک دقت مشخص، اندازه گیری گردد.
- اساسی ترین روش های ارزیابی دز دریافتی توسط بدن که می توانند در رابطه با دزیمتری فردی در یک فاصله زمانی مشخص مفید واقع شوند عبارتند از : آشکارسازهای امولسیون هسته ای، آشکارسازی از طریق پرتوزا کردن، آشکارسازهای ترمولومینسانس و آشکارسازی رد پای ذرات باردار در جامدات.

۱-۲-۱: آشکارسازهای امولسیون هسته ای [۳]

از پراکندگی الاستیک نوترون های تند با هسته اتم هیدروژن موجود در امولسیون عکاسی و کاغذ پوشش آن، پروتون های برگشتی تولید می شوند که برای نوترون های تک انرژی با انرژی E ، دارای توزیع یکنواخت انرژی بین 0 تا E خواهند بود. این پروتون های برگشتی در راستای ردپاها ایجاد یونسازی نموده و در واکنش با ذرات نقره ردپاهائی بوجود می آید که پس از انجام عمل شیمیایی مناسب، بوسیله میکروسکوپ با درشت نمایی ۵۰۰ برابر قابل رویت خواهند بود. علیرغم پاسخ مناسب این دزیمتر به نوترون های تند، نسبت به نوترون های با انرژی کمتر از 0.7 MeV غیر حساس است و در نتیجه استفاده از این

دزیمترها برای مناطقی که احتمال فراوانی نوترون های کم انرژی در آن نواحی زیاد است (نظیر راکتورها) توصیه نمی شود.

۱-۲-۲: آشکارسازی از طریق پرتوزا کردن

بعضی از اندرکنش های نوترونی می توانند مولد ایزوتوپ های پرتوزا باشند . میزان پرتوزایی تولید شده در هر ماده به میزان تابش دهی توسط نوترون بستگی دارد . بنابراین با اندازه گیری پرتوزایی تولید شده می توان به میزان نوترون های تابش شده دسترسی پیدا نمود. آشکارسازی از طریق پرتوزا کردن که معمولاً با استفاده از پولک های نازکی از عناصر طبیعی نظیر سولفور، فسفر، طلا و ایندیم ساخته می شوند و اصولاً در دزیمتری حوادث هسته ای مورد استفاده قرار می گیرند.

۱-۲-۳: آشکارسازهای ترمولومینسانس

بعضی از کریستال ها نظیر LiF و $\text{CaF}_2(\text{Mn})$ پس از پرتو دهی و جذب گاما از خود نور منتشر می کنند، اینگونه کریستال ها را ترمولومینسانس می نامند. دزیمتری نوترون توسط آشکارسازهای ترمولومینسانس همانند دزیمتری پرتوهای ایکس و گاما نبوده و از پیچیدگی های خاصی برخوردار است. زیرا روش های انتقال انرژی متفاوت و متغیر می باشد. انتقال انرژی از نوترون به محیط آشکارساز یک پروسه دو مرحله ای است. مرحله اول شامل تولید ذرات یا پرتوهای یونساز در محیط آشکارساز یا در ماده متصل به آن است و مرحله دوم شامل انتقال انرژی ذرات و پرتوهای ثانویه از طریق برخوردهای الکترونی و هسته ای در محیط آشکارساز می باشد.

حساسیت اغلب کریستال های ترمولومینسانس به نوترون های حرارتی بیش از نوترون های تند و متوسط می باشد، زیرا یک ترکیب مجدد و اشباع قابل توجه در امتداد ردپاهای ذرات با LET بالا نظیر پروتون های بگشتی دیده می شود.

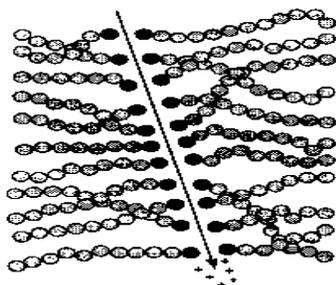
۱-۲-۴: آشکارسازهای ردپای هسته ای حالت جامد

آشکارسازهای ردپای هسته ای حالت جامد (SSNTD) اساساً مواد جامد از نظر الکتریکی عایق شامل مواد معدنی، کریستال ها و پلاستیک می باشند که قادر به ثبت ذرات باردار عبوری از آن ها هستند. عبور ذرات باردار از این مواد، سبب آسیب به ساختار اتمی این آشکارسازها و نه ایتاً تولید آثار پنهان در آن ها می شود. آمایش این آثار پنهان با استفاده از اثرات خورش شیمیایی یا الکتروشیمیایی منجر به بزرگنمایی کافی آن ها شده و با استفاده از میکروسکوپ های اپتیکی قابل رویت می باشند.

۱-۲-۴-۱: مکانیزم تشکیل ردپا

وقتی یک ذره یونساز با ماده برخورد نماید، مقداری از انرژی ذره در واحد طول مسیر به الکترون های ماده منتقل می شود، انتقال انرژی براساس آهنگ خطی کاهش انرژی (dE/dX) که تابعی از خصوصیات ذره فرودی (جرم، بار و انرژی) و جنس آشکارساز مورد استفاده و همچنین مشخصات و ویژگی های محیطی از قبیل دما، رطوبت و فشار انجام می پذیرد. زمانی که انرژی از دست رفته ذره فرودی بالاتر از آستانه ثبت معینی (dE/dX_{min}) باشد، منجر به ایجاد تغییرات در ساختارهای محلی در آشکارسازهای ردپای هسته ای می شود. این تغییرات برای پلیمرها، می تواند بوسیله تغییر در زنجیره مولکولی و یا تشکیل اجزاء شیمیایی بسیار فعال در طول مسیر ذره ایجاد شود، که به تبع آن اثرات پنهان با قطر نوعی ۱ تا ۱۰ nm تشکیل می گردد. رویت این آثار پنهان با بزرگنمایی بسیار بالا امکان پذیر خواهد بود. البته باید توجه شود که آثار مذکور در آشکارسازهای پلی کربنات بگذشت زمان مشخصی بعد از تولید، رشد نموده و به حالت پایدار می رسند. بنابراین اگر آشکارساز

در زمانی که هنوز آثار پنهان در حالت رشد هستند، تحت فرایند خورش قرار بگیرند، همانند آثار تولیدی ناشی از ذرات با یونسازی پائین به نظر می رسند، لذا باید از انجام عملیات خورش بلافاصله پس از تابش، پرهیز شود و بنابراین باید آشکارساز پس از تابش در محل مناسبی نگهداری شود و لذا وضعیت محل نگهداری آن بسیار مهم می باشد و باید از وجود امواج میکروویو (UV) و گاما، وجود اکسیژن بالا، رطوبت بالا و دمای بالا پرهیز گردد. شکل ۱-۱ شمای کلی تغییرات ایجاد شده در زنجیره مولکولی پلیمرها را در اثر عبور ذرات باردار سنگین نشان می دهد [۲۵].



شکل ۱-۱: شمای کلی تغییرات ایجاد شده در زنجیره مولکولی پلیمرها در اثر عبور ذرات باردار

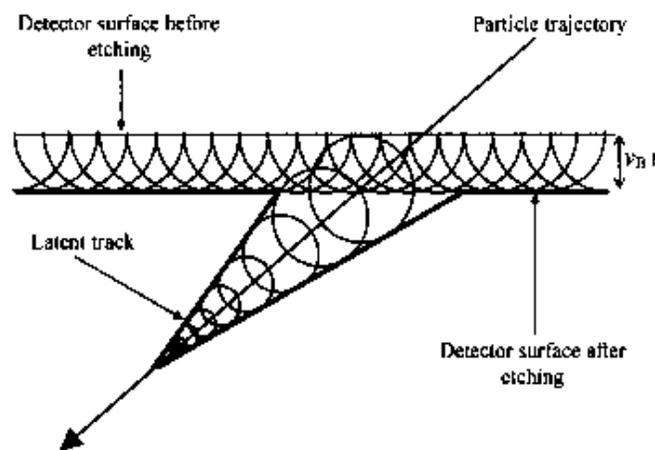
۲-۴-۲-۱: فرآیند خورش

آثار پنهان ایجاد شده در اثر برخورد نوترون ها بسیار کوچک بوده و باید بدون استفاده از ابزار بزرگنمایی، شمارش گردند. بنابراین اگر این آشکارسازها پس از تابش گیری، به کمک یک عامل یا ماده خورش شیمیایی متراکم و گرم از نوع آلكالی های ساده نظیر: NaOH ، KOH و یا اسید نظیر HF یا HNO_3 خورش شوند، آنگاه اندازه این آثار به مقدار کافی بزرگ شده و حتی قطر آن ها به میکرومتر نیز خواهد رسید [۶]. فرایند خورش معمولاً به دو صورت شیمیایی و الکتروشیمیایی انجام می شود.

الف- خورش شیمیایی

خورش شیمیایی شامل قراردادن ورقه های آشکارساز در داخل حمام (تانک) محلول خورش در یک حالت ترمواستاتیکی می باشد. اساس خورش شیمیایی بر این واقعیت استوار

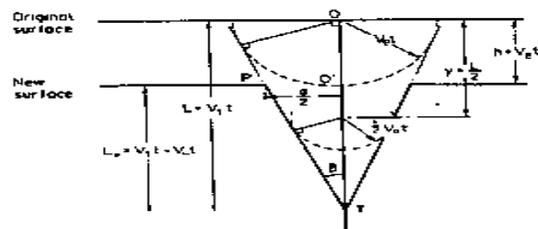
است که اندرکنش شیمیایی اثرات پنهان نسبت به مواد موجود در نواحی اطراف آن بیشتر می‌باشد، یعنی شرط نمایان شدن یک ردپا توسط خوردن شیمیایی آن است که سرعت خوردن در امتداد ردپا (V_T) بیش از سرعت آشکارساز یا نواحی سالم و آسیب ندیده باشد (V_B). لذا اگر یک پلیمر در داخل محلول خوردن قرار گیرد، خوردن سطح پلیمر با سرعت V_B که کمتر از آهنگ خوردن قسمت‌های آسیب دیده (آثار پنهان) V_T صورت می‌پذیرد. همانطور که از شکل (۲-۱) مشاهده می‌شود، تشکیل رد پا به آسانی توسط اصل هویگنس با فرض ثابت بودن هر دو سرعت رد پا و آهنگ ماده خوردن و همگن بودن آن، توضیح داده می‌شود.



شکل ۲-۱: توضیح تشکیل ردپا توسط اصل هویگنس با فرض ثابت بودن سرعت ردپا و آهنگ ماده خوردن

با فرض ثابت بودن هر دو سرعت رد پا و آهنگ خوردن، پس از گذشت زمان خوردن t ، سطح جدید پلاستیک بوسیله احاطه عناصر نیم کره‌ای با شعاع $V_B \cdot t$ تشکیل خواهد شد، در حالی که مواد شیمیایی خوردن در طول مسیر یک ذره، پروفایل مخروطی شکلی تولید خواهد کرد. تمامی ذرات فرودی قادر به تولید اثر قرائت نخواهند بود. در واقع برای هر ذره فرودی با زاویه فرود مشخص (φ) ، که به صورت زاویه بین جهت حرکت ذره و خط

عمود بر سطح آشکارساز تعریف می شود. مولفه آهنگ خورش ردپا در جهت خط عمود بر سطح آشکارساز باید از آهنگ خورش مجموعه ماده خورش (V_B) به منظور ایجاد آثار قابل قرائت تجاوز نماید. شکل ۳-۱ شمای هندسی ردپا را در حالتی که ذره بصورت عمودی با سطح آشکارساز برخورد می کند نشان می دهد.



شکل ۳-۱: شمای هندسی ردپا با $(V_T/V_B) = 3$ در حالتی که ذره بصورت عمودی با سطح آشکارساز برخورد می کند

اگر فرض شود که ذره بصورت عمودی با سطح آشکارساز برخورد می کند، آنگاه ردپا بصورت مخروط با نیم زاویه δ خواهد بود، بطوریکه:

$$\sin \delta = V_B \cdot t / L = V_B \cdot t / V_T \cdot t = V_B / V_T \quad 7-1$$

که L فاصله انتهای ردپا تا نقطه ابتدای آن و t زمان خورش خواهد بود.

$$\delta = \sin^{-1} (V_B / V_T) \quad 8-1$$

این زاویه همان زاویه بحرانی می باشد.

$$\tan \delta = d/2 / L_e = V_B / \sqrt{(V_T)^2 - (V_B)^2} \quad 9-1$$

که d قطر ردپای مشاهده شده است و $L_e = V_T \cdot t - V_B \cdot t$ می باشد. آنگاه d برابر خواهد بود با:

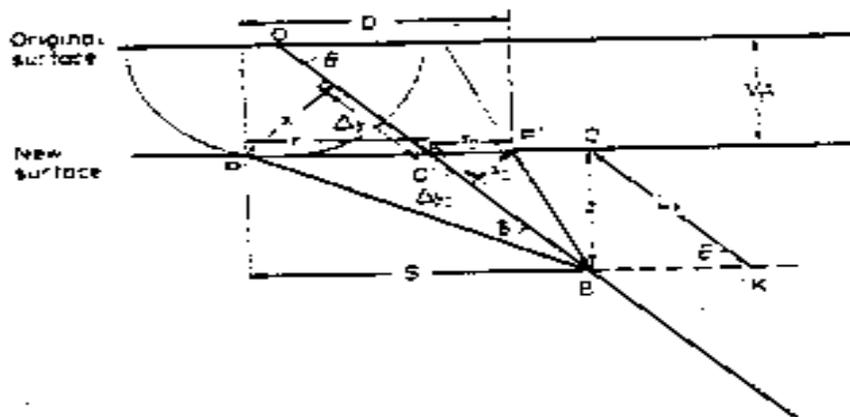
$$d = 2V_B \cdot t \sqrt{(V_T - V_B) / (V_T^2 - V_B^2)} \quad 10-1$$

در ردپاهای ناشی از ذرات فرودی که با زاویه θ نسبت به سطح آشکارساز برخورد می کنند مقطع ردپا در سطح آشکارساز به شکل بیضی است، با قطر بزرگ D و قطر کوچک d . شکل هندسی ردپا در حالیکه زاویه فرودی 45° نسبت به سطح آشکارساز می باشد

در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. طول رد پای بوجود آمده $L_e = V_T \cdot t - V_B \cdot t / \sin \theta$ است. از نقاط p و p دو عمود بر مسیر ردپا رسم می‌کنیم و فاصله‌ها را به ترتیب X_1 و X_2 می‌نامیم. لذا از شکل داریم:

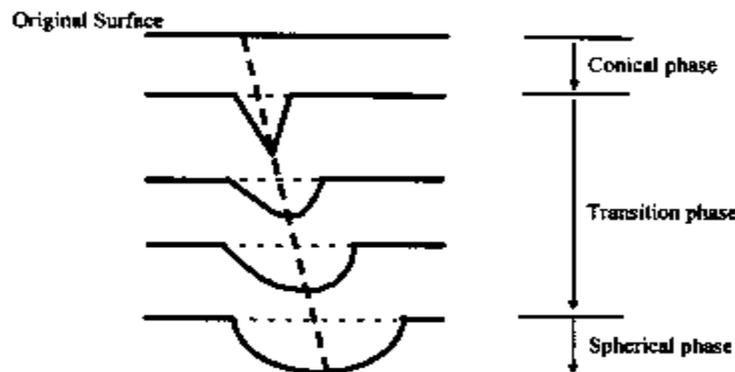
$$D = r_1 + r_2 \quad ۱۱-۱$$

$$r_2 = X_2 / \sin \theta, \quad r_1 = X_1 / \sin \theta \quad ۱۲-۱$$



شکل ۴-۱: شکل هندسی ردپا در حالیکه زاویه فرودی 45° نسبت به سطح آشکارساز می‌باشد

لذا در مقادیر بیشتر از زاویه بحرانی، اثرات قابل قرائت نخواهند بود. اهنگ خورش مجموعه ماده بستگی به ماده پلاستیک آشکارساز مورد استفاده و شرایط خورش از قبیل نوع خورش، درصد الکل، دما و... دارد، در حالیکه تندی ایجاد آثار همچنین به مشخصات ذره فرودی نظیر بار، جرم و تندی از دست دهی انرژی بستگی دارد. نسبت V_B/V_T بعنوان شدت ثبت سیگنال یا پاسخ آشکارساز شناخته می‌شود. شکل آثار به شدت در طول مسیر خورش تغییر می‌کند. هم‌انطور که از شکل ۵-۱ مشاهده می‌شود، سه فاز مختلف ۱- مخروطی ۲- انتقالی و ۳- کروی تشکیل می‌گردد.



شکل ۱-۵: تغییرات شکل آثار در طول مسیر خورش

شکل هندسی نهایی هر پروفایل چاهک خورش به زمانیکه عملیات خورش متوقف می‌شود بستگی دارد. فاز مخروطی وقتی که خورش به انتهای آثار پنهان برسد پایان می‌پذیرد و سطح باز آن بیضوی می‌باشد. بلافاصله پس از آن، فاز انتقال شروع می‌شود. از آنجائی که نواحی آسیب دیده بیشتری وجود ندارد، لذا آهنگ خورش با آهنگ مجموعه ماده خورش در کلیه جهات برابر خواهد بود و قسمت پائین اثر شروع به گرد شدن می‌کند و در عوض سطح باز آن همچنان بیضوی خواهد ماند. فاز کروی وقتی که شکل اثر کروی می‌شود، فرا می‌رسد، بطوری که سطح باز آن دایروی خواهد شد. مهم ترین نتیجه تکنیک خورش شیمیایی، امکان دستیابی به اطلاعات مناسبی از دره فرودی از قبیل انرژی، بار، جرم و زاویه فرود از طریق آنالیز هندسی اثر می‌باشد [۷].

V_T و V_B با اندازه‌گیری پارامترهای D و d با استفاده از یک میکروسکوپ مدرج تا حد میکرومتر قابل محاسبه می‌باشد. همچنین V_B با اندازه‌گیری ضخامت و زمان خورش محاسبه می‌شود. فرض کنید ماده‌ای پلاستیکی با پاره‌های شکافت با زاویه 90° پرتودهی شود. از فرمول‌های زیر برای $\theta = 90^\circ$ داریم:

$$D = d = 2V_B \cdot t \sqrt{(V-1)/(V+1)} \quad 13-1$$

$$V = V_T/V_B \quad 14-1$$

برای اکثر پلاستیک ها و شرایط خورش استفاده شده V_T برای پاره های شکافت خیلی بزرگتر از V_B است. یعنی $V \gg 1$ پس می توان نوشت:

$$D = d = 2V_B.t$$

۱۵-۱

لذا با اندازه گیری قطر ردپا می توان V_B را اندازه گیری کرد. پارامترهای موثر در خورش شیمیایی یک آشکارساز عبارتند از نوع و غلظت محلول شیمیایی و درجه حرارت . یک محلول ایده آل باید

مولکول های آشکارساز را فقط در فصل مشترک جامد- مایع شکسته و حل نماید . محلول- های خورش که معمولاً برای پلیمرهای آلی استفاده می شوند از پتاس یا سود تشکیل شده - اند. البته شوموجی (Somogyi) نشان داده است که اضافه نمودن اتانول به محلول پتاس به میزان قابل توجهی سرعت خورش و حساسیت آشکارساز را افزایش می دهد.

ب- خورش الکتروشیمیایی

تکنیک خورش الکتروشیمیایی توسط توماسینو در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی معرفی شد و به طور گسترده ای در آشکارسازی پاره های شکافت و آشکارسازی ذرات آلفا و هسته - های برگشتی به کار گرفته شد. خورش الکتروشیمیایی می تواند آن دازه اثر را به دو برابر افزایش دهد، بطوری که این آثار با سیستم های با بزرگنمایی کم هم قابل رویت می شوند . این روش بویژه وقتی که ذرات فرودی خیلی سنگین نیستند، نظیر پروتون ها و ذرات آلفا که آثار آن ها بسیار کوچک می باشد، کاربرد دارد. این روش بزرگنمایی، نتایج بسیار خوبی برای آثار با دانسیته کم (کمتر از 10^3cm^{-2}) مهیا می کند . بنابراین شمارش اثرات، آسانتر و سریعتر انجام می پذیرد. مهمترین عیب این روش، از دست رفتن مشخصات و اطلاعات آثار می باشد، بطوریکه این تکنیک، روش مناسبی برای شمارش آثار با دانسیته بالا (بالتر از 10^3cm^{-2}) بدلیل روی هم افتادن این آثار، نمی باشد. همچنین باید توجه نمود که حضور ناخالصی و آلودگی در آشکارسازهای ردپای هسته ای حالت جامد می تواند ردپاهای مشابه ردپاهای ناشی از تابش پرتوهای گاما ایجاد نماید، بنابراین این روش می تواند آثار زمینه را

افزایش دهد. روش الکتروشیمیایی (ECE) شامل بکارگیری میدان الکتریکی جریان متناوب با فرکانس مناسب در عرض آشکارساز پلاستیکی که بین دو محفظه پر شده از محلول خورش مناسب و از لحاظ الکتریکی کاملاً از هم مجزا شده اند، می باشد. فویل پلاستیکی تابش دیده در فضای بین دو الکتروود قرار می گیرد و یک ولتاژ بالای متناوب در عرض فویل پلاستیکی توسط دو الکتروودی که در محلول الکتروولیت غوطه ورنند، اعمال می گردد. قدرت میدان الکتریکی نوعی در حدود چندین kV/cm در فرکانس چند kHZ می باشد. میدان الکتریکی جریان متناوب بالا، تولید پدیده حرارتی نموده، بطوریکه امکان افزایش آهنگ خورش و همچنین سبب ایجاد پدیده شوک الکترومکانیکی در پلیمر شده و حتی موجبات شکست آن را فراهم می کند. در اولین مرحله از ECE، مهمترین فرایند تشکیل مخروط اولیه براساس مکانیزم توصیف شده در روش خورش شیمیایی می باشد. پس از آنکه اثر مخروطی شکل تشکیل شد، میدان الکتریکی در نوک سوزن هادی می تواند تا چندین برابر بزرگتر از آن چه اعمال شده بود، افزایش یابد. گرادیان فشار بسیار بالای کانونی شده می تواند سبب آغاز پدیده الکتریکی شود، بطوریکه، وقتی با واکنش شیمیایی محلول خورش ترکیب می شود، تولید آسیب بعدی در نوک ردپا می کند. شکل ۱-۶ یکی از مثال های اینگونه آسیب های ایجاد شده توسط پلوتونیم آلفا را در CR-39 نشان می دهد.



شکل ۱-۶: آسیب ایجاد شده توسط پلوتونیم آلفا در CR-39