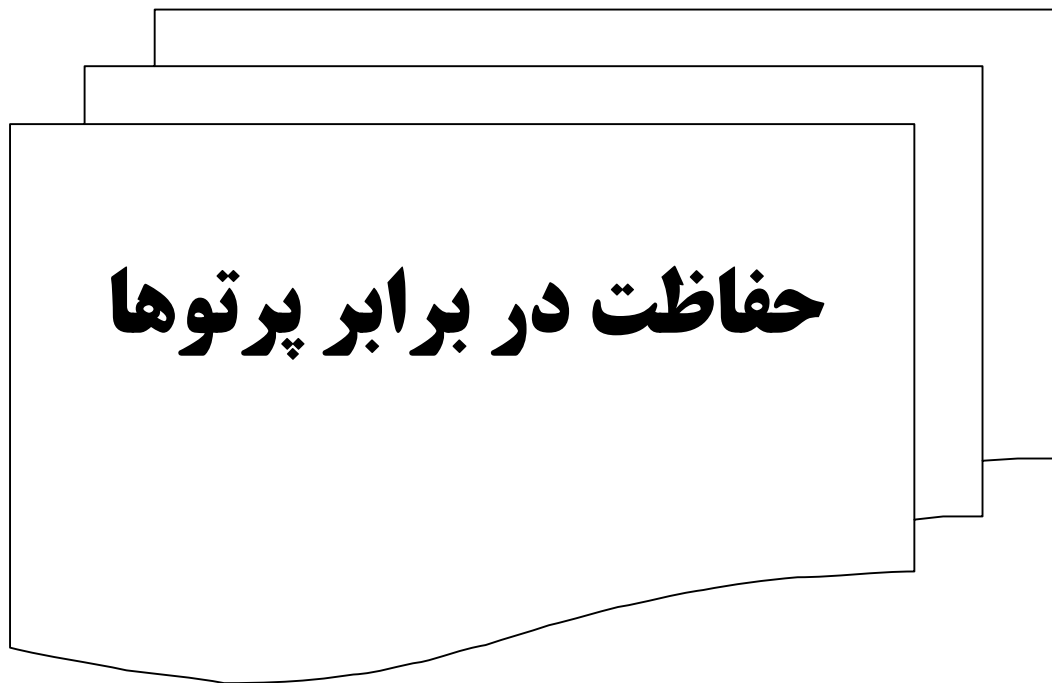


حفاظت در برابر پرتوها



فهرست مطالب

6	فصل اول: مقدمه‌ای بر حفاظسازی
8	فصل دوم: خصوصیات میدان‌های پرتو و چشمه‌ها
8	(1-2) شارش و نرخ شارش (Fluence and Fluence Rate)
11	(2-2) شار (Flow)
14	فصل سوم: اندرکنش پرتوها با ماده (Interaction of Radiation with Matter)
14	(1-3) مفاهیم اولیه:
23	(2-3) انواع سطح مقطع‌ها برای اندرکنش‌های فوتونی:
26	سطح مقطع Klein-Nishina برای پراکندگی غیرهمدوس
39	(3-3) اندرکنش‌های نوترون (Neutron Interactions):
50	(4-3) اندرکنش‌های ذرات باردار (Charged- Particle Infracctions):
61	فصل چهارم: چشمه‌های پرتوی متداول در حفاظسازی
68	(2-4) منابع فوتون‌های گاما
73	(3-4) منابع پرتوهای X
80	فصل پنجم: توابع پاسخ فوتون و نوترون
80	(1-5) کمیت‌های دزیمتری
94	(2-5) کمیت‌های معادل دز (Dose equivalent)
97	(3-5) مفهوم تابع پاسخ پرتوها
98	(4-5) توابع پاسخ موضعی برای اهداف نقطه‌ای
100	(5-5) توابع پاسخ موضعی برای فوتون‌ها:
101	(6-5) توابع پاسخ برای انسان به‌عنوان هدف:
109	فصل ششم: تکنیک‌های ویژه حفاظسازی برای فوتون‌ها
109	(1-6) مفاهیم مقدماتی
112	(2-6) ضریب انباشت (Build up factor):
119	(3-6) مفاهیم مقدماتی طراحی حفاظ
122	(4-6) فاکتورهای تضعیف A_F برای دسته پرتوهای فوتونی:
125	(6-6) مفهوم آلبدو (Albedo Concept):
125	(7-6) مفهوم جویبارش (Striming):
126	(8-6) مفهوم آسمان تاب (Skyshine):
127	مجموعه تست
131	پاسخنامه
135	مجموعه تست
139	پاسخنامه
140	سوالات تشریحی:

فصل اول: مقدمه‌ای بر حفاظسازی

از قرن بیستم تا کنون به‌کارگیری پرتوهای گوناگون و رادیواکتیویته در صنایعی مانند تولید سوخت و تصویربرداری، پرتودرمانی و ... اجتناب‌ناپذیر است. اما حفاظت در برابر آثار تخریبی و بیولوژیک آنها نیز از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. برای حفاظت در

برابر این پرتوها می‌توان سه راه کار اساسی را به‌کار برد که عبارتند از:

(1) افزایش فاصله‌ی شیء مورد حفاظت تا چشمه پرتو

(2) کاهش مدت زمان پرتوگیری شیء مورد حفاظت

(3) استفاده از حفاظتی که قابلیت ممانعت از نفوذ پرتوها را به مناطق حفاظت شده داشته باشد.

به‌دلیل تغییر شرایط و نیز ضرورت حضور افراد یا دستگاه در محیط‌ها یا در یک جایگاه خاص همواره نمی‌توان موارد یک و دو را رعایت کرد. البته باید قوانین خاصی که هر یک از ارگان‌های رسمی برای فاصله‌ی شخص از چشمه یا مدت زمان پرتوگیری یا میزان دز مجاز ارائه کرده‌اند، به‌کار بست. ولی گاهاً اعمال این موارد شرط لازم برای حفاظت در برابر پرتوهاست و کافی نیست. اما مورد سوم که بحث اصلی این مجموعه است را می‌توان به‌عنوان عامل بازدارنده‌ای در مقابل پرتوها در نظر گرفت. علم طراحی و آنالیز حفاظ به بررسی شرایط چشمه‌ها و نوع پرتوها و اندرکنش‌های متفاوت آنها با ماده می‌پردازد و در نهایت این بررسی‌ها منجر به استفاده از یک یا چند لایه‌ای از مواد مناسب می‌شود که سد خوبی در برابر پرتوها ایجاد می‌کند. ابتدا به تعریف جامعی از حفاظ می‌پردازیم.

حفاظ از یک یا چند لایه ماده تشکیل شده است که بدین ترتیب دیواره‌ای را بین چشمه‌های پرتوهای یون‌ساز و شیء مورد حفاظت ایجاد می‌کنیم تا میزان تابش پرتوها به شیء مورد حفاظت کاهش یابد. در حفاظ مقابل پاره‌ای از پرتوهای کم‌نفوذ می‌توان کاملاً پرتوگیری را به صفر رساند ولی در پرتوهایی که دارای برد بی‌نهایت هستند و عمق نفوذ زیادی دارند، این لایه‌های حفاظتی می‌تواند به‌عنوان تضعیف‌کننده عمل نماید.

شیء مورد حفاظت تنها انسان نیست چرا که در بعضی مواقع می‌خواهیم از یک دستگاه یا یک قطعه الکترونیکی محافظت نمائیم. به‌طور مثال دیواره ماهواره‌ها از ترکیباتی باید ساخته شود که در مقابل پرتوهای کیهانی مقاومت بالایی داشته باشد و در ضمن مانع نفوذ این پرتوها به قطعات الکترونیکی داخل سیستم شود.

آنچه که در علم طراحی و آنالیز حفاظ باید مورد توجه قرار گیرد، آگاهی از چگونگی تولید پرتوها و منابع مختلف مولد پرتو، ساختار هندسی پرتوها چگونگی اندرکنش پرتوها با ماده، چگونگی تغییرات میکروسکوپی ناشی از اندرکنش پرتوها با ماده و همچنین تأثیر ماده بر تعداد و راستای پرتوهای گوناگون می‌باشد.

برای پاسخ به چگونگی‌های فوق‌الذکر کمیت‌های گوناگونی تعریف شده‌اند که باید در هر مرحله اندازه‌گیری شوند. برای این

کمیت‌ها مقادیر مرجعی نیز در نظر گرفته شده تا با مطابقت مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر معلوم اولاً میزان خطاها کاهش یابد و دوم این‌که استانداردهای حفاظت در برابر پرتوها نیز رعایت گردد تا آخرین حد حفاظت تأمین گردد.

کمیت‌های رسمی متفاوتی برای حفاظت در برابر پرتوها قوانین و توصیه‌هایی ارائه نموده‌اند. از جمله

- British X-Ray and Radium protection committee (1921)
- International Commission on Radiological Units and measurements (ICRU)
- International Commission on Radiological Protection (ICRP)
- Environmental Protection Agency (EPA)

مشخصات چند مؤسسه معروف حفاظت در برابر پرتوها نیز به‌شرح زیر است:

- National Nuclear Data Center, Bldg. 197D, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000. Provides basic cross-section and nuclear data through the internet at <http://www.nndc.bnl.gov>.
- International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria. Provides many publications and, through its Nuclear Data Section, provides basic nuclear data and reports. The Nuclear Data Section may be reached through the internet at <http://www.iaea.or.at>.
- OECD Nuclear Energy Agency Data Bank, 12, boulevard des Iles, 92120, Issy les Moulineaux, France. Provides nuclear data and other shielding information through the Data Bank. It may be reached through the internet at <http://www.nea.fr/html/databank/>.
- National Institute of Standards and Technology, US Dept. of Commerce, Gaithersburg, MD 20899-0001, through its Physics Laboratory issues reports, programs and nuclear and atomic data. Reachable through the internet at URL <http://physics.nist.gov>.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), at 7910 Woodmont Avenue, Suite 800, Bethesda, MD 20814-3098, issues various guidelines and recommendations for the United States. It may be reached through the internet at <http://www.ncrp.com>.
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), at 7910 Woodmont Avenue, Suite 800, Bethesda, MD 20814-3098, issues international shielding and dosimetry guidelines and recommendations. It may be reached through the internet <http://users.prole.com/icru/index.html>.
- The German Institute of Radiation Protection, an institute of the Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF), provides shielding and dosimetry reports. It may be reached at Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Neuherberg, Germany, or at the www URL <http://www.gsf.de/englisch/index.html>.

با رجوع به آدرس‌های اینترنتی مذکور و نیز کتابخانه انرژی اتمی ایران می‌توان اطلاعات جامع و وسیعی را در زمینه حفاظت در

برابر پرتوها فراهم آورد.

فصل دوم: خصوصیات میدان‌های پرتو و چشمه‌ها

عبور پرتوهای یون‌ساز مستقیم و غیرمستقیم از ماده و برخورد پرتوها با آن در این بحث مورد توجه قرار دارد. پرتوهایی که به‌طور مستقیم باعث یونش در ماده می‌شوند، پرتوهای باردار می‌باشند و پرتوهایی که به‌طور غیرمستقیم موجب یونش ماده می‌شوند، ذرات بدون بار هستند مانند فوتون‌ها و نوترون‌ها که برخورد آن‌ها با ماده ذرات باردار تولید می‌کند.

به‌طور کلی میدان تشعشع یا میدان پرتو (Radiation Field) به ذرات و خط‌سیر آن‌ها در قسمت‌هایی از فضا و نواحی آن‌ها اطلاق می‌شود. چه این بررسی در یک بازه زمانی باشد و یا در یک لحظه صورت گیرد. خصوصیات میدان پرتو برای هر ذره با لحاظ کردن تغییرات خاص توزیع انرژی ذره و جهت آن حاصل می‌گردد. در موارد خاص مانند آزمایشات مربوط به پراکندگی نوترون، خصوصیاتی مانند اسپین نیز ممکن است مورد نیاز باشد.

آن‌چه که برای ما حائز اهمیت است، چگونگی مشخص شدن میدان پرتو در یک ناحیه از فضا است که آن را شارش (Fluence) و چگونگی تعیین میدان پرتو در یک محدوده یا مرزها که به آن شار ذره (Flow) گفته می‌شود. شارش و شار یا فلوننس و فلو کمیت‌های رادیومتری¹ هستند و با کمیت‌های دوزیمتری² متفاوت می‌باشند. خصوصیات اندازه‌گیری شده به‌طور کلی در مواقع مختلف دارای تغییر هستند به‌طوری که این تغییرات به تعداد مسیرهای منحصر به فرد ذره بستگی دارد. همچنین اندازه‌گیری مستلزم دانستن حجم نهایی یا نواحی مرزی نیز می‌باشد. با روش‌های مونت کارلو نیز می‌توان فلو و فلوننس را تعیین کرد.

شارش یک کمیت نقطه‌ای است و به‌صورت تابعی نقطه‌ای تعریف می‌شود که به موقعیت اولیه ورودی‌ها بستگی دارد و باید مقدار مورد انتظار با احتساب توزیع آماری به‌صورت یک متغیر تصادفی تعیین گردد. این شرایط موجب می‌شود که فلو، فلوننس یا کمیت دوزیمتری را بتوان در یک نقطه از فضا تعیین کرد. اما هر اندازه‌گیری تنها باید یک برآورد از مقدار مورد انتظار را به ما بدهد که این هم از طریق برونپایی (extrapolation) در هر ناحیه از فضا میسر می‌گردد.

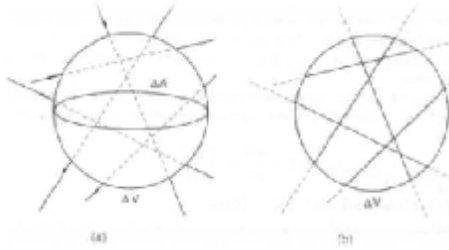
(1-2) شارش و نرخ شارش (Fluence and Fluence Rate)

یک راه اصولی برای اندازه‌گیری شدت میدان پرتو یا تشعشع این است که آن را برای تعدادی از ذرات که به یک حجم معین وارد می‌شوند، محاسبه کنیم. برای تعیین شارش تعداد ذرات ΔN_p که در بازه‌ای از زمان به عریض‌ترین سطح مقطع یک کره (دایره عظیمه کره) آن ΔA نفوذ می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود که در واقع با این کار شارش متوسط به‌دست می‌آید و اگر از آن حد بگیرییم، مقدار آن را در هر نقطه از فضا می‌توانیم تعیین کنیم. و بدین ترتیب در هر نقطه از فضا می‌توان منحنی آن را برحسب

¹ Radiometric quantities

² Dosimetric quantities

مکان رسم نمود.



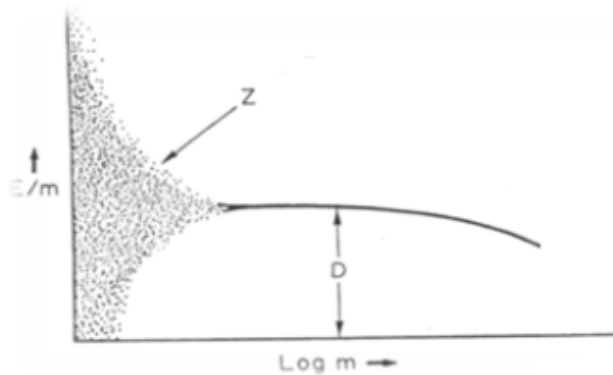
تصویر 2-1 در (a) تعداد ذراتی که به سطح برخورد می‌کنند، مورد توجه قرار گرفته است و در (b) تعداد ذرات داخل کره مدنظر است.

اگر حد بگیریم یعنی سطح دایره عظیمه را مرتباً کوچک و کوچک تر کرده تا به مقدار حدی صفر میل کند:

$$\Phi \equiv \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta N_p}{\Delta A} \right)$$

واحد شارش $[1/\text{cm}^2]$ است. برای رسم منحنی $\frac{\Delta N_p}{\Delta A}$ را برحسب Δl ، از آن جا که ما با یک تعداد معدودی ذره سروکار داریم، هر چه ابعاد کوچک تر می‌شود، آمار کم شده یعنی تعداد ذرات کم تر شده و خطا هم افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر با حد گرفتن، خطا افزایش می‌یابد لذا برای این که یک تابع نقطه‌ای داشته باشیم، نقاطی را مبنا قرار می‌دهیم که تغییرات کمی وجود دارد چرا که تغییرات اندک، خطای کمی نیز ایجاد می‌کند.

این نقاط را به‌طور پیوسته به هم وصل کرده و در نقاط انتهایی منحنی که اندازه کاهش یافته، عمل برون‌یابی انجام می‌شود. مقدار شارشی است که به مرکز کره نسبت داده می‌شود در واقع همان مقدار حدی و تابع نقطه‌ای است. اما در عمل ما هیچ ابزار دزیمتری نداریم که مقدار را نقطه‌ای نشان بدهد ولی ما می‌توانیم ابزار را کوچک کنیم تا به آن نزدیک شویم. هرچه شارش بیش تر باشد، این نقاط به صفر نزدیک تر می‌شود و هرچه شارش کم تر شود، از همان نقاط دور دچار مشکل نوسانات میرا می‌شود. تصویر (2-2) گویای این مطلب می‌باشد.



تصویر (2-2) چگالی انرژی به صورت تابعی از جرم نشان داده شده است. محور افقی ناحیه‌ای است که دز جذبی را می‌توان در طی یک اندازه‌گیری منفرد تخمین زد.

تعریف دیگری از شارش در معادله ترابرد بولتزمن استفاده می‌شود. در حالی که برای اندازه‌گیری شارش از تعریف اول استفاده می‌کنیم. ناگفته نماند همه این تعاریف قابل تبدیل به یکدیگر هستند.

لازم به ذکر است که در هنگام محاسبه شارش در حقیقت آن را در یک بازه زمانی مثلاً t_1 تا t_2 اندازه‌گیری می‌کنیم و در این فاصله ذراتی که به کره برخورد می‌کنند، را به حساب می‌آوریم لذا برای ادامه کار باید همان فاصله زمانی قبلی را استفاده کنیم. به‌عنوان یک تعریف جامع‌تر و سودمندتری از شارش می‌توان آن را با جمع تک‌تک پاره‌خط‌های مسیر در حجم کل کره برآورد کرد که بیش‌تر در روش مونت کارلو استفاده می‌شود چرا که در این روش ما ذرات را دنبال می‌کنیم. به‌گونه‌ای که مختصات دو نقطه را داریم و طول فاصله بین دو نقطه را محاسبه می‌نمائیم.

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

با این تعریف فرمول قبل به صورت زیر در می‌آید:

$$\Phi \equiv \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\sum_i S_i}{\Delta V} \right) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\text{sum of internal track segments lengths}}{\Delta V}$$

اگر مقدار ΔV را بزرگ در نظر بگیریم، Φ مقدار متوسطی است که به آن حجم نسبت داده می‌شود. چون تابع نقطه‌ای است، در واقع روی حجم مذکور متوسط‌گیری صورت می‌گیرد و آن قدر مقدار متوسط را کوچک کرده و حد می‌گیریم تا به مقدار نقطه‌ای دست پیدا کنیم. در این تعریف ما تمام مسیرهایی را که ذرات داخل حجم طی می‌کنند، جمع می‌زنیم و بر حجم تقسیم می‌کنیم. مزیت این تعریف آن است که اگر حجم مورد بررسی دارای ماده‌ای باشد، و در نقاطی از حجم کره این track lengths ها یا پاره‌خط‌ها در اثر اندرکنش ذره با ماده قطع شوند و مسیر دارای انحراف شود، باز هم جمع بسته می‌شود. در روش قبلی تنها پرتویی که برخورد می‌کرد، محاسبه می‌گشت ولی این‌جا سهم پراکندگی هم منظور می‌شود.

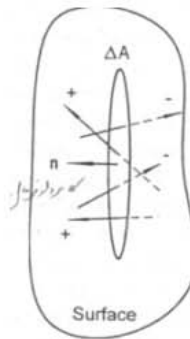
برای محاسبه میزان اندرکنش‌ها، فلوننس را در سطح مقطع ضرب می‌کنیم که در این فرمول خودبه‌خود این موضوع در نظر گرفته می‌شود. مزیت دیگری که این تعریف دارد، آن است که از شکل هندسی کره مستقل است. به عبارت دیگر برای هر شکل هندسی قابل استفاده است و برای آن شکل خاص با ابعاد معین شار متوسط حساب کنیم. بنابراین بیش‌تر برای محاسبه شار متوسط استفاده می‌شود.

(2-2) شار (Flow)

یک کمیت مورد اندازه‌گیری دیگری از میدان پرتو فلو (Flow) است که بیانگر تعداد ذراتی که از یک سطح مقطع عبور می‌کنند و البته جهت‌گیری آن‌ها هم لحاظ می‌گردد. مقدار فلو می‌تواند هم مثبت و هم منفی باشد. برای اندازه‌گیری این کمیت اگر یک سطح را در نظر بگیریم، جایی که بردار نرمال از سطح خارج شود به‌طور قراردادی مثبت و طرف دیگر آن منفی در نظر گرفته می‌شود و برای ذراتی که هم‌جهت با بردار نرمال از سطح خارج می‌شوند، دارای جهت مثبت و خلاف جهت آن را منفی در نظر گرفته و با جمع برداری تعداد ذرات از یک سطح مقطع مقدار فلو به‌دست می‌آید:

$$J_n \equiv \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta M_p}{\Delta A} \right)$$

و نرخ فلو هم همانند روابط نرخ شارش قابل حصول است. به‌طور کلی در مفهوم شارش محیط مستقل از جهت‌های نفوذ ذرات است در حالی که در فلو جهت‌گیری محیط تعریف شده است.



تصویر (3-2) چگونگی محاسبه شار و بردار نرمال در یک سطح مقطع

در سال 1971، ICRU تعریف دیفرانسیلی فلوننس را به‌صورت زیر اعلام کرد:

$$\Phi \equiv \left(\frac{dN_p}{dA} \right)$$

به گونه‌ای که تحلیل جزئیات مقادیر مورد انتظار با احتساب کمیات تصادفی متناظر و توزیع احتمالی آن‌ها قابل حصول است. در بسیاری از کاربردها از این احتساب می‌توان صرف‌نظر کرد و همه کمیت‌ها را غیرتصادفی و قطعی به‌شمار آورد. نرخ شارش یا چگالی شار (flux density) برای تعدادی از ذرات که وارد یک کره می‌شوند یا مجموع تمام پاره‌خط‌های مسیرهایی که طی می‌کنند، در واحد زمان به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi \equiv \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) = \left(\frac{d^2 N_p}{dA dt} \right)$$

برای این فرمول هم باید مشکلات قبل حدی را در نظر بگیریم اگر dt خیلی کوچک باشد، $d\Phi$ قابل تشخیص نیست. لذا بهتر است در تجربه Δ صورت و مخرج را حساب کرده و مقدار آن را کوچک کرده و آن‌قدر ادامه دهیم تا حالت حدی به‌دست آید و سپس همان روند برون‌یابی صورت می‌پذیرد اما در تعریف ریاضی از مفهوم دیفرانسیل استفاده می‌کنیم. تعاریف مختلفی برای نرخ شارش یا چگالی شار داریم و این‌که کدام‌یک را استفاده کنیم به نوع داده بستگی دارد. یک روش محاسبه شار تعریف نرخ شارش ذرات منوانرژتیک در یک نقطه است به گونه‌ای که چگالی ذرات در آن نقطه و سرعت ذرات در نظر گرفته می‌شوند. برای ذراتی که در این سرعت پخش می‌شوند، نرخ فلوئنس کل یا شار با انتگرال‌گیری از چگالی تعداد ذرات و سرعت به‌دست می‌آید:

$$\phi \equiv \int_0^{\infty} n(V) V dV$$

V سرعت ذرات است و برای هر ذره شار تعریف می‌کنیم. مثلاً می‌گوئیم شار فوتون‌ها، شار الکترون‌ها، ... این‌ها شار ذره هستند. در مفاهیم قبل آن‌جایی که ΔN_p تعریف کردیم، منظور از p ذره بود. برای ما فوتون‌ها هم ذره هستند. در انرژی‌هایی در حد keV و بالاتر از آن، رفتار امواج الکترومغناطیس یا فوتون‌ها هم ذره‌ای تلقی می‌شوند و به آن‌ها دید ذره‌ای داریم. در این‌جا ما یک نوع ذره خاص داریم که با سرعت V در حال حرکت است و چگالی آن در واحد حجم یعنی تعداد ذراتی که مدنظر ماست عبارتند از:

$$n(V)dV$$

$n(V)dV$ تعداد ذراتی از نوع بخصوص هستند که سرعت آن‌ها بین V و $V + dV$ است در واحد حجم. پس $n(V)$ تعداد ذرات با سرعت V در واحد حجم است.

واحد $n(V)dV$ ، $[1/cm^3]$ است و وقتی در V ضرب می‌شود، $[1/cm^2 \cdot s]$ به‌دست می‌آید که واحد شار است.

البته این محاسبات تا مادامی معتبر هستند که ما انرژی‌های مختلف نداریم اما در جایی که پراکندگی داریم، پس تغییر انرژی هم

داریم و اگر بخواهیم فلوننس را برای انرژی‌های مختلف به دست آوریم، باید انرژی‌ها را دسته‌بندی کرده و گروه آن‌ها را در محاسبات منظور کنیم. لذا برای هر دسته انرژی یک Φ حساب کرده و در نهایت آن‌ها را با هم جمع می‌کنیم. کمیت دیگری که حائز اهمیت است، چگالی شار انرژی یا شارش انرژی است. اگر شارش را در انرژی پرتوها ضرب کنیم، خواهیم داشت:

$$\varphi_E = \Phi * E$$

حال اگر پرتوها تک انرژی نباشند:

$$\varphi = \int \Phi_E(E) E dE = \Phi_g \bar{E}_g$$

بسیاری از مواقع برای ما انرژی کل مطرح نیست. ممکن است ما Φ_g را لازم داشته باشیم لذا باید مقدار φ را در یک گروه انرژی محاسبه کنیم. گروه انرژی در نظر گرفته می‌شود و بعد ما انتگرال روی یک گروه انرژی می‌گیریم. بسیاری از کمیت‌هایی را که ما اندازه‌گیری می‌کنیم، به انرژی وابسته هستند. لذا ما انرژی‌ها را دسته‌بندی می‌کنیم. اگر تغییرات انرژی اندک باشند، تعداد گروه‌ها را کم‌تر کرده و اگر این تغییرات شدید باشند، دسته‌ها را بیش‌تر می‌کنیم. اگر تعداد دسته‌ها زیاد باشد، می‌توان از متوسط‌گیری انرژی در یک دسته استفاده کرد. بعضی مواقع می‌توان از تک گروهی استفاده کرد و به این ترتیب تقریب زد:

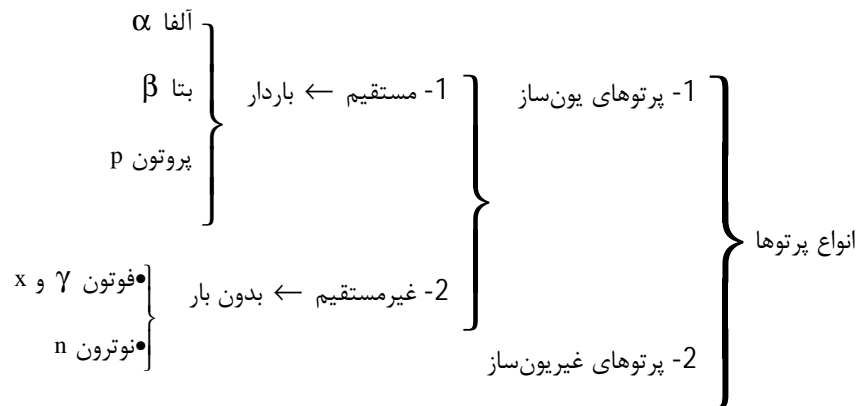
$$\varphi \equiv \Phi_g \bar{E}_g$$

همه این کمیت‌ها حالت جهت‌دار دارند که ما آن‌ها را بررسی نمی‌کنیم.

فصل سوم: اندرکنش پرتوها با ماده (Interaction of Radiation with Matter)

3-1) مفاهیم اولیه:

در این فصل به بررسی اندرکنش¹ یا چگونگی برخورد ذره یا پرتو با ماده می‌پردازیم. اما پیش از آن باید به این مطلب اشاره کنیم که انواع تشعشع را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:



پرتوهای یون‌ساز²: این پرتوها نهایتاً موجب یونش و برانگیزش اتم‌های محیط می‌شوند و این عمل یا از طریق ذرات باردار یا چون آلفا و بتا به طور مستقیم صورت می‌گیرد یا به طور غیرمستقیم توسط پرتوهای بدون باری همچون فوتون‌ها و نوترون‌ها انجام می‌شود.

پرتوهای غیر یون‌ساز: در این گونه تشعشعات انرژی پرتو در حدی نیست که الکترون را جدا کند و فقط موجب ارتعاش آن می‌شود و منجر به یونش و برانگیزش در سطح اتم نمی‌گردد که به عنوان مثال می‌توان لیزرهای کم‌توان، مادون قرمز و اشعه‌ی ماکروویو را نام برد. در این مجموعه این گونه پرتوها مورد بحث قرار نمی‌گیرند.

انواع اندرکنش‌ها در مورد تشعشعات یون‌ساز مطرح می‌گردند. اندرکنش‌ها ممکن است با الکترون‌ها و یا با هسته‌ها انجام شود. در انواع اندرکنش نوترون‌ها با الکترون‌ها و یا نوترون‌ها با هسته‌ها باید به این نکته توجه کرد که برای الکترون‌های آزاد و نیز هسته‌هایی که کم‌تر درگیر شبکه‌ی کریستالی یا مولکولی می‌باشند، احتمال اندرکنش بیش‌تر است. البته این احتمال به مقدار انرژی فوتون اولیه و نوع ماده نیز بستگی دارد.

¹ Interaction
² Ionizing radiation

$$\left. \begin{array}{l} 1- جذب \\ 2- پراکندگی \end{array} \right\} \text{انواع اندرکنش}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1- الاستیک یا کشان \\ 2- غیرالاستیک یا ناکشان \end{array} \right\}$$

جذب: در اندرکنش‌هایی که ماهیت جذبی دارند، نوع ذره‌ی فرودی و ذره‌ی حاصل از اندرکنش متفاوت هستند. یعنی هویت ذره‌ی فرودی در اثر اندرکنش کاملاً تغییر می‌کند مثلاً در پدیده‌ی فتوالکتریک¹ فوتون γ یا x پس از اندرکنش به فتوالکترون تغییر ماهیت می‌دهد. لذا ما پدیده‌ی فتوالکتریک را از نوع جذبی تلقی می‌کنیم. در پدیده‌ی جذب قوانین پایستگی اندازه حرکت و انرژی همچنان پابرجاست. در اندرکنش جذب سهمی از انرژی برای برانگیختگی هسته به کار رفته و سهم دیگر آن به صورت انرژی انتقالی²، ارتعاشی³ یا چرخشی⁴ ظاهر می‌شود.

لازم به ذکر است که در مورد نوترون‌ها نیز پدیده‌ی جذب صورت می‌گیرد که گیراندازی نوترون (Neutron Radiative Capture) از انواع آن است.

پراکندگی: در این نوع اندرکنش تنها انرژی ذره‌ی فرودی تغییر می‌کند. پراکندگی به دو صورت کشسان و ناکشسان می‌باشد. در پراکندگی کشسان، برانگیختگی هسته رخ نداده و تنها موجب پس‌زنی هدف می‌گردد. لذا انرژی جنبشی پرتوی فرودی بین هدف پس‌زده شده⁵ و پرتوی خروجی تقسیم می‌شود. می‌توان از اقسام آن در مورد فوتون‌ها به پراکندگی تامسون و رایلی اشاره کرد که در ادامه‌ی بحث پیش‌تر به آن می‌پردازیم.

در پراکندگی ناکشسان، انرژی پرتوی فرودی به اندازه‌ای است که توانایی غلبه بر انرژی پیوندی ذرات اتم را دارد. بنابراین سهمی از انرژی پرتوی فرودی صرف جداسازی الکترون شده و مابقی این انرژی بین الکترون و فوتون خروجی تقسیم می‌گردد. (البته اگر پراکندگی فوتون را از نوع کمپتون⁶ در نظر بگیریم.)

در این فصل به معرفی ضریب اندرکنش می‌پردازیم و در زیربخش‌های بعدی، سطح مقطع‌های مربوط به اندرکنش فوتون‌ها با ماده، نوترون‌ها و نیز ذرات باردار را مطرح می‌کنیم.

¹ Photoelectric
² translational
³ Vibration
⁴ rotational
⁵ recoil
⁶ Compton

3-1-1) ضریب اندرکنش (Interaction Coefficient)

همواره اندرکنش پرتوها با ماده ماهیت آماری دارد. بنابراین برای محاسبه‌ی آن‌ها باید قوانین احتمالات را در نظر گرفت. توجه به این نکته ضروری است که حرکت پرتو فرودی در ماده، ممکن است منجر به جذب شود یا این که از ضخامت ماده عبور کند. در این صورت اگر یک باریکه پرتو فرودی داشته باشیم، به دلیل جذب بعضی از پرتوها، باریکه پس از عبور از ضخامت ماده تضعیف شده و تعداد پرتوهای آن کاهش می‌یابد. البته این میزان کاهش به انرژی باریکه‌ی فرودی، نوع آن و نیز نوع ماده و اندرکنش‌هایی که در ماده صورت گرفته است، بستگی دارد. تک انرژی بودن یا چند انرژی بودن باریکه هم باید لحاظ گردد. برای بررسی این حالت آماری ضریب تضعیف تعریف می‌کنند.

ضریب تضعیف عبارتست از کسری از باریکه پرتو که در طی گذار از واحد ضخامت ماده‌ی جاذب ناپدید می‌شود و معادله‌ی معرف آن چنین است:

$$\mu = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{N \Delta x}$$

که در آن $\frac{\Delta N}{N}$ کسری از پرتو است که در طی عبور از ماده‌ی جاذبی با ضخامت Δx ناپدید می‌شود. (μ ضریب تضعیف خطی است)

ضرایب تضعیف خطی هم برای فوتون‌های x و γ و هم برای نوترون‌ها تعریف می‌شود و به عوامل زیر بستگی دارد:

- | | | |
|---|---|------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1- نوع و انرژی ذره‌ی فرودی 2- نوع اندرکنش 3- ترکیب و چگالی محیطی که در آن اندرکنش روی داده است. | } | عوامل مؤثر در ضریب تضعیف خطی |
|---|---|------------------------------|

عامل بسیار مهمی که در μ نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، چگالی اتم‌های یا الکترون‌های هدف در ماده N می‌باشد و عامل دیگری که مستقل از N می‌باشد و به آن سطح مقطع میکروسکوپی نیز گفته می‌شود، σ است. در این صورت به ضریب تضعیف خطی سطح مقطع ماکروسکوپی می‌گویند.

σ در واقع سطح مقطعی است که هر هسته در اندرکنش از خود نشان می‌دهد و به آن سطح مقطع مؤثر نیز می‌گویند. پس از مفهوم N می‌توان چنین برداشت کرد که هر چه تعداد سطح‌هایی که در مقدار ماده معین کنار هم چیده شده بیش‌تر باشد و نیز مساحت این سطوح هم بزرگ‌تر باشد، احتمال وقوع اندرکنش بیش‌تر است یا ضریب تضعیف خطی افزایش می‌یابد.

$$\mu = N\sigma$$

برای اثبات $\mu = N\sigma$ تصویر زیر را در نظر می‌گیریم.

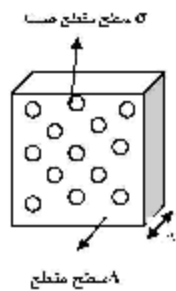
N : تعداد هسته‌ها در واحد حجم

ΔL : ضخامت ماده

A : مساحت کل

V : حجم مورد نظر

$P(\Delta L)$: احتمال اندرکنش در ضخامت ΔL



تصویر (1-3)

Z فرض ΔL آن قدر کوچک است که هسته‌ها در یک ردیف پشت سرهم قرار نمی‌گیرند.

$$P(\Delta L) = \frac{\text{سطح مقطع اتم یا هسته} \times \text{تعداد هسته‌ها}}{A}$$

$$P(\Delta L) = \frac{(N \times \Delta V) \times \sigma}{A}$$

$$P(\Delta L) = \frac{(N \times A \times \Delta l) \times \sigma}{A}$$

$$P(\Delta L) = N \times \Delta l \times \sigma \Rightarrow \frac{P(\Delta L)}{\Delta l} = N\sigma$$

احتمال اندرکنش در واحد طول مسیر است و برابر μ می‌باشد.

در رابطه $\mu = N\sigma$ ، N چگالی اتمی است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$N = \frac{\rho}{A} N_a$$

تعداد هسته‌ها یا اتم‌ها در واحد حجم: $[N] = \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$ و وزن اتمی عنصر = A و $N_a = 6/02 \times 10^{23}$ عدد آووگادرو = N_a
 σ : سطح مقطع میکروسکوپی که واحد آن barn است.

$$1b = 10^{-24} \text{cm}^2 \rightarrow [\sigma] = \text{cm}^2$$

نکات:

در مطالعات مربوط به فوتون‌ها از نماد μ برای ضریب تضعیف خطی استفاده کرده و برای مطالعات مربوط به نوترون‌ها Σ به‌عنوان ضریب تضعیف خطی به کار می‌رود.

$$\Sigma = N\sigma$$

$$(\text{cm}^{-1}) = (\text{cm}^{-3}) \times (\text{cm}^2)$$

مقدار μ به ρ بستگی دارد که از حالت ماده مستقل نیست. مثلاً μ برای آب در حالت‌های مختلف جامد و مایع و گاز متفاوت است. بنابراین جهت استقلال μ آن‌ها را به ρ تقسیم کرده و در جداول به صورت $\frac{\mu}{\rho}$ داده می‌شود که به آن ضریب تضعیف جرمی می‌گویند.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N\sigma}{\rho} = \frac{N_a \rho \sigma}{\rho A} = \frac{N_a}{A} \sigma$$

به σ سطح مقطع میکروسکوپی، سطح مقطع مؤثر و ضریب تضعیف اتمی هم گفته می‌شود.
 برای محاسبه μ معمولاً عدد آووگادرو را به صورت 0.602×10^{24} در نظر می‌گیرند تا با $1 \text{ barn} = 10^{-24}$ ساده شود.
 مقدار σ به عوامل زیر بستگی دارد:

- | | |
|--|---|
| 1- انرژی ذره‌ی فرودی (Energy of incident particle) | } |
| 2- ماده متبلور یا کریستالی (Crystalline Material) | |
| 3- جهت‌گیری ذره (Particle direction) | |

3-1-2) احتمال اندرکنش در فاصله x :

اگر ذره‌ای تا ضخامت dx (قبل از آن) اندرکنش نکرده باشد، احتمال آن که به اندازه dx پیش‌روی کند و در همین فاصله اندرکنش کند، معادل است با:

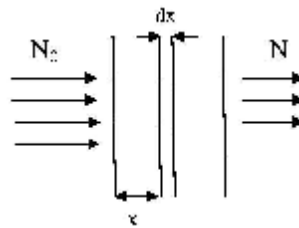
$$\mu dx$$

حال اگر N_0 ذره‌ی باردار فرودی داشته باشیم:

$$dx \text{ احتمال اندرکنش در فاصله } dN' = -N'\mu dx$$

$$\xrightarrow{\text{انتگرال گیری}} \int_{N_0}^N \frac{dN'}{N'} = \int_0^x -\mu dx \quad \rightarrow \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\mu x$$

$$\Rightarrow N = N_0 e^{-\mu x}$$



تصویر (2-3)

بنابراین احتمال عدم اندرکنش در فاصله x برابر است با:

$$P = \frac{N}{N_0} = e^{-\mu x}$$

3-1-3 پویش آزاد:

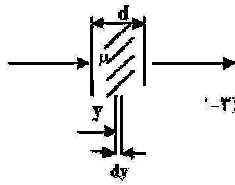
پویش آزاد که برای باریکه تک انرژی است و فقط برای ذرات بدون بار که دارای عمق نفوذ بی‌نهایت هستند، قابل تعریف می‌باشد. برای ذرات باردار برد و توان ایستاندگی تعریف می‌گردد. اگر μ شامل تمام اندرکنش‌هایی باشد که برای ذره‌ی فرودی رخ می‌دهد، خواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{1}{\mu}$$

به پویش آزاد میانگین (Mean Free Path: MFP) گویند.

P اثبات رابطه پویش آزاد: اگر ضخامت زیر را در نظر بگیریم، این ضخامت برابر چندین پویش آزاد است (یعنی آنرا بزرگ فرض می‌کنیم).

$$d \text{ احتمال اندرکنش در ضخامت } d = 1 - e^{-\mu d} = 1 - p(y)$$



تصویر (3-3)

= احتمال اندرکنش بین y و $y + dy$

احتمال آن که در ضخامت dy اندرکنش کرده باشد \times احتمال آن که تا ضخامت dy اندرکنش نکرده باشد

$$= P(y) \times \mu dy$$

$$= e^{-\mu y} \times \mu dy$$

از رابطه فوق انتگرال می‌گیریم، لذا برای پوش آزاد متوسط خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_0^{\infty} y p(y) dy = \int_0^{\infty} y e^{-\mu y} \times \mu dy \times \frac{\mu}{\mu} \\ &= \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} \mu y e^{-\mu y} \mu dy = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} Z e^{-Z} dZ = \frac{1}{\mu} \end{aligned}$$

نکته: همیشه در مقابل فوتون‌ها تضعیف‌کننده داریم نه متوقف‌کننده.

نکته: در این جا فرض کردیم μ ثابت است. اگر μ ثابت نباشد:

$$N = N_0 e^{-\int \mu dx}$$

3-1-4) اندرکنش در واحد حجم:

اگر سطحی به ضخامت dl در نظر بگیریم که دارای مساحت A است و تحت تابش دسته پرتویی به شدت Φ قرار گرفته است.

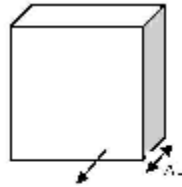
(فرض: شارش یک‌طرفه است)

$$R = (\Phi A) \times (\mu dl) \Rightarrow R = \Phi \mu \Delta V$$

$N = \Phi A$: تعداد ذراتی که به سطح برخورد کرده است

R : تعداد اندرکنش‌ها

احتمال اندرکنش \times تعداد برخوردها = تعداد اندرکنش‌ها



سطح مقطع

تصویر (3-4)

چگالی حجمی اندرکنش‌ها:

$$\frac{R}{\Delta V} = R_v = \Phi \mu$$

نکات:

1. این رابطه قابل تعمیم است. اگر پرتوها از همه‌ی جهات نیز بتابند باز همین رابطه قابل استفاده است.

2. اگر تعداد اندرکنش‌ها در واحد حجم بر واحد زمان داشته باشیم،

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \overset{g}{R}_v = \mu \varphi \quad \text{و} \quad \overset{g}{R}_v = \Sigma \varphi$$

3. Φ اطلاعات میدان پرتو را دارد و μ هم دارای $N\sigma$ است که هم اطلاعات هدف و هم پرتابه را شامل می‌شود. پس اندرکنش در واحد حجم به خصوصیات میدان، هدف و پرتابه بستگی دارد.

4. از آن‌جا که σ به نوع ذره، انرژی آن، نوع هدف و نوع اندرکنش بستگی دارد، بنا بر نوع اندرکنش، سطح مقطع‌های میکروسکوپی (σ) و در نتیجه ماکروسکوپی (μ) مختلفی تعریف می‌شود. نوع اندرکنش در اندیس σ ظاهر می‌شود مثلاً در اندرکنش کمپتون σ_c خواهیم داشت که بعداً به شرح انواع آن می‌پردازیم.

5. سیگما می‌تواند از ابعادی که به جسم هدف نسبت می‌دهیم و یا از طریق محاسبات یا تجزیه به دست می‌آید، کوچکتر یا بزرگتر باشد.

6. تعداد اندرکنش‌ها در واحد جرم:

تعداد اندرکنش‌ها در واحد حجم $R = \mu \Phi V$ و $R_v = \mu \Phi$

$$R_m = \frac{R}{m} = \frac{\mu \Phi V}{\rho V} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \Phi$$

3-1-5) تخمینی از دُز جذبی:

میزان انرژی است که در طی اندرکنش‌های مختلف در واحد جرم جذب می‌شود. با فرض آن‌که تعادل الکترونی برقرار باشد، خواهیم داشت:

$$D_a = R_m \overline{E}_a$$

در برهمکنش‌هایی که صورت می‌گیرد، \overline{E}_a بخشی از انرژی جذبی است که باید روی اندرکنش‌های مختلف متوسط‌گیری انجام شود.

$$D_a = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \Phi \bar{E}_a$$

$$\bar{E}_a = \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right) E$$

به این صورت می‌توان D_a را از اطلاعات اولیه به‌دست آورد.

$$D_a = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right) E \Phi$$

Φ : فلوئنس ذرات اولیه

E : انرژی پرتوهای اولیه

$\frac{\mu_a}{\rho}$: ضریب متوسط جرمی است

نکته‌ی مهم: در مواقعی که تابش ترمزی را از میزان انرژی جذب شده در واحد جرم کسر کنیم، مقدار دقیق‌تر جذب شده

به‌دست می‌آید که در آن به‌جای $\frac{\mu_a}{\rho}$ از $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ استفاده می‌شود و به آن Energy Absorption coefficient گفته می‌شود و در

ادامه، بحث خواهد شد.

واحد D_a به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_a \left[\frac{\text{MeV}}{\text{g}} \right] = \frac{\mu_a}{\rho} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right] \times E [\text{MeV}] \times \Phi \left[\frac{1}{\text{cm}^2} \right] \xrightarrow{\times k=1.602 \times 10^{-10}} [D_a] = \text{Gy} [\text{J} / \text{kg}]$$

2-3) انواع سطح مقطع‌ها برای اندرکنش‌های فوتونی:

بنابر آن چه تاکنون مطرح شد، نوع و انرژی ذره و نوع ماده «هدف» عواملی هستند که تعیین‌کننده نوع اندرکنش می‌باشند. برای

انواع مختلف پرتو اعم از باردار و غیرباردار سطح مقطع‌های متفاوتی تعریف می‌گردد. در این بخش به بررسی سطح مقطع‌های

فوتون می‌پردازیم.

در بحث طراحی و آنالیز حفاظ انرژی فوتون‌ها در محدوده‌ی 10eV تا 10MeV حائز اهمیت هستند. برای این محدوده‌ی انرژی

تنها اثر فتوالکتریک¹، تولید جفت² و پراکندگی کمپتون³، مکانیسم‌های قابل بحث هستند. در محدوده‌ی انرژی‌های بالای فوتون، پدیده‌ی تولید جفت مطرح می‌گردد و در محدوده‌ی انرژی‌های پایین فوتون، پدیده‌ی فتوالکتریک غالب است. پراکندگی کمپتون در محدوده‌های متوسط انرژی بارز می‌شود. به پدیده‌ی کمپتون، پراکندگی غیرهمدوس هم گفته می‌شود. در طراحی حفاظ به‌ندرت پراکندگی همدوس⁴ در نظر گرفته می‌شود. با این وجود در این بخش آن هم توضیح داده خواهد شد.

3-2-1) سطح مقطع تامسون برای پراکندگی غیرهمدوس

(Thomson cross section for incoherent scattering)

پراکندگی غیرهمدوس برای اندرکنش یک فوتون با یک الکترون منفرد مطرح می‌گردد. حال آن‌که در پراکندگی همدوس یک فوتون با دسته یا گروهی از الکترون‌ها وارد اندرکنش می‌شود. فرض می‌شود که پرتو فرودی غیرقطبیده⁵ باشد. برای فوتون در محدوده انرژی صفر، پراکندگی تامسون روی می‌دهد که در آن فوتون با یک الکترون آزاد (الکترون لایه آخر) اندرکنش کرده و پراکنده می‌شود. هنگامی که الکترون هدف در میدان الکترومغناطیسی پرتو فرودی قرار می‌گیرد، با فرکانس میدان مرتعش می‌شود. بنابراین الکترون هدف، پرتو الکترومغناطیسی ثانویه‌ای با همان فرکانس ساطع می‌کند که به نام کاشف الکترون، تامسون نامیده می‌شود. سطح مقطع کل برای هر الکترون از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_T = \frac{8}{3} \pi r_e^2$$

$$r_e: \text{ شعاع کلاسیکی الکترون} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e C^2} = 2.8179 \times 10^{-13}$$

$$e: \text{ بار الکتریکی} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\epsilon = \text{Permittivity} = 8.8542 \times 10^{-14} \text{ F}$$

$$\sigma_T = 6.6525 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$$

برای پرتوهای فرودی غیرقطبیده، سطح مقطع الکترونی تامسون در زاویه‌ی θ_s (پراکندگی) به‌صورت زیر است:

¹ Photoelectric
² Pair production
³ Compton Scattering
⁴ Incoherent
⁵ unpolarized

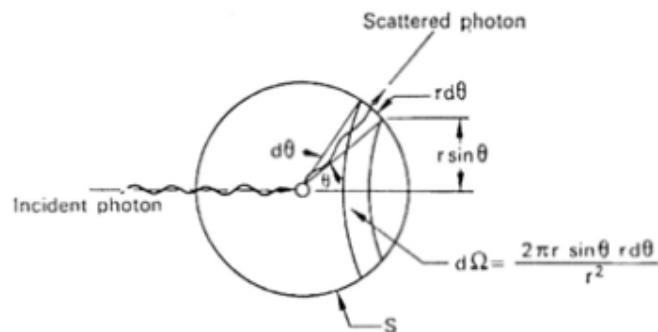
$$\sigma_T(\theta_s) = \frac{1}{2} r_e^2 (1 + \cos^2 \theta_s)$$

نکته: آگاهی از سطح مقطع تامسون به دو دلیل حائز اهمیت است. اول این که: مقدار این سطح مقطع در واقع حد پایین همان سطح مقطع غیرهمدوس کمپتون است. دلیل دوم: همچنین رابطه‌ی $\sigma_T(\theta_s)$ از رابطه‌ی سطح مقطع پراکندگی ریلی¹ به دست می‌آید. (سطح مقطع پراکندگی ریلی، برای اندرکنش فوتون‌ها با الکترون‌های اتم است.)

2-2-3) پراکندگی کمپتون (Incoherent Scattering):

اندرکنش کمپتون از نوع پراکندگی غیرالاستیک یا ناکشسان است که در طی آن، فوتونی با اندازه حرکت $\frac{h\vartheta}{c}$ با یک الکترون آزاد، برخورد می‌کند (حرکت انتقالی به الکترون باید به مقدار زیادی از اندازه حرکت اولیه همان الکترون در داخل اتم بیش‌تر باشد). در طی برخورد، مقداری از انرژی فوتون به الکترون منتقل شده و باعث پس‌زنی (Recoil) آن شده و باقیمانده انرژی فوتون اولیه به صورت فوتون پراکنده با طول موج بلندتری ظاهر می‌شود.

با استفاده از قوانین پایستگی انرژی و اندازه حرکت می‌توان رابطه‌ی زیر را به دست آورد:



تصویر (5-3)

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta_s) \quad 0 < \theta_s < 180^\circ$$

$$E = h\vartheta, \quad \vartheta = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta_s)}$$

$$E'_{\text{Max}} = E, \theta_s = 0 \quad E'_{\text{Min}} = \frac{E}{1 + \frac{2E}{m_0 c^2}}, \theta_s = 180^\circ$$

طول موج فوتون پراکنده شده: λ'

طول موج فوتون فرودی: λ

$$\frac{h}{m_0 c^2} = \lambda_c = \text{طول موج کمپتون}$$

زاویه پراکندگی: θ_s

نکات:

- در زاویه $\theta_s = 0$ تمام انرژی فوتون اولیه به فوتون پراکنده شده، داده می‌شود و سهم انرژی الکترون تقریباً معادل صفر است و در زاویه $\theta_s = 180^\circ$ بیش‌تر انرژی فوتون اولیه به الکترون داده می‌شود، یا پس‌پراکنی (Back scattering) برای فوتون روی می‌دهد و فوتون برگشتی در خلاف جهت فوتون اولیه برمی‌گردد.
- فوتون پراکنده شده ممکن است دوباره اندرکنش کند و احتمال فتوالکتریک آن افزایش می‌یابد. (کاهش انرژی)
- همان‌طور که از روابط زیر نتیجه می‌شود، انرژی پرتوهای فوتون بین فوتون پراکنده شده و الکترون پس‌زده شده تقسیم می‌گردد و نحوه‌ی تقسیم آن در هر انرژی، بستگی به زاویه‌ی پراکندگی دارد.

$$E_e = E - E'$$

$$E_{e_{\text{Max}}} = E - E'_{\text{Min}}, \theta_s = 180^\circ \quad \text{و} \quad E_{e_{\text{Min}}} = 0, \theta_s = 0$$

سطح مقطع Klein-Nishina برای پراکندگی غیرهمدوس

احتمال اندرکنش کمپتون در زوایای مختلف متفاوت است. رابطه‌ی قسمت قبل حاکی از آن است که با افزایش انرژی فوتون اولیه، سهم انرژی فوتون پراکنده شده و الکترون هم افزایش می‌یابد. اما چگونگی توزیع زاویه‌ای پراکندگی و ارتباط آن با سطح مقطع را می‌توان از رابطه‌ی Klein-Nishina نتیجه‌گیری کرد.

اگر فرض کنیم که فوتون فرودی واحد بوده و تنها با یک الکترون آزاد در اتم اندرکنش کمپتون کرده، خواهیم داشت:

$$\sigma_c = Z \sigma_{\text{KN}}$$

σ_{KN} برای یک الکترون

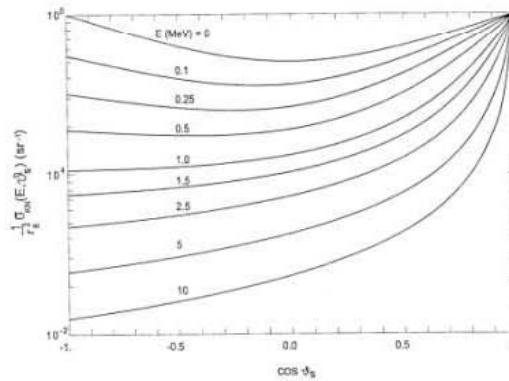
σ_c برای تمام الکترون‌ها

سطح مقطع دیفرانسیلی برای هر الکترون $\sigma_{KN}(E, \theta_s)$ به صورت زیر است:

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \sigma_{KN}(E, \theta_s) = \frac{1}{2} r_e^2 q^2 [1 + q^2 - (1 - \cos \theta_s)]$$

$$q = \frac{E'}{E} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

این سطح مقطع در تصویر (6-3) ترسیم شده است. توجه کنید که با افزایش $\cos \theta_s$ ، سطح مقطع کمپتون افزایش می‌یابد. افزایش $\cos \theta_s$ مستلزم کاهش θ_s می‌باشد.



تصویر (6-3)

نکته: اگر در رابطه‌ی فوق E به سمت صفر میل کند و در پی آن λ به بی‌نهایت میل کند، مقدار q معادل 1 شده و رابطه سطح مقطع تامسون به دست می‌آید.

سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی¹ عبارتند از:

$$\sigma_{ce}(E, \vartheta_s) \equiv \frac{E'}{E} \sigma_c(E, \vartheta_s); \quad \frac{Z}{2} r_e^2 q^2 [1 + q^2 - q(1 - \cos^2 \vartheta_s)]$$

سطح مقطع کل در هر اتم $\sigma_c = Z\sigma_{KN}$ است و چنین به دست می‌آید:

$$\sigma_c(\lambda); \quad Z\sigma_{KN}(\lambda) = 2Z\pi \int_{-1}^{+1} d(\cos \vartheta_s) \sigma_{KN}(\lambda, \vartheta_s)$$

$$= \pi Z r_e^2 \lambda \left[(1 - 2\lambda - 2\lambda^2) \ln \left(1 + \frac{2}{\lambda} \right) + \frac{2(1 + 9\lambda + 8\lambda^2 + 2\lambda^3)}{(\lambda + 2)^2} \right]$$

در حالت کلی برای پدیده‌ی کمپتون داریم:

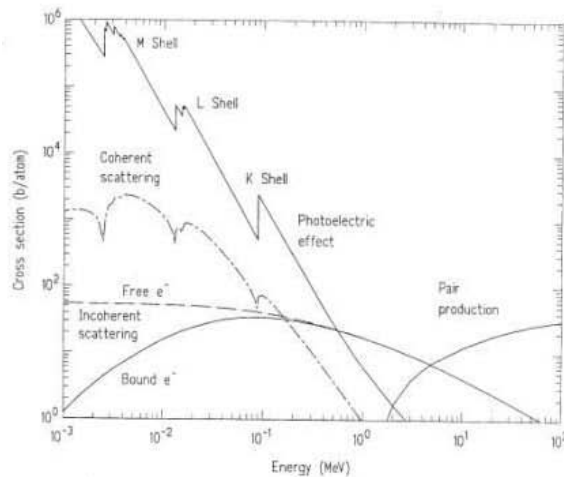
$$\mu_c = N\sigma_c = \frac{\rho N_a}{m} Z\sigma_{KN} \Rightarrow \frac{\mu_c}{\rho} = \frac{N_a Z}{m} \sigma_{KN}$$

$$\sigma_c = Z\sigma_{KN}$$

3-2-3) پراکندگی همدوس (ریلی) (Coherent (Reyleigh) Scattering):

در پراکندگی ناهمدوس مانند کمپتون، فوتون با یک الکترون منفرد اندرکنش می‌کند در حالی که در پراکندگی همدوس فوتون با گروهی از الکترون‌ها وارد اندرکنش می‌شود. از آنجا که در اندرکنش ریلی انرژی فوتون فرودی تنها صرف پس‌زنی کل اتم می‌شود، مقدار انرژی که فوتون از دست داده، ناچیز است و با زاویه بسیار کوچکی پراکنده می‌شود.

برای مثال، برای فوتون‌های 1 MeV که با اتم‌های آهن اندرکنش همدوس کرده‌اند، 75% از فوتون‌ها با زاویه کم‌تر 4 درجه پراکنده شده‌اند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، سطح مقطع پراکندگی کوهنت بسیار بیش‌تر از غیرهمدوس است و این مسئله در مورد فوتون‌های کم‌انرژی‌تر بیش‌تر بارز است. بنابراین سطح مقطع پراکندگی همدوس با کاهش انرژی و افزایش عدد اتمی Z افزایش می‌یابد.



تصویر (3-7) مقایسه انواع اندرکنش از نظر سطح مقطع برای سرب

لازم به ذکر است که به دلیل تأثیر کم بر روی انرژی فوتون و راستای آن و همچنین این‌که این سطح مقطع کم‌تر از سطح مقطع مربوط به فتوالکتریک است، معمولاً در محاسبات مربوط به طراحی حفاظ از آن صرف‌نظر می‌کنند.

این سطح مقطع از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_T(E, \theta_s) = \frac{1}{2} r_e^2 (1 + \cos^2 \theta_s) [F(x, z)]^2$$

$[F(x, z)]^2$ فاکتور شکل اتم¹ است که در جداول آمده است.

4-2-3 اثر فتوالکتریک (Photoelectric Effect):

اندرکنش فتوالکتریک از نوع جذبی است و در خلال آن فوتون با الکترون مداری (مقید) اندرکنش می‌کند. در این فرآیند فوتون تمام انرژی خود را به الکترون مداری داده و آن را به بیرون پرتاب می‌نماید. به الکترون آزاد شده در اثر فتوالکتریک، فتوالکتریک گفته می‌شود. در اثر این اندرکنش اتم برانگیخته می‌شود و در هنگام برانگیختگی، اشعه‌ی x یا الکترون اوژه تولید می‌کند که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم.

برای بروز این پدیده باید انرژی فوتون کم‌تر از انرژی پیوندی (E_b) الکترون نباشد. برای فوتون‌های با انرژی $h\nu > E_b$ احتمال برهمکنش با افزایش ($h\nu$) کاهش می‌یابد، یعنی این‌که به‌ازای انرژی فوتون برابر با انرژی پیوندی الکترون، این احتمال بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت.

در هسته‌های سنگین، بیش از 80% برخوردهای اولیه با لایه K اتفاق خواهد افتاد و هنگامی که $h\nu < E_k$ باشد، انرژی پیوندی لایه‌ی K (نه الکترون‌های لایه K) می‌تواند در معرض برخورد قرار بگیرد. بنابراین از نظر احتمال برهمکنش‌ها، کاهشی ناگهانی به‌نام لایه‌ی جذبی K وجود دارد که به کاهش انرژی (E_k) بستگی دارد. و در تصویر (7-3) نیز نشان داده شده است.

شایان ذکر است هر چند اختلاف بین انرژی فوتون E_{ph} و انرژی پیوندی الکترون (E_b) بین فتوالکتریک و اتم پس‌زنی شده تقسیم می‌گردد، اما تمام این اختلاف انرژی را برای فتوالکتریک منظور می‌کنند. به‌دلیل این‌که جرم فتوالکتریک در مقایسه با اتم بسیار کوچک است و انرژی به نسبت عکس جرم‌ها بین ذرات حاصل از اندرکنش توزیع می‌گردد می‌توان از انرژی اتم پس‌زنی شده صرف‌نظر کرد.

سطح مقطع فتوالکتریک با Z^m و E^{-n} تغییر می‌کند.

$$\sigma_{ph}(Z, E) \propto \frac{Z^m}{E^n}$$

n و m هم به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$n \begin{cases} 3 & E \leq 150 \text{keV} \\ 1 & E \geq 5 \text{MeV} \end{cases} \quad m \begin{cases} 4 & E = 100 \text{keV} \\ 4.6 & E = 3 \text{MeV} \end{cases}$$

با تقریب نادقیقی می‌توان سطح مقطع را با این رابطه بیان کرد:

$$\sigma_{ph}(E) \propto \frac{Z^4}{E^3}$$

در حالی که در هسته‌های سبک الکترون‌های لایه K در همه‌ی اندرکنش‌های فتوالکتریک شرکت می‌کنند. یعنی به احتمال 100% فتوالکتریک با الکترون‌های لایه K روی می‌دهد، با این همه معمولاً احتمال ایجاد اندرکنش‌های پراکندگی غیرهمدوس (کمپتون) بیش‌تر است و تناسب آن فتوالکتریک با Z^4 حاکی از آن است که با افزایش عدد اتمی احتمال فتوالکتریک بیش‌تر می‌شود با آن که احتمال ایجاد فتوالکتریک با لایه K در عناصر سنگین 80% است.

در جدول (1-3) انرژی لایه K برای چند عنصر داده شده است.

جدول (1-3)

نوع عنصر	انرژی لایه K
H هیدروژن	13.6 eV
Fe آهن	7.11 keV
Pb سرب	88 keV
U اورانیوم	116 keV

در اثر کنده شدن فتوالکتریک از لایه‌ی مقید هسته، اتم برانگیخته می‌شود. برای برگشت به حالت پایه x مشخصه یا الکترون ساطع می‌کند. سازوکار این برانگیختگی به این نحو است که جای خالی فتوالکتریک توسط یک الکترون از لایه‌های خارجی پُر می‌شود و این فرآیند با آزاد شدن پرتو x فلورسنت یا الکترون اوژه است.

نتیجه:

$$\left. \begin{array}{l} \text{محصول اصلی} \leftarrow \text{فتوالکتریک} \\ \text{محصولات فرعی} \leftarrow \left. \begin{array}{l} \text{الکترون مفید + فوتون} \\ \text{X فلورسانس} \\ \text{الکترون اوژه} \end{array} \right\} \end{array} \right\}$$

X فلورسانس (Flourescence): تابش الکترومغناطیسی که به‌عنوان پرتو X هنگام انتقال الکترون از لایه‌ی خارجی‌تر به لایه‌ی

داخلی تر آزاد می شود، X فلورسانس گفته می شود. انرژی این فوتون X آزاد شده، ناشی از اختلاف انرژی بین دو لایه است.

الکترون اوژه (Auger Electron): همه الکترون های منتقل شده به جاهای خالی در لایه های داخلی تر اتم با تولید پرتوهای x همراه نیستند و انتقالات بدون تابش هنگامی رخ می دهد که انرژی کافی جهت خروج یک الکترون از لایه خارجی تر موجود باشد و به طور کاملاً آماری یک الکترون از اتم خارج شود. این فرآیند به اثر اوژه معروف است و الکترون خارج شده را هم الکترون اوژه گویند. در این حالت اتم دارای دو جای خالی است که یکی مربوط به جای خالی فوتوالکترون است و یکی مربوط به جای خالی ناشی از الکترون اوژه است که می توانند با تابش های پیاپی الکترون اوژه (Cascade Auger) و با یونیزاسیون چندگانه اتم پر شوند.

انتقالات ممکنه فراوان است و طیف الکترون های اوژه بسیار پیچیده است. (انتقالات بدون تابش در بین زیرلایه هایی مانند L و K به نام انتقالات Coster Kronig نامیده می شوند.)

در اتم های دارای هسته های سنگین بیش تر پرتو x فلورسانس تولید می شود و در اتم های دارای هسته های سبک سهم تولید الکترون اوژه بیش تر است. یکی از دلایل اختلاف در تولید محصولات فرعی اندرکنش می تواند این باشد که هر چه هسته سنگین تر بوده، الکترون های لایه های خارجی بیش تر تحت جاذبه هسته هستند و انرژی بیش تری لازم است تا بتواند آن ها را از اتم جدا کند.

احتمال آزاد شدن پرتو X فلورانس و الکترون اوژه را می توان با بهره فلورانس تعیین کرد که به صورت زیر می باشد:

$$\text{Flourescence Yeild } (\omega) : \begin{cases} 0.005 & Z = 8 \\ 0.965 & Z = 90 \end{cases}$$

همان طور که از رابطه بالا نتیجه می شود، احتمال تولید فلورسانس در هسته های سبک بسیار بسیار کم تر از هسته های سنگین است.

$1 - \omega$ احتمال ایجاد الکترون اوژه است.

با وجود آن که ممکن است x با انرژی های گوناگون تولید شود، می توان چنین بیان کرد که x و یا الکترون اوژه ساطع شده، انرژی معادل انرژی پیوندی فوتوالکترون حمل می کنند.

3-2-5 تولید زوج (Pair Production):

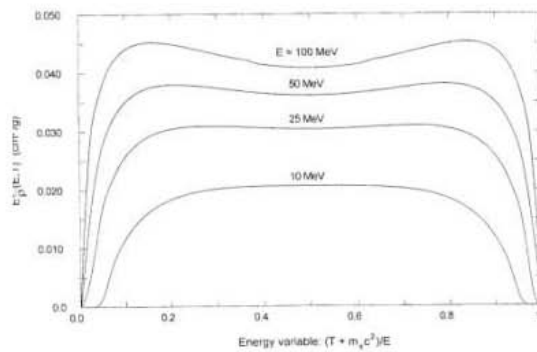
این اندرکنش نیز از نوع جذبی است چرا که در آن فوتون فرودی کاملاً جذب هدف شده و به جای آن یک زوج پوزیترون-الکترون تولید می شود. این پدیده در اثر میدان الکتریکی قوی در مجاورت هسته روی می دهد و آستانه ی انرژی برای انجام آن $(2m_e c^2 = 1.02 \text{ Mev})$ می باشد.

با احتمال کمتری ممکن است پدیده ی مشابه آن در مجاورت میدان الکتریکی یک الکترون روی دهد که به آن تولید سه گانه (Triplet Production) گویند و آستانه ی انرژی برای انجام آن معادل $(4m_e c^2)$ است.

و اما در فرآیند تولید زوج که موضوع اصلی این بخش است، انرژی جنبشی هر کدام از پوزیترون و الکترون به صورت زیر است:

$$T_+ + T_- = E - 2m_e c^2$$

در اولین تقریب، می توان چنین در نظر گرفت که سطح مقطع تولید زوج با Z^2 تغییر می کند و با افزایش انرژی فوتون فرودی افزایش می یابد. این سطح برای آهن در تصویر (8-3) رسم شده است.



تصویر (8-3)

در نهایت پوزیترون با یک الکترون اندرکنش کرده و پدیدهی فنا¹ یا نابودی زوج رخ می دهد. به ترکیب پوزیترون با یک الکترون پوزیترونیوم گویند. محصول این اندرکنش دو فوتون است که با زاویهی تقریباً 180 درجه در خلاف جهت یکدیگر در فضا منتشر می شوند. انرژی هر کدام از فوتون ها به مقدار 511keV است.

پدیدهی فنا هنگامی روی می دهد که انرژی پوزیترون به صفر میل کرده است در این زمان با الکترون ترکیب می شود.

3-2-6 ضرایب تضعیف فوتون (Photon Attenuation Coefficients):

همان طور که قبلاً بیان شد، μ ضریب تضعیف خطی فوتون است و اگر در محدوده های کوچکی از مسیر کلی که فوتون γ در هدف طی می کند، اندرکنش های مختلف فوتون گاما را در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$\mu(E) = N \left[\sigma_c(E) + \sigma_{ph}(E) + \sigma_{pp}(E) \right]$$

$$N = \frac{\rho N_a}{A}$$

توجه کنید که پراکندگی ریلی و اثرات دیگر به دلیل کم اهمیت بودن آن ها در مقایسه با اندرکنش های دیگر در نظر گرفته نشده است.

¹ Annihilation

ضریب تضعیف جرمی به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_a}{A} \left[\sigma_c(E) + \sigma_{ph}(E) + \sigma_{pp}(E) \right] = \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_{ph}}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho}$$

7-2-3) سطح مقطع های جذب و پراکندگی کمپتون

(Compton Absorption and Scattering Cross Sections)

تاکنون اندرکنش های مختلف بردی فوتون ها را بررسی کردیم. بعضی از اندرکنش ها از نوع جذبی بودند مانند فوتوالکتریک و تولید زوج و بعضی از اندرکنش ها مانند کمپتون از نوع پراکندگی بودند. در اندرکنش های جذبی تمام انرژی فوتون به محصولات داده می شود. سهم عمده ی آن جذب هدف می شود و گاهاً فوتون هایی هم از ماده ی هدف ساطع می گردد که جزء انرژی جذبی به حساب نمی آیند.

می خواهیم این مطلب را بررسی کنیم که در اندرکنش های پراکندگی مانند کمپتون چه سهمی از انرژی فوتون فرودی در ماده هدف جذب شده و چه کسری از آن پراکنده شده است. لذا در این بخش و بخش های مشابه آن به محاسبه ی کسرهای جذبی در اندرکنش های مختلف می پردازیم تا بتوانیم سطح مقطع جذب را برای هر یک از آنها محاسبه کنیم.

از رابطه Klein-Nishina چنین دریافت می شود که تحت زوایای مختلف، سطح مقطع ها یا احتمالات مختلف وجود دارد. در هر زاویه ای می توان به یک انرژی برای فوتون ثانویه و یک انرژی برای الکترون دست یافت. انرژی فوتون فرودی و خروجی هم طبق رابطه ی سینماتیکی مطرح شده در قسمت قبل با هم مرتبط هستند. بنابراین می توان رابطه ی Klein-Nishina را که برحسب زاویه پراکندگی فوتون خروجی نوشته شده است، برحسب انرژی الکترون بنویسیم. یعنی به جای $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ از $\frac{d\sigma}{dT}$ استفاده کنیم. یعنی

احتمال آن که الکترون ها تحت زوایای مختلف انرژی دریافت کنند، چه قدر است؟!

$$\sigma_{ec}(E) = \int_0^{T_{max}} \sigma_{ec}(E, T) dT \quad \text{سطح مقطع دیفرانسیلی وابسته به فوتون پراکنده}$$

* حد بالای آن T_{max} است چون نهایت انرژی الکترون در $\theta = 180^\circ$ رخ می دهد.

$\sigma_{ec}(E, T)$ یعنی احتمال آن که بتوان به الکترون پس زده شده در انرژی های مختلف E (فوتون فرودی) مقادیر مختلف سطح مقطع نسبت داد و $\sigma_{ec}(E, T) dT$ سطح مقطعی است که احتمال پراکندگی الکترون با انرژی بین T و T + dT را بیان می کند.

$\sigma_{ec}(E, T)$ را با نماد $\frac{d\sigma(E)}{dT}$ نیز نشان می دهند.

$$\sigma_{ec}(E, T) = \frac{d\sigma(E)}{dT}$$

احتمال آن که انرژی یک الکترون پس زده شده بین T و $T + dT$ باشد:

$$P_c(T)dT = \frac{\sigma_{ec}(E, T)dT}{\sigma_{ec}}$$

* کسر متوسط انرژی جذب شده در اندرکنش کامپیتون برای انرژی فرودی خاص f_c :

$$f_c = \int_0^{T_{max}} P_c(T) \frac{T}{E} dT$$

$$f_c = \frac{\int_0^{T_{max}} \sigma_{ec}(E, T) \frac{T}{E} dT}{\int_0^{T_{max}} \sigma_{ec}(E, T) dT}$$

* نکته محاسباتی: برای متوسط گیری هر کمیت باید احتمال وقوع آن را در کمیت ضرب کرده و بر کل آن تقسیم می کنیم و انتگرال می گیریم تا کسر متوسط به دست آید.

* می توان با استفاده از روابط فوق الذکر، سطح مقطع جذب انرژی کمپتون را به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_{ca}(E) = f_c \sigma_c(E)$$

به این ترتیب سطح مقطع جذب، کسری از سطح مقطع کل است (تضعیف) و از آن کوچکتر است که رابطه ضریب جذب جرمی را نیز می توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\mu_{ca}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{ca}$$

3-2-8) سطح مقطع جذب فتوالکتریک (Photoelectric Absorption cross Section):

سطح مقطع جذب فتوالکتریک σ_{pha} از σ_{ph} حاصل می گردد و کسر متوسط f_{ph} از انرژی جنبشی فوتون فرودی است که به صورت انرژی جنبشی اولیه فتوالکترون و نیز برای الکترون اوژه لحاظ می گردد.

$$f_{ph} = \frac{1}{E} [(E - E_b) + (1 - \bar{\omega})E_b] = 1 - \frac{\omega E_b}{E}$$

$(E - E_b)$ انرژی داده شده به فتوالکترون

$(1 - \bar{\omega})$ بهره تولید الکترون اوژه

ضریب جذب خطی و ضریب جذب جرمی به صورت زیر است:

$$\mu_{\text{pha}} = N\sigma_{\text{pha}} \quad , \quad \frac{\mu_{\text{pha}}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{\text{pha}}$$

9-2-3) سطح مقطع جذب تولید زوج (Absorption Cross Section for pair production):

در اندرکنش تولید زوج کسری از انرژی فوتون فرودی که به صورت انرژی جنبشی اولیه پوزیترون و الکترون ظاهر می‌شود، f_{pp} است و بدین صورت تعریف می‌شود:

$$f_{\text{pp}} = 1 - \frac{2m_e c^2}{E}$$

سطح مقطع جذب تولید زوج σ_{ppa} است:

$$\mu_{\text{ppa}} = N\sigma_{\text{ppa}} \quad \text{و} \quad \frac{\mu_{\text{ppa}}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{\text{ppa}}$$

10-2-3) ضرایب تصحیح برای انرژی تشعشی تلف شده

:(Corrections for Radiative Energy Loss)

سطح مقطع‌های جذبی مذکور، خطی هستند و براساس انتقال انرژی جنبشی الکترون‌ها و پوزیترون‌ها مطرح می‌شود. هنگامی که این ذرات باردار گند می‌شوند، بیش‌تر انرژی جنبشی آن‌ها به صورت موضعی موجب یونش و برانگیزش مولکول‌ها و اتم‌های محیط می‌شود. مقداری از این انرژی هم به صورت تابش ترمزی¹ از ماده‌ی هدف خارج می‌شود. ممکن است مقدار تابش ترمزی بنابه نوع ماده‌ی هدف و انرژی فوتون فرودی، مقدار قابل توجهی باشد. لذا لازم است که این مقدار تابش ترمزی از سطح مقطع جذب کسر شود. فاکتور تصحیح آن $(1 - G)$ است.

G کسری از انرژی جنبشی اولیه ذرات باردار است که به صورت تابشی هدر رفته و جذب نشده است و روی کلیه انواع اندرکنش‌ها و تمام انرژی‌ها متوسط‌گیری شده است. کسر G را می‌توان از روی بهره‌های تشعشع تعیین کرد.

¹ Bremsstrahlung

$Y(T)$ یا همان بهره تولید فلورسانس، کسری از انرژی جنبشی اولیه به مقدار T است که به تابش ترمزی تبدیل می‌شود. همان‌طور که در جدول (2-3) دیده می‌شود، با افزایش عدد اتمی عناصر مقدار $Y(T)$ نیز افزایش می‌یابد. تفاوت آن با G این است که اولاً G متوسط Y هاست و دوم این که G روی تمام اندرکنش‌ها و تمام انرژی‌ها تعریف می‌شود. هر کدام از اندرکنش‌های فتوالکتریک و کمپتون و ... Y مخصوص به خود دارند و G از تمام اندرکنش‌ها در یک انرژی خاص متوسط‌گیری می‌کند.

نکته: از آن‌جا که در لامپ اشعه‌ی X می‌خواهیم درصد اشعه‌های X ترمزی افزایش یابد، از عنصر تنگستن در آند (ماده هدف) استفاده می‌کنیم که Z بالا دارد. با توجه به مفاهیم بهره تابشی خواهیم داشت:

$$G = \bar{Y}(T)$$

جدول (2-3) بهره تابشی الکترون‌ها

Electron radiation yield, $Y(T)^*$									
T (MeV)	C	Water	Air	Al	Fe	Mo	W	Pb	U
0.1	0.0005	0.0006	0.0007	0.0014	0.0031	0.0054	0.0103	0.0116	0.0131
0.2	0.0009	0.0010	0.0011	0.0022	0.0052	0.0093	0.0187	0.0212	0.0242
0.5	0.0018	0.0020	0.0022	0.0043	0.0100	0.0179	0.0371	0.0424	0.0491
1.0	0.0034	0.0036	0.0040	0.0764	0.0170	0.0297	0.0603	0.0684	0.0792
1.5	0.0050	0.0053	0.0058	0.0110	0.0239	0.0410	0.0802	0.0901	0.1035
2.0	0.0067	0.0071	0.0077	0.0145	0.0310	0.0519	0.0986	0.1096	0.1249
4.0	0.0142	0.0149	0.0158	0.0292	0.0595	0.1136	0.1625	0.1761	0.1955
6.0	0.0222	0.0233	0.0242	0.0444	0.0874	0.1325	0.2157	0.2304	0.2518
8.0	0.0304	0.0319	0.0327	0.0596	0.1139	0.1677	0.2612	0.2765	0.2990
10.0	0.0387	0.0406	0.0411	0.0745	0.1389	0.1999	0.3006	0.3162	0.3394
15.0	0.0595	0.0622	0.0618	0.1105	0.1951	0.2689	0.3800	0.3955	0.4193
20.0	0.0798	0.0833	0.0817	0.1438	0.2435	0.3252	0.4403	0.4555	0.4790
50.0	0.1856	0.1920	0.1825	0.2959	0.4328	0.5249	0.6316	0.6439	0.6635
100.0	0.3181	0.3190	0.3022	0.4448	0.5848	0.6673	0.7526	0.7617	0.7766

* $Y(T)$ is the fraction of the initial kinetic energy T lost as bremsstrahlung. The yields do not account for the minor effects of radiation losses from energetic secondary electrons (delta rays) produced during the deceleration of the primary electron.
Source: [ICRU 1984].

از آن‌جا که برای اندرکنش کمپتون طیفی از انرژی الکترون‌های ثانویه وجود دارد، مقدار G در این مورد بر روی انرژی‌های الکترون میانگین‌گیری می‌شود:

$$G_c \equiv \bar{Y}(T) = \frac{\int dT T Y(T) \sigma_c(E, T)}{\int dT T \sigma_c(E, T)} = \frac{\text{مقداری که تبدیل به اشعه ترمزی می‌شود}}{\text{کل انرژی}}$$

برای تولید زوج نیز می‌توان مقدار انرژی که به صورت تابش ترمزی از انرژی جنبشی الکترون و پوزیترون کسر می‌شود را به صورت فوق محاسبه کرد.

11-2-3 ضرایب مربوط به انرژی بر جای گذاشته شده در ماده برای فوتونها

(Photon Energy Deposition Coefficient)

برای محاسبه توابع پاسخ در کمیت‌های مختلفی که در طراحی و آنالیز حفاظ مطرح می‌شود، ضرایب مختلفی تعریف می‌شود که در هر کدام بنابه نوع کمیت مورد نظر میزان جذب، پراکندگی یا تشعشع ترمزی مربوط به هر یک از اندرکنش لحاظ شده است. این ضرایب شامل μ ، μ_a ، μ'_{tr} ، μ_{tr} ، μ_{en} هستند که به توصیف هر یک می‌پردازیم:

1- ضریب جذب خطی (μ_a)¹: در این ضریب همه اندرکنش‌ها جذبی فرض شده و تنها در اندرکنش کمپتون که از نوع پراکندگی است، سهم جذبی آن در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu_a = \mu - (1 - f_c)\mu_c = \mu_{ph} + \mu_{pp} + f_c\mu_c = \mu_{ph} + \mu_{pp} + \mu_{ca}$$

این مفهوم در نمودار (9-3) دیده می‌شود.

2- μ'_{tr} نامی برای آن در نظر گرفته نشده است ولی می‌توان آن را ضریب انتقال خطی کاذب نامید. در این ضریب فقط اندرکنش فتوالکتریک را از نوع جذبی لحاظ می‌نمایند و برای اندرکنش‌های تولید زوج و کمپتون، فقط سهم جذبی آن‌ها اعمال می‌گردد:

$$\mu'_{tr} = \mu_a - (1 - f_{pp})\mu_{pp} = \mu_{ph} + \mu_{ca} + \mu_{ppa} = \mu_{ph} + f_{pp}\mu_{pp} + f_c\mu_c$$

3- ضریب انتقال خطی انرژی (μ_{tr})²: در این ضریب سهم پراکندگی همه اندرکنش‌ها حذف شده و تنها سهم جذبی آن‌ها منظور می‌گردد:

$$\mu_{tr} = \mu'_{tr} - (1 - f_{ph})\mu_{ph} = f_{ph}\mu_{ph} + f_{pp}\mu_{pp} + f_c\mu_c$$

4- ضریب جذب خطی انرژی (μ_{en})³: در این ضریب که برای محاسبه دُز به کار می‌رود، سهم انرژی پرتوی x ترمزی (برمزشترالونگ) کسر شده است:

$$\mu_{en} = (1 - G)\mu_{tr}$$

کسری که فاقد تابش ترمزی است $(1 - G) =$ بهره تابش ترمزی متوسط $G =$

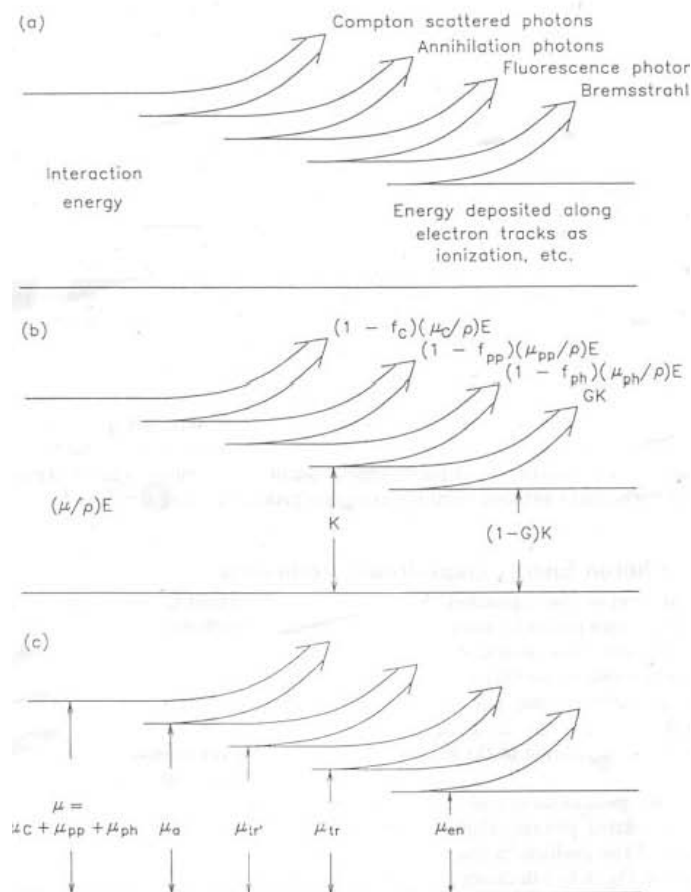
برای هر کدام از انواع کمیت‌های دزیمتریک که در فصل پنجم شرح داده خواهد شد، هر کدام از ضرایب فوق‌الذکر به کار می‌رود. به‌طور مثال برای کمیت دُز جذبی از μ_{en} و برای محاسبه کرما (kerma) از μ_{tr} استفاده می‌شود. نمودار (9-3) توصیف واضحی از این ضرایب می‌باشد.

¹ Linear absorption coefficient

² Linear Energy Transfer coefficient

³ Linear Energy absorption coefficient

تصویر (9-3)



3-3) اندرکنش‌های نوترون (Neutron Interactions):

اساس فرایندهای مربوط به اندرکنش نوترون‌ها با مواد در مقایسه با اندرکنش فوتون‌ها متفاوت است. در حالی که اندرکنش فوتون‌ها بیشتر با الکترون‌های اتم انجام می‌شود، اندرکنش نوترون‌ها، فقط با هسته‌های اتم می‌دهد. البته اندرکنش‌های نوترون، الکترون نیز انجام می‌گیرد، اما وقوع این اندرکنش‌ها بسیار نامحتمل است و لذا در مقایسه با احتمال اندرکنش‌های نوترون-هسته قابل صرف‌نظر می‌باشند. سطح مقطع‌هایی که برای نوترون‌ها مطرح می‌شوند، شباهتی با سطح مقطع‌های فوتون‌ها ندارند. سطح مقطع‌های نوترون نه تنها به سرعت با انرژی نوترون فرودی تغییر می‌کند، بلکه از یک عنصر به عنصر دیگر و حتی در بین ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر نیز متغیر هستند. در توصیف اندرکنش یک نوترون با هسته، اندرکنش‌های پیچیده بین همه نوکلئون‌ها در هسته و نوترون فرودی، مطرح می‌گردد و در نتیجه آن نظریه‌های بنیادینی را می‌توان برای پیشگویی گوناگونی سطح مقطع نوترون‌ها مورد استفاده قرار داد. ولی با این همه هنوز نقصان‌هایی در این زمینه وجود دارد. برای این منظور داده‌هایی که

ماهیت تجربی دارند، به عنوان یک راهنما قابل دسترس هستند تا بتوان با استفاده از آن‌ها بین انرژی‌ها و ایزوتوپ‌های مختلف، درونیابی کرده و به پاسخ‌های مناسب دست یافت.

در طی سالیان سال داده‌های هسته‌ای در مورد نوترون‌ها به صورت مجموعه نرم‌افزاری تهیه شده و تحت عنوان فایل داده‌های هسته‌ای¹ (ENDF) ارائه شده‌اند. ENDF یکی از معروف‌ترین کتابخانه‌های داده‌های هسته‌ای است و حاوی اطلاعات بسیاری در مورد نوترون‌ها می‌باشد.

3-3-1) طبقه‌بندی انواع اندرکنش‌ها (Classification of types of interactions):

اندرکنش‌های نوترون - هسته زیادی وجود دارد که تنها بعضی از آن‌ها در محاسبات مربوط به حفاظت‌سازی در برابر پرتوهای مورد توجه قرار می‌گیرند. اندرکنش‌های بسیار پر انرژی می‌توانند ذرات ثانویه متعدد و فراوانی تولید کنند. برای وقوع چنین اندرکنش‌هایی، انرژی‌هایی زیادی لازم است که در محدوده حفاظت‌سازی قابل بحث نیست. همچنین برای نوترون‌هایی با انرژی بسیار کم، اندرکنش‌های نوترونی پیچیده‌ای ممکن پذیر است مانند پراکندگی Bragg از سطوح کریستالی، برانگیختگی فوتونی در یک کریستال، پراکندگی هم‌دوس از مولکول‌ها و غیره که هیچ‌کدام در حیطه کار ما قرار نمی‌گیرند. در جدول زیر اندرکنش‌هایی که اساساً برای طراحی حفاظ مطرح می‌شوند آورده شده است. این اندرکنش‌ها شامل: اندرکنش‌های جذبی و نیز پراکندگی با انرژی بالا در توزیع‌های زاویه‌ای مختلف می‌باشند.

جدول (3-3) داده‌های هسته‌ای مورد نیاز برای محاسبات حفاظت‌سازی نوترون

<i>High-energy interactions (1 eV < E < 20 MeV)</i>	
Elastic scattering cross sections	
Angular distribution of elastically scattered neutrons	
Inelastic scattering cross sections	
Angular distribution of inelastically scattered neutrons	
Gamma-photon yields from inelastic neutron scattering	
Resonance absorption cross sections	
<i>Low-energy interactions (< 1 eV)</i>	
Thermal-averaged absorption cross sections	
Yield of neutron-capture gamma photons	
Fission cross sections and associated gamma-photon and neutron yields	

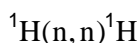
¹ Evaluated Nuclear Data Files

جدول (3-4) انواع برهمکنش‌های نوترونی

انواع برهمکنش‌های نوترونی (Types of Neutron reactions)	پراکندگی (Scattering)	کشسان (Elastic) $(n,n) \leftarrow$	شکلی (shape or potential)
			رزونانسی (Resonance)
	جذب (Absorption)		ناکشسان (Inelastic) $(n, n') \leftarrow$
			گیراندازی پرتوی (Radiative Capture) $(n, \gamma) \leftarrow$
		تپش ذره باردار (Charged particle emission) $(n, p), (n, \alpha), (n, 2n), \dots \leftarrow$	
			شکافت (Fission) $(n, f) \leftarrow$

پراکندگی: در همه انواع پراکندگی همانند حالت پراکندگی برای پروتون‌ها، نوترون فرودی با هسته برخورد کرده و محصول این برهمکنش نوترون خواهد بود. تنها تفاوت انواع پراکندگی در قابلیت نوترون برای برانگیخته کردن هسته می‌باشد. به عبارت دیگر در پراکندگی‌های کشسان انرژی نوترون تا حدی نیست که قادر باشد هسته را به حالت برانگیخته درآورد. در چنین حالتی ممکن است موجب رزونانس هسته شود یا آن که برخورد نوترون با نوکلئون‌های هسته مانند برخورد گلوله‌های بلیارد باشد. در انواع برخوردهای الاستیک مقداری از انرژی نوترون‌ها کاهش یافته و این مقدار کاهش انرژی به هسته منتقل می‌شود و نوترون فرودی از راستای خود پس از برخورد منحرف می‌گردد.

هرگاه جرم هسته هدف سبک‌تر باشد، انرژی انتقالی بیش‌تر خواهد بود. هسته‌های هدف با چنین مشخصاتی همانند H و ایزوتوپ آن دارای جرمی بسیار نزدیک به جرم نوترون می‌باشند. برای چنین هسته‌هایی در انرژی‌های کم سطح مقطع زیاد است. لکن در انرژی‌های $1/2 \text{ MeV}$ ابتدا سطح مقطع سریعاً کاهش یافته و سپس سرعت کاهش آن کم شده و در انرژی‌های بالاتر به کندی انجام می‌گیرد.



سطوح مقطع مولد مهم بیولوژیکی دیگر مانند O و N و C، رفتارهای مشابهی را نشان می‌دهند، اما این عناصر برخلاف هیدروژن دارای قله‌های تشدید زیادی در منحنی صاف می‌باشند که بر روی هم قرار می‌گیرند.

پراکندگی ناکشسان: در این نوع پراکندگی نوترون می‌تواند به صورت لحظه‌ای (آنی) توسط هسته گرفتار شده و سپس با انرژی کاهش یافته‌ای در یک حالت تحریکی، هسته را ترک می‌کند. در این‌گونه موارد، هسته نیز با تابش پرتوی گاما به حالت پایه خود برمی‌گردد. به عنوان مثال در این رابطه می‌توان به ${}^{16}\text{O}(n, n'){}^{16}\text{O}^*$ اشاره کرد. ${}^{16}\text{O}^*$ بلافاصله پرتو گاما با انرژی $6/1 \text{ MeV}$ تابش می‌کند.

جذب: به برهم‌کنش‌هایی که نوترون فرودی کاملاً جذب هسته می‌شود و در پی آن پرتوها، ذرات باردار و یا پاره‌های شکاف تولید می‌شوند، جذب گویند.

برخورد غیرکشسان (Nonelastic): اگر برهمکنش‌ها را به این صورت دسته‌بندی کنیم که شامل برهمکنش‌های کشسان نبوده و

برهم کنش‌ها فقط از نوع جذبی و ناکشسان باشند، به این دسته‌بندی برخورد غیرکشسان می‌گویند. یعنی از سطح مقطع کل که شامل تمام انواع برهم‌کنش‌ها می‌شود، سطح مقطع الاستیک را کسر کنیم. یا به عبارت دیگر مجموع سطح مقطع‌های جذب و ناکشسان را در نظر بگیریم. در هر صورت اگر ذره حاصله پس از برهم‌کنش نوترون نباشد، چنین برخوردی غیرارتجاعی یا غیرکشسان است.

سطح مقطع الاستیک - سطح مقطع کل = سطح مقطع غیرکشسان

اندازه‌گیری سطح مقطع ناکشسان (Inelastic) بسیار دشوار است. راه ساده‌تر آن اندازه‌گیری سطح مقطع غیرکشسان (nonelastic) به روش فوق است.

سطح مقطع کل که به صورت مجموع سطح مقطع‌ها برای همه انواع برهم‌کنش ارائه می‌شود، در واقع معیاری برای اندازه‌گیری احتمال آن است که یک نوترون با انرژی خاص در هدف چه برهم‌کنش‌هایی انجام خواهد داد. عوامل مؤثر در سطح مقطع کل برای سطح مقطع‌های جذب و پراکندگی به عنوان یک برداشت اولیه در آنالیز حفاظ مهم تلقی می‌شوند. هر چه سطح مقطع بزرگ‌تر شود، احتمال برهم‌کنش‌ها افزایش یافته و اندازه‌گیری راحت‌تر صورت می‌گیرد. هر چند که سطح مقطع کل از یک هسته تا هسته دیگر متفاوت است ولی ویژگی‌های مشترکی برای تمام آن‌ها می‌توان بیان کرد.

از آن‌جا که سطح مقطع‌های نوترون بستگی به نوع هسته هدف دارند، لازم است که انواع طبقه‌بندی هسته‌ها را بشناسیم:

$$\left. \begin{array}{l} 1- \text{ هسته‌های سبک } A \leq 25 \\ 2- \text{ هسته‌های میانی } 25 < A < 150 \\ 3- \text{ هسته‌های سنگین } A \geq 150 \end{array} \right\} \text{ طبقه‌بندی هسته‌ها (A: عدد جرمی mass number)}$$

(1) اندرکنش نوترون با هسته‌های سبک:

برای هسته‌های سبک و بعضی از هسته‌های جادویی (Magic) که دارای تعداد نوترون و یا پروتون (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...) هستند، سطح مقطع در انرژی‌های کم ($< 1\text{keV}$) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_t = \sigma_1 + \frac{\sigma_2}{\sqrt{E}}$$

E انرژی نوترون فرودی و σ_1 و σ_2 مقادیر ثابت هستند و دو قسمت طرف راست معادله به ترتیب سطح مقطع پراکندگی الاستیک و سطح مقطع جذب (یا Radiative capture reaction) می‌باشند. در بین همه هسته‌ها تنها هیدروژن و ایزوتوپ آن دوتریم، هیچ‌گونه رزونانسی از خود نشان نمی‌دهند. برای هر دو ایزوتوپ سطح مقطع از ناحیه eV تا چند MeV با افزایش انرژی به صورت ثابتی کاهش می‌یابد.

(2) برهمکنش نوترون با هسته‌های سنگین:

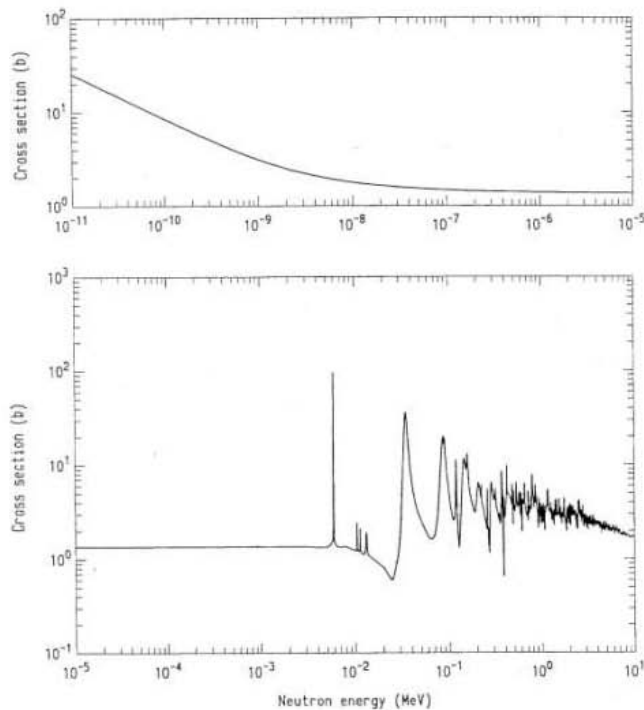
در هسته‌های سنگین به‌جز در انرژی‌های کم که فاقد حالت رزونانسی هستند (رزونانس آن‌ها دیده نمی‌شود یا به‌عبارت دیگر پنهان شده است)، مطابق با رابطه $\frac{1}{\sqrt{E}}$ در انرژی‌های کم رفتار می‌کنند. رفتارهای رزونانسی در هسته‌های سنگین نسبت به هسته‌های سبک در انرژی‌های بسیار پایین‌تری ظاهر می‌شود (معمولاً در ناحیه eV) و رزونانس‌ها نزدیک به هم می‌باشند و تا اندازه‌ای عرض هر رزونانس باریک است که با رزونانس مجاورش قابل تمیز نیست تا این‌که تدریجاً به یک منحنی نرم تبدیل می‌شود البته بجز در قسمت‌هایی که رزونانس کمی مشاهده می‌گردد.

(3) برهمکنش نوترون با هسته‌های میانی:

انتظار می‌رود که رفتار هسته‌های میانی در مقابل برخورد نوترون فرودی مابین رفتار هسته‌های سبک و سنگین باشد و رزونانس‌های آن در ناحیه 100eV تا چندین keV ظاهر شوند. این رزونانس‌ها به بلندی و به باریکی رزونانس‌های هسته‌های سنگین نیستند.

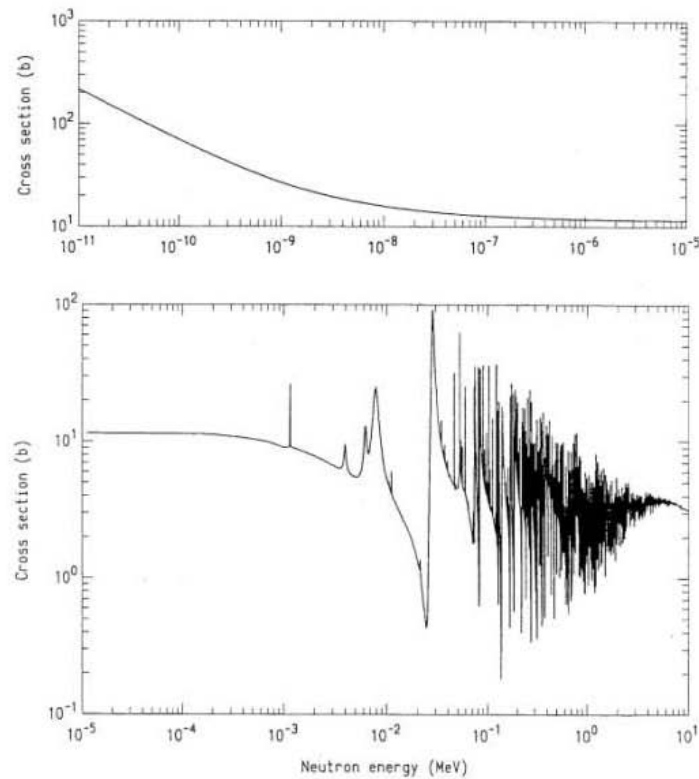
نکته: در هسته‌های سبک فاصله بین سطوح انرژی زیاد است. این ویژگی در هسته‌های مرموز هم دیده می‌شود اما در هسته‌های سنگین فاصله سطوح انرژی کم است و مکان‌های زیادی برای برهمکنش وجود دارد پس برانگیخته کردن آن‌ها آسانتر صورت می‌گیرد. در هسته‌های سبک و مرموز به‌دلیل پایداری بیش‌تر و فاصله زیاد سطوح انرژی، برانگیختگی کم‌تر انجام شده و در آن‌ها بیش‌تر برهمکنش‌های الاستیک روی می‌دهد.

در شکل‌های (3-10) تا (3-14) نمونه‌هایی از این سطح مقطع‌ها ترسیم شده است. در شکل (3-14) سطح مقطع عناصر مختلف تا انرژی 12MeV رسم شده که معیار خوبی برای مقایسه سطح مقطع غیرالاستیک عناصر سبک و سنگین با یکدیگر است.



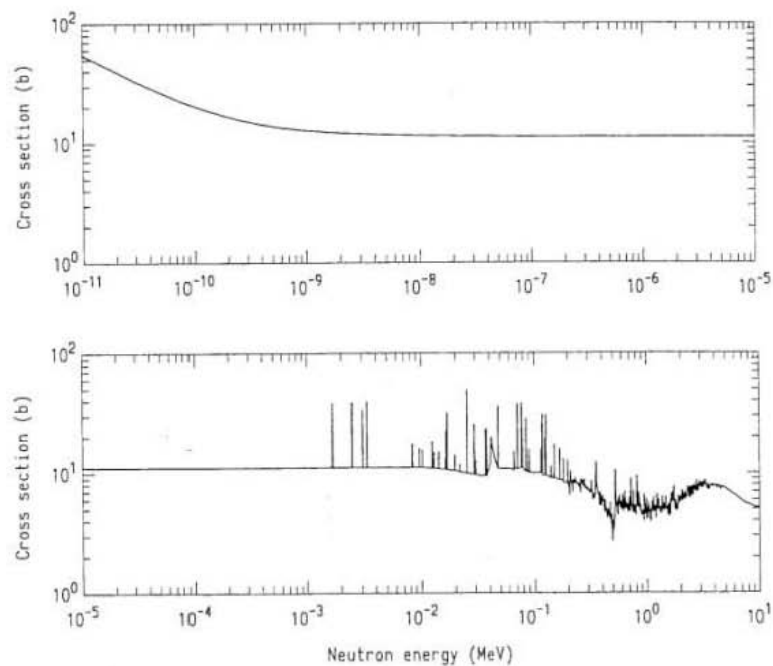
تصویر 3-10) سطح مقطع کل برای آلومینیوم Al که با ENDF/B محاسبه شده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود از انرژی 10^{-11} تا 10^{-5} سطح مقطع کلی آلومینیوم با رابطه $\frac{1}{\sqrt{E}}$ کاهش می‌یابد تا این‌که به $0/5b$ می‌رسد. پس از این‌که سهم مربوط به برهمکنش جذب به صفر کاهش یافت، تنها سهم مربوط به پراکندگی در انرژی‌های بالا نشان داده شده است. از حدود $4-5 \text{ MeV}$ رزونانس‌هایی در طیف دیده می‌شود. چرا که نوترون در بین سطوح هسته به صورت آبی جذب شده و موجب تحریک هسته می‌شود. در اثر برانگیختگی‌های متعدد هسته که ناشی از سطوح مختلف انرژی در هسته است، این رزونانس‌ها دیده می‌شود. در این برخوردها هسته‌های مرکب تشکیل می‌شود. با افزایش انرژی سطوح انرژی بسیار نزدیک هم شده، رزونانس‌ها بر هم منطبق می‌شوند و قابل تشخیص نیستند. (با افزایش انرژی n ، عمق نفوذ کاهش می‌یابد.)



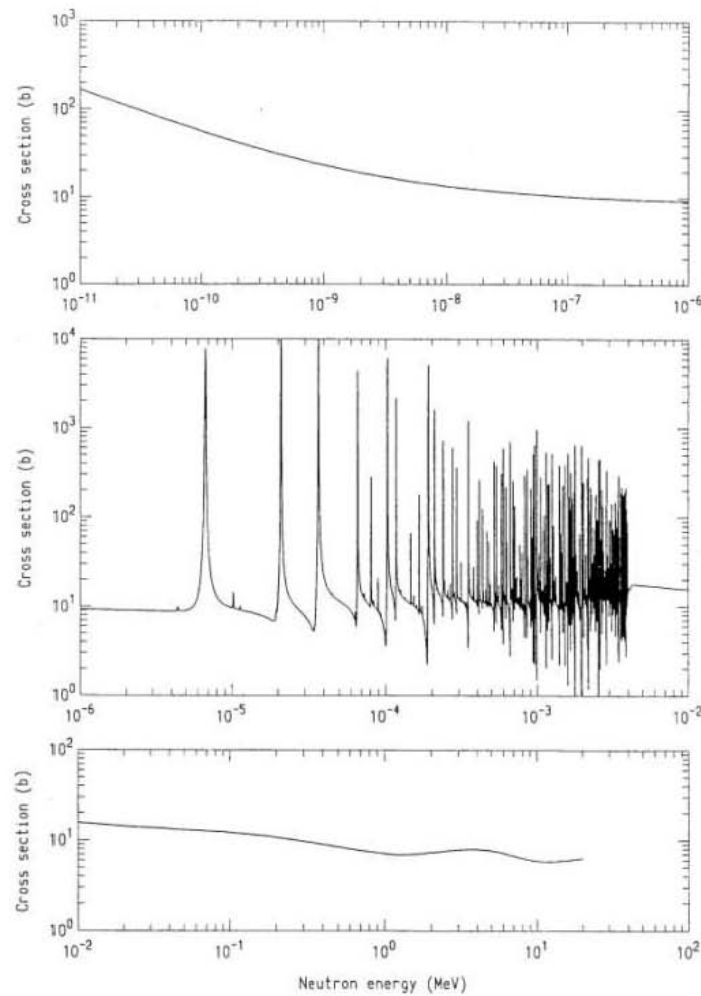
تصویر (3-11) سطح مقطع کل برای آهن Fe که با ENDF/B محاسبه شده است.

برای آهن نیز مانند آلومینیوم همان روند را داریم با این تفاوت که با افزایش A_{Fe} سطح مقطع پراکندگی به 1b افزایش یافته و همچنین در انرژی‌های کم‌تری نسبت به آلومینیوم طیف رزونانسی آن آغاز شده است. اولین پیک‌های رزونانسی در 1keV دیده می‌شود و این به دلیل سنگین‌تر شدن عنصر است. رزونانس‌های باریک و بلند در شکل به خوبی دیده می‌شوند. نکته حائز اهمیت در این منحنی چاه رزونانسی در 20keV است که همین چاه موجب استفاده آهن در حفاظ شده است چرا که نوترون‌های پُر انرژی در آن جذب می‌گردند.



تصویر (3-12) سطح مقطع کل برای سرب Fe که با ENDF/B محاسبه شده است.

در سرب نسبت به دو عنصر دیگر سطح مقطع پراکندگی به بیش از 1b افزایش می‌یابد و رزونانس‌ها از حول و حوش 500keV آغاز می‌شوند و کمینه آن‌ها در 400keV روی می‌دهد.

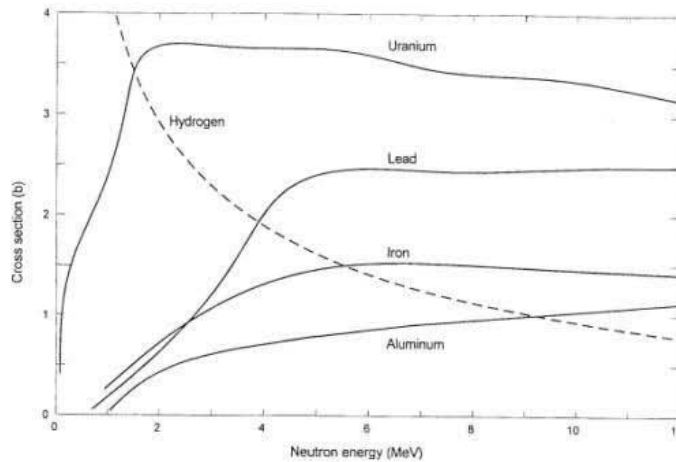


تصویر (3-13) سطح مقطع برهمکنش نوترونی که برای اورانیوم رسم شده است. از آنجا که 4keV به بعد رزونانس‌ها برهم

منطبق شده‌اند، تنها رفتار میانگین سطح مقطع‌ها رسم شده است.

بعضی پیک‌ها در اورانیوم منجر به تولید پاره‌های شکافت می‌شوند. سطح مقطع پراکندگی به 10b افزایش یافته و رزونانس‌ها دارای

پیک بسیار بلند و بسیار باریک هستند.



تصویر (3-14) سطح مقطع غیرالاستیک برای پراکندگی نوترون با چند عنصر رسم شده است. دیده می‌شود که سطح مقطع پراکندگی هیدروژن با افزایش انرژی نوترون کاهش می‌یابد.

در شکل فوق سطح مقطع‌های غیرالاستیک برای چند عنصر تا ناحیه انرژی MeV رسم شده است. همچنین سطح مقطع الاستیک هیدروژن نیز رسم شده است که با مقایسه آن‌ها رفتار متناقض هیدروژن انرژی مشهود است.

3-3-2) فرآیند تسخیر تشعشعی نوترون‌ها (Radiative Capture Neutrons):

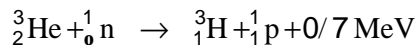
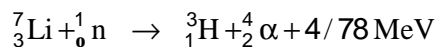
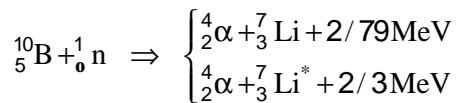
اکثر نوترون‌هایی که وارد حفاظ می‌شوند توسط اتم‌های ماده حفاظ جذب می‌گردند. انرژی جنبشی هر نوترون به‌علاوه انرژی پیوندی ناشی از هسته‌های مرکب (هسته‌های مرکب در اثر پراکندگی غیرکشسان ایجاد می‌شوند) حدوداً 7-9 MeV است که از هسته‌های برانگیخته مرکب با واپاشی در مدهای متعدد، به‌صورت یک یا چند پرتو گاما (γ) تابش می‌شود. انرژی این گاماها از گاماها ساطع شده از مواد رادیواکتیو مثل کبالت ($1/33, 1/17$ MeV) و سزیم (661 keV) پُر انرژی‌تر هستند و هنگامی که در نزدیکی سطح خارجی یک حفاظ نوترونی تولید می‌شوند، باید برای حذف آن‌ها حفاظ دیگری طراحی کرد.

نفوذپذیری این فوتون‌های گاما حاصل از تسخیر، بالاست. لذا در ضخامت‌های زیاد حفاظ از یک‌جایی به بعد که معمولاً عمق 1/5m است، نوترون‌ها را حذف کردیم در حالی که شار فوتون‌های گاما همچنان وجود دارند. نوترون‌ها سریع‌تر اُفت می‌کنند ولی اُفت فوتون‌های گاما با شیب ملایمی صورت می‌گیرد.

از آن‌جا که سطح مقطع جذب برهمکنش‌های نوترونی با افزایش انرژی نوترون فرودی کاهش می‌یابد، لذا ابتدا باید نوترون‌های سریع را به نوترون‌های کند یا حرارتی تبدیل کنیم تا بتوانیم آن‌ها را جذب نمائیم. از آب نمی‌توان برای کُند کردن انرژی نوترون‌ها استفاده کرد چرا که آب دارای عنصر هیدروژن است و در برابر انرژی زیاد نوترون‌ها سطح مقطع برهمکنش کمی را نشان می‌دهد.

لذا ابتدا با عناصری چون آهن و فولاد از طریق برخورد های غیرالاستیک، انرژی نوترون های سریع را کم می کنیم. در مرحله بعد با گذراندن شار نوترون ها از آب (هیدروژن) از طریق پراکندگی الاستیک آن ها را کند می کرده و سپس با استفاده از مواد جاذبی چون بور B و لیتیم Li که عناصر سبک بوده و سطح مقطع جذب بسیار بالایی برای نوترون های کند دارند، آن ها را جذب می نماییم.

B و Li در برخورد با نوترون های کند در برهمکنش (α و n) شرکت می کنند و ذرات باردار α تولید می نمایند که فرآورده های حاصل از این برهمکنش دارای عمق نفوذ بسیار کم هستند یعنی در خود ماده حفاظ جذب می شوند. در ضمن انرژی آن ها در حد $1\text{MeV} (0/48)$ که بسیار کمتر از انرژی گامای حاصل از فرآیند تسخیر نوترون است. بور ^{10}B از لیتیموم ^7Li ارزان تر بوده و دارای سطح مقطع 3840b است و با ضخامت کمی از آن می توان حفاظ خوبی برای نوترون ها تأمین کرد.



- فراوانی Li کم تر از B است و Q واکنش آن بیش تر است.

- هلیوم دارای سطح مقطع 5330b است ولی فوق العاده کمیاب است.

نکات:

- در نوترون ها نیز همانند فوتون ها می توان ضرایب مختلف را تعریف کرد مانند μ_{tr} و μ_{en} و ... چرا که برای محاسبه گرما و دز جذبی حاصل از نوترون ها به این ضرایب نیاز داریم.

- از آن جا که محتمل ترین برهمکنش بین نوترون های تند و مواد با عدد اتمی پایین، پراکندگی کشسان از نوع شکلی است که مانند برخورد گلوله های بیلیارد، برخورد سربه سر دارند و رابطه با پایستگی انرژی و اندازه حرکت به صورت زیر است:

$$E = E_0 \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2$$

جرم هسته پراکنده شده: M و جرم نوترون فرودی: m و انرژی نوترون پراکنده شده: E و انرژی نوترون فرودی: E_0

$$\text{انرژی انتقالی به هدف} = E_0 - E = E_0 \left[1 - \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \right]$$

- کسر متوسط انرژی نوترون فرودی که در خلال یک برخورد به هسته هدف منتقل می شود، چنین است:

$$f = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - e^{-\zeta} \quad \text{و} \quad -\zeta = \ln \frac{E}{E_0}$$

- رابطه‌ی بین انرژی‌ها و سطح مقطع‌های مختلف جذب نوترونی خواهد شد:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{E_0}{E}}$$

- فاصله طی شده توسط یک نوترون تند، از لحظه ورودش به محیط کندساز تا لحظه گرمایی شدن آن، به تعداد برخوردهای آن و مسافت بین برخوردها بستگی دارد. هر چند این مسیر پر پیچ و خم است لکن مقدار متوسط مستقیم نوترون را طول پخش تند یا طول کندسازی می‌گویند که قابل تعیین است. همچنین مسافت طی شده توسط نوترون تا لحظه جذب آن را طول پخش گرمایی می‌گویند.

3-4) اندرکنش‌های ذرات باردار (Charged- Particle Infractions):

هرچند که در این مجموعه به طراحی حفاظ در برابر فوتون‌ها و نوترون‌ها پرداخته می‌شود، آگاهی از بُرد ذرات باردار یون‌ساز به سه دلیل حائز اهمیت است:

(1) آثار پرتوها از جمله اثرات بیولوژیکی، شیمیایی و تغییرات ساختمانی ناشی از ذرات باردار هستند که در اثر اندرکنش نوترون‌ها و فوتون‌ها تولید می‌شوند.

(2) اندازه‌گیری نوترون و فوتون‌های گاما عمده‌تاً از طریق ذرات باردار ثانویه صورت می‌گیرد.

(3) دانستن بُرد ذرات باردار برای محاسبه ضخامت حفاظ لازم جهت توقف آن‌ها ضروری است.

به‌عنوان مثالی از اندازه‌گیری‌های نوترون می‌توان به آشکارسازی‌های سوسوزن، اتاقک یونش و BF_3 ... اشاره کرد که در هر کدام تولید ذرات باردار ناشی از اندرکنش‌های فوتونی و نوترونی منجر به تولید پالس‌های الکتریکی و در نتیجه ثبت آن‌ها می‌گردد.

در بحث مربوط به اندرکنش ذرات باردار به دو مفهوم اساسی اشاره می‌کنیم: برد¹ و توان توقف². ذرات باردار از طریق دو مکانیسم انرژی خود را از دست می‌دهند:

$$\left. \begin{array}{l} 1- برخورد مکانیکی (collisional) یا (coulombic interaction) \\ 2- برخورد پرتوایی (Radiational) یا (bremsstrahlung) \end{array} \right\} \text{مکانیسم‌های اتلاف انرژی در ذرات باردار}$$

¹ Range
² Stopping power

1- برخورد مکانیکی: در این مکانیسم، ذرات باردار با الکترون‌های مواد مسیر برخورد کرده و موجب تحریک و یونیزاسیون اتم‌های مسیر می‌شوند. یونش و برانگیزش اتم‌های هدف موجب تولید حرارت می‌شود که اگر برای ذرات باردار حفاظ طراحی می‌شود، الزاماً می‌بایست راهکارهایی برای دفع حرارت از حفاظ پیش‌بینی گردد.

2- برخورد (تشعشی) پرتوزایی: براساس تئوری الکترومغناطیسی کلاسیک، یک ذره باردار که دارای شتاب f است با سرعتی

متناسب f^2 ، امواج الکترومغناطیسی تابش خواهد کرد. برای یک ذره باردار با عدد اتمی z ، $f \propto \frac{z}{m}$ خواهد بود که m عبارت است

از جرم ذره، لذا سرعت تابش امواج متناسب $(\frac{z}{m})^2$ می‌باشد. از آن‌جا که سرعت تابش متناسب با $\frac{1}{m^2}$ است، از دست دادن انرژی

در اثر تابش برای هر ذره‌ای که سنگین‌تر از الکترون باشد، اهمیتی ندارد.

پرتوهای به‌وجود آمده در اثر عبور الکترون‌ها از ماده، به‌نام برماشترالونگ یا x ترمزی نامیده می‌شوند.

در برخورد ذرات باردار با ماده احتمال برخوردهای مکانیکی 99-98% و احتمال برخوردهای تشعشی حدود 1% است، به همین

دلیل تولید اشعه x در ماشین اشعه x است که زیرفصل‌های بعدی به آن می‌پردازیم.

با بیان انواع برهمکنش‌های ذرات باردار با ماده بهتر می‌توانیم دو مفهوم توان ایستاندگی و برد را توضیح دهیم.

3-4-1) مفاهیم اساسی در بررسی اندرکنش‌های ذرات باردار

(1) توان توقف (توان ایستاندگی) (Stopping power)

توان توقف معیاری از مقدار انرژی است که ذره باردار با حرکت در محیط هدف در طول مسیر از دست می‌دهد. اگر انرژی اولیه ذره

باردار را T_0 و واحد طول مسیر را نیز ds بنامیم، توان توقف به‌صورت $\frac{dT}{ds}$ تعریف می‌شود. از آن‌جا که با پیشروی ذره در محیط،

میزان انرژی آن کاسته شده، $\frac{dT}{ds}$ ماهیتاً یک کمیت منفی است. لذا یک منفی آن را ضرب می‌کنیم تا اندازه توان توقف در نهایت

مقدار مثبتی شود.

$$\text{توان توقف (ایستاندگی)} = -\frac{dT}{ds}$$

توان توقف به چگالی وابسته است. برای آن‌که توان توقف را مستقل از چگالی محیط تعریف کرد، آن را بر ρ تقسیم کرده و به این

کمیت توان ایستاندگی جرمی می‌گویند.

- از این طریق می‌توان دز ذرات باردار را محاسبه کرد به‌این ترتیب که توان توقف جرمی را در شارش ذرات ضرب کنیم، دز جذبی

حاصل می‌شود.

$$\text{دز} = \frac{\text{انرژی جذبی}}{\text{جرم}}$$

- تنها برای ذرات با انرژی بسیار کم که با هسته برخورد کولومبی می‌کنند، محیط متوقف‌کننده حائز اهمیت است.

(2) برد ذرات باردار (Ragne):

برد برای ذرات باردار تعریف می‌شود و به طول مسیری گفته می‌شود که ذره در محیط هدف طی می‌کند تا کاملاً متوقف شود. برای ذرات بدون بار مانند فوتون‌ها و نوترون‌ها برد تعریف نمی‌شود در مورد فوتون‌ها و نوترون‌ها پوشش آزاد، طول واهلش، طول پخش تند و طول پخش گرمایی تعریف می‌شود. در اندرکنش‌های فوتونی با به‌کارگیری ضخامت‌های مختلف می‌توان تنها تعداد آن‌ها را کاهش داد و در مورد آن‌ها تضعیف‌کننده مطرح می‌شود نه متوقف‌کننده. حال آن‌که در مورد ذرات باردار توقف به‌طور کامل صورت می‌گیرد.

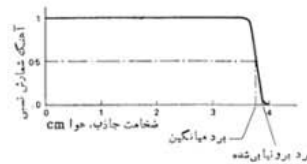
نکته مهم: دو تعریف متفاوت برای برد وجود دارد. یکی تعریف نادقیق برد که بیانگر تقریبی از برد است از آن‌جا که حرکت ذره باردار در محیط هدف، یک حرکت آماری است و در امتداد یک خط مشخص در محیط پیش نمی‌رود، در تعریف نادقیق آن تمام نقاط مسیرهای منحنی که ذره می‌پیماید را در نظر نمی‌گیرند. این مسیرها به‌خصوص در مورد ذرات سبک مانند پرتوها β حائز اهمیت است چرا که مسیرهای مارپیچ زیادی طی می‌کند تا متوقف شود در حالی که ذرات سنگین‌تر a کم‌تر حرکت‌های مارپیچ دارند و عمق نفوذ آن‌ها بسیار کم‌ترند و سریع‌تر هم متوقف می‌شوند. تعریف دقیق‌تر برد (Continues Slowing-Down Approximation) CSDA است با علامت \wedge نشان داده می‌شود که در ادامه بحث به تعریف هر دو مفهوم می‌پردازیم.

(3) بررسی برد ذرات سنگین با استفاده از تعریف نادقیق برد:

اگر ماده‌ای به ضخامت x در نظر بگیریم و N_0 ذره به آن بتابانیم و N ذره دریافت کنیم، منحنی زیر را به‌دست می‌آوریم. نمودار مقابل برای ذره α رسم شده است که یک ذره سنگین و تک‌انرژی است. هرچه ضخامت ماده جاذب بیشتر باشد، صرفاً انرژی ذراتی که از آن عبور می‌کنند، کاهش می‌یابد و تا زمانی که ضخامت به برد تقریبی نرسد، تعداد ذرات کاهش نمی‌یابند. از نقطه B تعداد ذرات شدیداً کاهش می‌یابد. دلیل آفت سریع این است که در این نقطه همه ذرات در اندرکنش با ماده شرکت می‌کنند و سرعت یکی پس از دیگری به توأم با انرژی آن به صفر رسیده، در این وضعیت ذره باردار در انتهای مرحله یونیزاسیون بوده، با یک ذره باردار دیگر ترکیب شده و خنثی می‌شود. لذا آفت شیب آن نسبت به ذرات β سریع‌تر است. دو مفهوم برد برای آن‌ها تعریف می‌شود:

(1) برد متوسط $\frac{N_0}{2}$ جایی است که در آن شدت ذرات باردار اولیه نصف می‌شود.

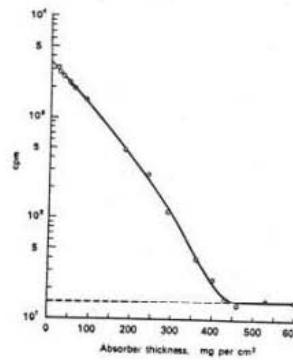
(2) برد برون‌یابی شده که از مابین دو انتهای A و B خطی می‌گذرانند و آن را امتداد می‌دهند.



تصویر (3-15)

(4) بررسی برد الکترون با استفاده از تعریف نادقیق برد:

همان طور که در شکل روبه‌رو دیده می‌شود، طیف الکترون‌ها تک انرژی نبوده و با افزایش ضخامت آن‌ها کاهش می‌یابد. مفهوم برد در جایی تعریف می‌شود که از آن پس هیچ کاهشی در آهنگ شمارش دیده نشود.



تصویر (3-16)

(5) مفهوم (Range straggling) & (Energy straggling)

Straggling به معنای افت و خیز در یک چیز یا نامشخص بودن آن، از آن جا که همه ذرات باردار به یک اندازه در ماده نفوذ نمی‌کنند و ماهیت آماری دارند لذا مفهوم (Range straggling) در مورد آن‌ها صدق می‌کند و در یک عمق مشخص نیز همه ذرات دارای یک انرژی یکسان نیستند. به این پدیده آماری (Energy straggling) اطلاق می‌شود.

اگر $\Lambda = \text{range}$ و $\left| \frac{dT}{ds} \right|$ را رسم کنیم، منحنی (3-17) حاصل می‌گردد که از یک مقدار اولیه‌ای شروع می‌شود، انرژی رفته رفته بر مقدار افزوده می‌شود تا جایی که به یک مقدار بیشینه می‌رسد. در این جا که انرژی ذره بسیار تقلیل یافته، خنثی می‌شود و

مجدداً $\frac{dT}{ds}$ کاهش می‌یابد. در ناحیه پس از پیک ناحیه‌ای است که ذره کم کم توانایی یونش محیط را از دست می‌دهد.

پیک برگ (brag peak) نقطه‌ای است که میزان یونش و برانگیزش در آن به مقدار بیشینه خود می‌رسد و آثار تخریبی ذرات باردار به اوج خود می‌رسد. لذا در پروتون تراپی از این پیک برای از بین بردن تومور استفاده می‌کنند.

پروتون تراپی یک روش (External therapy) است که از یک منبع خارج بدن بافت پرتو تابیده می‌شود و این در مقایسه با براکی

تراپی مطرح می‌گردد که منبع تولید پرتو در داخل بدن قرار می‌گیرد. برای آن که در پروتون تراپی بافت‌های اطراف تومور کم‌تر صدمه ببینند و پیک براگ تنها تومور را هدف‌گیری کند، به دو روش تابش پروتون‌ها صورت می‌گیرد:

- 1- از جهات مختلف به بافت توموری پرتو می‌تابانند تا بافت‌های سالم کم‌تر اشعه ببینند.
- 2- از درمان چند مرحله‌ای یا (fragmentation) استفاده می‌کنند. با این تصور که بافت‌های سالم قابلیت ترمیم بیش‌تری نسبت به بافت توموری دارند. بنابراین در طی هر مرحله به بافت‌های سالم فرصت ترمیم داده می‌شود، حال آن‌که بافت توموری با دریافت تدریجی دز از بین می‌رود چون قابلیت ترمیم خود را با گذشت زمان ندارد.

نکات مهم:

- توان توقف هم برای برخورد‌های مکانیکی (نرم) (collisional) تعریف می‌شود و هم برای برخورد‌های تشعشعی (سخت) (Radiative) که پیش از این شرح داده شدند:

$$L_{\text{tot}} = \left(\frac{-dT}{ds}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{-dT}{ds}\right)_{\text{coll}} + \left(\frac{-dT}{ds}\right)_{\text{rad}}$$

$$\Lambda = \int_0^{E_0} \frac{dE}{L_{\text{tot}}(E)}$$

- لازم به ذکر است که سهم بیش‌تر آن مربوط به برخورد نرم است که موجب یونش و برانگیزش می‌شود. لذا آن‌چه که در محاسبه

دز ذرات باردار مطرح می‌شود، $\left(\frac{dT}{ds}\right)_{\text{coll}}$ است.

- برای ذرات باردار سنگین مانند α و P در محدوده انرژی که مربوط به کار حفاظت در برابر پرتوهاست، تابش ترمزی رُخ نمی‌دهد.

تابش ترمزی برای ذرات باردار سبک مانند e^+ و e^- روی می‌دهد، چون انرژی پرتو معمولاً بیش‌تر از rest mass است. مقدار rest

mass الکترون 511keV است و انرژی‌های مورد بحث ما در حد 500keV تا چند ده MeV است. لذا در این محدوده انرژی با

ذرات سبک e^+ و e^- باید خطرات ناشی از تابش ترمزی لحاظ گردد.

(6) CSDA به‌عنوان مفهوم دقیق برد:

بیانگر مسافتی است که ذره می‌پیماید تا متوقف شود با فرض آن‌که ذره به‌طور پیوسته انرژی خود را به محیط منتقل کند.

به‌عبارت دیگر اگر مسیر انحناداری را برای ذره در نظر بگیریم و آن را به تکه‌های ds تقسیم کرده و برای محاسبه برد تک تک ds ها

را با هم جمع کنیم مقدار بیشینه‌ای (Max) تعریف می‌شود و حداکثر برد به‌دست می‌آید.

$$\Lambda_{\text{CSDA}} = \int_{T_0}^0 \frac{dT}{\left(\frac{-dT}{ds}\right)} = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\left(\frac{dT}{ds}\right)}$$

(2-4-3) اتلاف انرژی برخوردی (Collisional Energy Loss)

در این مجموعه انتقال انرژی خطی (LET) را با $L(E)$ نشان می‌دهیم که از دو جزء (برخوردی collisional) و تشعشعی (Radiative) تشکیل شده است. البته سهم عمده آن مربوط به $(\frac{dT}{ds})_{coll}$ است.

LET را می‌توان براساس سطح مقطع اندرکنش $\sigma(E, T)$ تعریف کرد و $\sigma(E, T) dT$ نیز سطح مقطع برای اندرکنش یک ذره برخوردی با انرژی E می‌باشد که در نتیجه آن هسته پس‌زنی شده و انرژی پس‌زنی هدف بین T و $T + dT$ می‌باشد. ضریب اندرکنش خطی $\mu(E, T)$ نیز محصولی از سطح مقطع میکروسکوپ $\sigma(E, T)$ است. بنابراین L در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(E) = \int_0^{T_{max}} dT T \mu(E, T)$$

برای بررسی نحوه انتقال انرژی ذره فرودی به محیط هدف، روابطی متوسط "Rutherford" و "Moller" و "Bhaba" مطرح شده است. در اندرکنش‌های الکترون- الکترون رابطه "Moller" ارجحیت دارد و "Bhaba" رابطه‌ای برای پوزیترون‌ها ارائه داده است.

$$\mu_{coll}(\epsilon, T) = \frac{2\pi N_e r_e^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{(\epsilon - \tau)^2} - \frac{2\epsilon + 1}{\tau(\epsilon - \tau)(\epsilon + 1)^2} \right]$$

ϵ : انرژی ذره فرودی

τ : انرژی الکترون پس‌زده شده

برای این که همه انرژی‌های از دست داده شده لحاظ گردد با انتگرال‌گیری خواهیم داشت: (Bethe)

$$L_{coll}(\epsilon) = 2\pi z^2 N_e m_e c^2 r_e^2 \frac{1}{\beta^2} \int_0^{\tau_{max}} d\tau \tau [\tau^{-2} + L]; \frac{\rho Z z^2 C}{A \beta^2} f(\tau_{max}, \bar{I}),$$

در رابطه Bethe. $C = 4\pi N_e r_e^2 m_e c^2 = 0.30705 \text{ cm}^2 \text{ MeV mol}^{-1}$ و $\bar{I} \equiv \frac{I}{m_e c^2}$: انرژی متوسط برانگیختگی

$$\tau_{max} = \begin{cases} \epsilon / 2 & \text{for electron collisions,} \\ \epsilon & \text{for positron collisions} \\ 2\beta^2 / (1 - \beta^2) & \text{for nonrelativistic heavy particles.} \end{cases}$$

مقادیر I از جدول (3-5) قابل استفاده از. روابط تقریبی نیز از طرف افرادی چون برگر ارائه شده است که به دلیل محدودیت کاربرد برای محدوده Z از ذکر آن صرف نظر می‌کنیم.

جدول (5-3)

Material	Form	I (eV)	Material	Form	I (eV)
H	saturated bond	19.0	H ₂	gas	19.2
H	unsaturated bond	16.0	N ₂	gas	82.0
C	saturated bond	81.1	O ₂	gas	95.0
C	unsaturated bond	79.8	CO ₂	gas	85.0
C	highly chlorinated	69.0	Air	dry	85.7
N	amines, nitrates, etc.	105.7	Water	gas	71.6
N	in rings	81.9	Water	liquid	75.0
O	-O-	104.6	Tissue	ICRU muscle	74.7
O	=O	94.4	Bone	ICRU compact	91.9

Source: ICRU [1984].

برای عناصر مرکب مقدار I از روابط زیر به دست می آید:

$$(Z/A) = \sum_j \omega_j \left(\frac{Z_j}{A_j} \right)$$

$$\ln I = (Z/A)^{-1} \sum_j \omega_j \left(\frac{Z_j}{A_j} \right) \ln I_j$$

مقدار L_{coll} برای ذرات باردار سنگین نیز از این رابطه به دست می آید:

$$L_{coll}(E) = \frac{\rho Z Z^2 C}{A \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2\beta^2}{(1-\beta^2)\bar{I}} \right) - \beta^2 \right]$$

مقدار L_{coll} برای پوزیترون ها و الکترون ها که ($Z=1$) سطح مقطع ها "Bhoba" و "Moller" به روابط زیر منتهی می شود:

$$L_{coll}(E) = \frac{\rho Z C}{2A \beta^2} \left[2 \ln(\epsilon/I) + \ln(1 + \epsilon/2) + F^\pm(\epsilon) - \delta \right]$$

The factor F^{-1} for electrons is given by

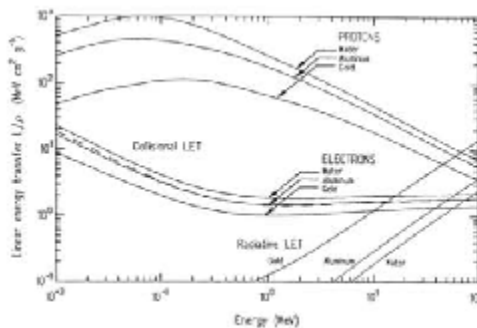
$$F^{-1}(\epsilon) = 2 \ln 2 - (\beta^2/12) \left[23 + 14/(\epsilon+2) + 10/(\epsilon+2)^2 + 4/(\epsilon+2)^3 \right]$$

The factor F^+ for positrons is given by

$$F^+(\epsilon) = 2 \ln 2 - (\beta^2/12) \left[23 + 14/(\epsilon+2) + 10/(\epsilon+2)^2 + 4/(\epsilon+2)^3 \right]$$

δ اثر تصحیح دانسیته است که منجر به کاهش L_{coll} می شود. δ برای آن است که میزان قطبش¹ اتم های ماده هدف، در L_{coll} منظور شده و از آن کسر شود چرا که عبور الکترون ها موجب این قطبش می گردد و در نتیجه آن میدان الکتریکی مؤثر در حرکت الکترون کاهش یافته، بنابراین توان ایستاندگی نیز کاهش می یابد. مقدار انتقال انرژی در واحد جرم در نمودار (3-17) رسم شده است.

¹ Polarization



تصویر (3-17) مقدار انتگرال انرژی خطی برحسب واحد جرم

3-4-3) توان توقف محدود شده الکترون (Restricted Electron Stopping Power):

برهمکنش بین میدان‌های ناشی از ذره الکترون فرودی و الکترون‌های مداری محیط جاذب باعث یونش و برانگیزش الکترون‌ها می‌شود. میزان آفت انرژی ذره بتا به فاصله نزدیکی آن با الکترون و انرژی ذره بتا دارد. انرژی جنبشی الکترون حاصل تفاضل ذره فرودی و پتانسیل یونش محیط جاذب است. در بسیاری از این برخوردهای یوننده فقط یک زوج یون تبدیل می‌شود. در موارد دیگر الکترون پرتاب شده، ممکن است آن قدر انرژی داشته باشد که خوشه کوچکی از چندین یونش تشکیل شود. در اندکی از موارد برخورد، الکترون پرتاب شده ممکن است تا آن حد انرژی جنبشی کسب کند که بتواند فاصله‌ای طولانی بپیماید و از موضع مورد بررسی خارج شود. چنین الکترون‌هایی را که انرژی جنبشی آن‌ها ممکن است از مرتبه 1000eV باشد، پرتو دلتا می‌نامند.

بنابر قرارداد آن را با Δ نشان می‌دهند و برای دلتا انرژی آستانه‌ای 200eV را در نظر می‌گیرند. به عبارت دیگر اگر ذره ثانویه‌ای دارای انرژی بیش‌تر از این بود، انرژی حاصل از آن را به عنوان انرژی جذب شده در آن ناحیه در نظر نمی‌گیریم. این ذرات ثانویه را در شارش منظور می‌نمائیم. بنابه مطالب فوق این نتیجه حاصل می‌شود که در محاسبه توان توقف $\left(\frac{dT}{dN}\right)$ تنها انرژی ذرات ثانویه

زیر 200eV در نظر گرفته می‌شود که به این $L = \frac{dT}{dN}$ ، L_{Δ} که به آن توان ایستاندگی محدود شده گویند. (در انتگرال‌گیری

تا انرژی Δ محاسبه می‌شود و حد بالای آن مانند L ، مقدار بیشینه انرژی بتا τ_{\max} نیست.)

3-4-4) تخمینی از برد الکترون‌ها در ماده:

یکی از فرمول‌های تقریبی که بر روی برد الکترون‌ها ارائه شده، به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{توان توقف الکترون‌ها} : \frac{-dT}{ds} \cong \frac{\rho T^{1-n}}{n\delta}$$

$$\rho\Lambda = \int \frac{ds}{-dT}$$

برد الکترون‌ها

برای محاسبه برد الکترون‌ها، δ و n از جدول (6-3) انتخاب می‌شود. به دلیل استقلال از ρ هر مقداری را می‌توان برای چگالی آن در نظر گرفت.

جدول (6-3)

Element	N	δ
H	1/32	0/155
Ca	1/32	0/356
Al	1/32	0/400
Pb	1/32	0/640
H ₂ O	1/32	0/356
Tissue	1/32	0/353

مثال: حداکثر برد الکترون‌های ثانویه ناشی از فوتون‌های کبالت در آب چه قدر است؟ (فرض: انرژی انتقالی به الکترون 1/17 MeV و 1/33 MeV است)

1/33 MeV را در روابط قرار می‌دهیم تا حداکثر برد برای الکترون‌ها اعمال شود.

$$\rho\Lambda(\text{H}_2\text{O}) = 0/356 * 1/33^{1/32}$$

$$\text{If } \rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\Lambda = 0/5 \text{ cm}$$

فرمول تقریبی دیگر چنین تعریف می‌شود:

$$y = a + bx + cx^2$$

$$x = \log_{10} E_0 \quad \text{و} \quad y = \log_{10} \rho\Lambda$$

مقادیر b و a از جدول (7-3) به دست می‌آید.

جدول (7-3) مقادیر ثابت فرمول تقریبی برد

Material	Protons			Electrons		
	a	b	c	a	b	c
Aluminum	-2.3829	1.3494	0.19670	-0.27957	1.2492	-0.18247
Iron	-2.2262	1.2467	0.22281	-0.23199	1.2165	-0.19504
Gold	-1.8769	1.1664	0.20658	-0.13552	1.1292	-0.20889
Air	-2.5207	1.3729	0.21045	-0.33545	1.2615	-0.18124
Water	-2.5814	1.3767	0.20954	-0.38240	1.2799	-0.17378
Tissue ^a	-2.5839	1.3851	0.20710	-0.37829	1.2803	-0.17374
Bone ^b	-2.5154	1.3775	0.20466	-0.33563	1.2661	-0.17924

^a Striated muscle (ICRU).

^b Cortical bone (ICRP).

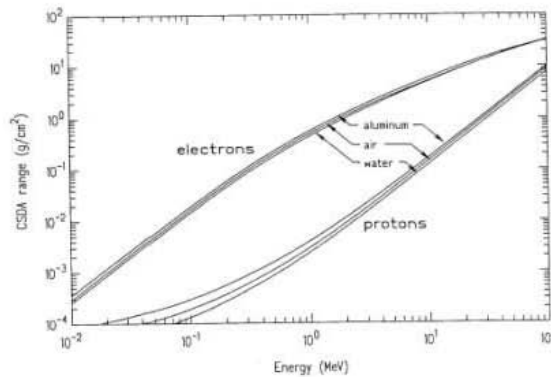
Source: Based on calculations using the ESTAR code [Berger 1992].

پاسخ مسئله قبل از طریق این رابطه چنین به دست می آید:

$$y = (-0/38240) + 1/2799(\log_{10} 1/33) + (-0/17378)(\log_{10} 1/33)^2 = 0/5935$$

همان طور که مشاهده می شود پاسخ به دست آمده از هر دو رابطه تقریباً در یک محدوده است. البته این رابطه پاسخ دقیق تری نسبت به رابطه تقریبی قبلی ارائه می دهد.

این رابطه برای الکترون ها و پروتون ها قابل استفاده است و برد CSDA از آن حاصل می شود. مقدار برد برای انرژی های 0/01–100MeV در تصویر (3-18) مشاهده می گردد.



تصویر (3-18) برد CSDA در واحد جرم رسم شده است. داده های الکترون بر از (ICRU(1980) و داده های پروتون از Janni (1982) ارائه شده است.

فصل چهارم: چشمه‌های پرتوی متداول در حفاظسازی

گام نخست در طراحی، شناخت پرتو، توزیع انرژی و شدت آن است. ممکن است چنین اطلاعاتی در ابتدای طراحی در دسترس نباشد؛ در این گونه موارد طراح حفاظ باید با آگاهی از ماهیت فیزیکی منشأ میدان پرتو تخمین‌هایی بزند. توصیف جزئیات و محاسبات برای چشمه‌های پرتو می‌تواند کاملاً پیچیده باشد. در هر حال معمولاً تنها با یک توصیف تقریبی از میدان پرتو می‌توان طراحی اولیه را انجام داد.

به‌طور کلی آن‌چه را که باید در مورد چشمه‌ها به‌طور دقیق یا تقریبی بدانیم به‌شرح زیر می‌باشد:

- نوع پرتو: انواع پرتوهایی که یک چشمه یا ترکیبی از چشمه‌ها ساطع می‌کنند که می‌تواند γ ، α ، β و ... و یا ترکیبی از این‌ها باشد. در ضمن این مسئله هم باید در نظر گرفت که پرتوها در طی یک مرحله یا چند مرحله تولید شده‌اند.

- شدت چشمه: شدت چشمه‌های پرتوی را می‌توان برحسب اکتیویته بیان کرد.

- توزیع انرژی یا طیف انرژی پرتوها: طیف انرژی پرتوها در چه انرژی‌هایی دارای مقدار بیشینه¹ است و یا پُرانرژی‌ترین آن‌ها کدام انرژی رُخ می‌دهد و ...

- توزیع فضایی: پرتوها به‌صورت باریکه یا صفحه در فضا توزیع می‌شوند.

- توزیع زاویه‌ای: جهت و راستای پرتوها حائز اهمیت است.

سه نوع چشمه اصلی که ما در این مجموعه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم، شامل چشمه‌های نوترون، چشمه‌های فوتون، چشمه‌های اشعه‌ی X می‌باشد و در هر زیر فصل انواع هر یک را شرح می‌دهیم.

1-4) چشمه‌های نوترون:

انواع برهمکنش‌هایی که منجر به تولید نوترون می‌شوند، عبارتند از:

(1) نوترون‌های حاصل از پاره‌های شکافت²

(2) فوتون‌نوترون‌ها³

(3) نوترون‌های حاصل از برهم‌کنش‌های⁴ (α, n)

(4) نوترون‌های فعالسازی¹

¹ Peak

² Fission Neutrons

³ Photoneutrons

⁴ - Neutrons from (α, n) Reactions

(5) نوترون‌های همجوشی²

(1-1-4) نوترون‌های حاصل از پاره‌های شکافت (Fission Neutrons)

بسیاری از پاره‌های سنگین شکافت پس از جذب نوترون یا حتی به‌طور خودبه‌خودی نوترون‌های پرانرژی ناشی از شکافت ایجاد می‌کنند. ممکن است نوترون‌های حاصل از شکافت به‌عنوان منابع ثانویه‌ی تشعشع باشند که این تشعشعات ثانویه می‌توانند فوتون‌های پراکندگی ناکشسان یا فوتون‌های گامای حاصل از گیراندازی باشند. همچنین امکان تبدیل ایزوتوپ‌های پایدار به نوع رادیواکتیو نیز وجود دارد. تمام نوترون‌های سریع حاصل از یک فرایند شکافت، در فاصله زمانی 10^{-14} s در حین شکافت تولید می‌شوند. تنها تولید کسر کوچکی از نوترون‌های حاصل از پاره‌های شکافت به‌صورت نوترون‌های تأخیری³ هستند که چندین ثانیه یا چند دقیقه پس از فرایند شکافت و از طریق واپاشی محصولات شکافت حاصل می‌گردند. جز در شرایط بسیار خاص، نوترون‌های تأخیری دارای انرژی بسیار کم‌تری نسبت به نوترون‌های آنی ناشی از شکافت هستند و به‌دلیل انرژی کم و پایین بودن بهره تولید این نوترون‌ها، در حفاظت‌سازی مهم تلقی نمی‌شوند.

در پاره‌های سنگین شکافت، اکثر نوترون‌ها با انرژی بیش‌تر تولید خواهند شد. در جدول (1-4) بهره میانگین تولید نوترون‌ها ($\bar{\nu}$) برای پنج هسته قابل شکافت مهم آورده شده است که به‌طور خطی با انرژی E_n نوترون حاصل از شکافت متناسب هستند.

جدول (1-4)

Nuclide	$\bar{\nu}(E_n)$	E_n range (MeV)
²³⁵ U	$\bar{\nu} = 2.432 + 0.066E_n$	$0 \leq E_n \leq 1$
	$\bar{\nu} = 2.349 + 0.150E_n$	$1 < E_n < 15$
²³⁹ Pu	$\bar{\nu} = 2.867 + 0.148E_n$	$0 \leq E_n \leq 1$
	$\bar{\nu} = 2.907 + 0.133E_n$	$1 < E_n < 15$
²³³ U	$\bar{\nu} = 2.482 + 0.075E_n$	$0 \leq E_n \leq 1$
	$\bar{\nu} = 2.412 + 0.136E_n$	$1 < E_n < 15$
²³⁸ U	$\bar{\nu} = 2.304 + 0.160E_n$	$1.5 \leq E_n < 15$
²³² Th	$\bar{\nu} = 1.873 + 0.164E_n$	$1.4 \leq E_n < 15$

Source: Keepin [1965]; by permission of G. Robert Keepin.

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بهره تولید نوترون در Pu با افزایش انرژی افزایش می‌یابد و به‌همین دلیل برای کاربرد صلح‌آمیز انرژی هسته‌ای یکی از مناسب‌ترین عناصر است. از آن‌جا که در این برهمکنش‌ها تعدادی نوترون به‌طور خودبه‌خودی به‌وجود می‌آیند، بشر توانسته است به واکنش‌های زنجیره‌ای خودنگهدار (Self sustain) دست یابد. در راکتورها تعدادی نوترون آزاد شده، و جذب هسته‌های شکافت‌پذیر می‌شوند. تنظیمات به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد تا جذب و نشر نوترون‌ها منجر به تولید شکافت تکراری شده و زنجیره تولید نوترون‌ها ادامه یابد.

¹ Activation Neutrons

² Fusion Neutrons

³ Delayed Neutrons

ویژگی‌های ایزوتوپ‌هایی که به‌طور خودبه‌خودی شکافت می‌کنند، در جدول (2-4) آمده است. در همه‌ی این ایزوتوپ‌ها سهم α حاصل از شکافت بیش‌تر از سهم نوترون‌های حاصل از شکافت است. همان‌طور که در جدول (2-4) مشاهده می‌شود. در ^{252}Cf به‌ازای هر 35 شکافت، 31 عدد α تولید شده و در $3/73$ شکافت منجر به تولید نوترون می‌گردد.

جدول (2-4)

Nuclide	Half-life	Fission prob. per decay (%)	Neutrons per fission	α per fission	Neutrons per (g s)
^{233}U	$1.59 \times 10^5 \text{ y}$	1.3×10^{-10}	1.76	7.6×10^{11}	8.6×10^{-4}
^{235}U	$7.04 \times 10^8 \text{ y}$	2.0×10^{-7}	1.86	5.0×10^8	3.0×10^{-4}
^{238}U	$4.47 \times 10^9 \text{ y}$	5.4×10^{-5}	2.07	1.9×10^6	0.0136
^{237}Np	$2.14 \times 10^6 \text{ y}$	2.1×10^{-12}	2.05	4.7×10^{11}	1.1×10^{-4}
^{236}Pu	2.85 y	8.1×10^{-6}	2.23	1.2×10^9	3.6×10^4
^{238}Pu	87.7 y	1.8×10^{-7}	2.28	5.4×10^8	2.7×10^3
^{239}Pu	$2.41 \times 10^4 \text{ y}$	4.4×10^{-10}	2.16	2.3×10^{11}	2.2×10^{-2}
^{240}Pu	6569 y	5.0×10^{-6}	2.21	2.0×10^7	920
^{241}Pu	14.35 y	5.7×10^{-13}	2.25	4.3×10^9	0.05
^{242}Pu	$3.76 \times 10^5 \text{ y}$	5.5×10^{-4}	2.24	1.8×10^5	1.8×10^3
^{244}Pu	$8.26 \times 10^3 \text{ y}$	0.125	2.28	8.0×10^2	1.9×10^3
^{241}Am	433.6 y	4.1×10^{-10}	3.22	2.4×10^{11}	1.18
^{242}Cm	163 d	6.8×10^{-6}	2.70	1.5×10^7	2.3×10^7
^{244}Cm	18.11 y	1.3×10^{-4}	2.77	7.5×10^5	1.1×10^7
^{246}Cm	4730 y	0.0261	2.86	3.8×10^3	8.5×10^6
^{248}Cm	$3.39 \times 10^5 \text{ y}$	8.26	3.14	11	4.1×10^{12}
^{250}Cm	6900 y	61.0	3.31	0.40	1.6×10^{10}
^{249}Bk	320 d	4.7×10^{-8}	3.67	3.1×10^4	1.1×10^5
^{246}Cf	35.7 h	2.0×10^{-4}	2.83	5.0×10^5	7.5×10^{10}
^{248}Cf	333.5 d	2.9×10^{-3}	3.00	3.5×10^4	5.1×10^9
^{249}Cf	350.6 y	5.2×10^{-7}	3.20	1.9×10^8	2.5×10^3
^{250}Cf	13.08 y	0.077	3.49	1.3×10^3	1.1×10^{10}
^{252}Cf	2.638 y	3.09	3.73	31	2.3×10^{12}
^{254}Cf	60.5 d	99.69	3.89	0.0031	1.2×10^{15}
^{253}Es	20.47 d	8.7×10^{-6}	3.70	1.2×10^7	3.0×10^8
^{254}Fm	3.24 h	0.053	4.00	1.9×10^3	3.0×10^{14}

Sources: Data from Dillman [1980], Koehler [1981], and Reilly et. al. [1991].

همه هسته‌های قابل شکافت گستره‌ای از نوترون‌ها با انرژی متفاوت تولید می‌کنند که می‌توان توزیع انرژی آن‌ها را به‌صورت طیفی نمایش داد که از انرژی‌های کم شروع شده و به‌مقدار بیشینه‌ای حدود $0/7\text{MeV}$ می‌رسد. کسر انرژی ساطع شده از نوترون‌های آبی شکافت را با E و توزیع انرژی را با $\chi(E)$ نشان می‌دهند که آن را «خی¹» می‌نامند و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\chi(E) = \frac{e^{-(E+E_{\omega})/T_{\omega}}}{\sqrt{\pi E_{\omega} T_{\omega}}} \sinh \sqrt{\frac{4E_{\omega} E}{T_{\omega}^2}}$$

به آن توزیع Watt هم گفته می‌شود و هنگامی که $E_{\omega} \rightarrow 0$ به توزیع ماکسول مبدل خواهد شد و با این رابطه نشان می‌دهند:

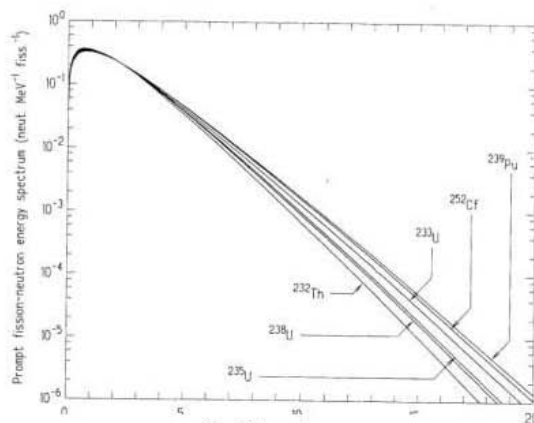
$$\chi(E) = a e^{-E/b} \sinh \sqrt{cE}$$

$$a \equiv e^{-E_{\omega}/T_{\omega}} / \sqrt{\pi E_{\omega} T_{\omega}} \quad \text{و} \quad b \equiv T_{\omega} \quad \text{و} \quad c \equiv 4E_{\omega} / T_{\omega}^2$$

پارامترهای این رابطه در جدول 3-4 آورده شده است.

جدول (3-4)

Nuclide	Type of fission	Eq. (4.1)		Eq. (4.2)		
		T_w	E_w	a	b	c
^{233}U	thermal	0.3870	1.108	0.6077	1.1080	1.2608
^{235}U	thermal	0.4340	1.035	0.5535	1.0347	1.6214
^{239}Pu	thermal	0.4130	1.159	0.5710	1.1593	1.2292
^{232}Th	fast (2 MeV)	0.4305	0.971	0.5601	0.9711	1.8262
^{238}U	fast (2 MeV)	0.4159	1.027	0.5759	1.0269	1.5776
^{252}Cf	spontaneous	0.359	1.175	0.6400	1.1750	1.0401



تصویر (1-4)

مقدار بیشینه پیک برای عناصر مختلف در نمودار (1-4) دیده می‌شود.

2-1-4 فوتونوترونها (Photoneutrons)

هنگامی که فوتون‌های گاما به اندازه کافی پرانرژی باشند که بتوانند بر انرژی پیوندی نوترون در هسته (در بیش‌تر هسته‌ها 7 MeV) غلبه کنند، برهمکنش (γ, n) ایجاد می‌شود. تولید شدید فوتونوترونها معمولاً در شتابدهنده‌های الکترونی روی می‌دهد. در این شتابدهنده‌ها ماده هدف تحت بمباران الکترون‌های پرانرژی قرار می‌گیرند و در اثر آن پرتوهای برمزاشرالونگ پرانرژی تولید می‌کنند که گستره توزیع انرژی آن به انرژی الکترون‌های اولیه می‌رسد. سطح مقطع تولید فوتونوترون با افزایش انرژی فوتون تا برد بیشینه الکترون در حد چند میلی‌بارن است. محدوده آن، برای انرژی‌ها چنین است:

$$\left. \begin{array}{l} \text{هسته‌های سبک: } 20\text{-}30 \text{ MeV} \\ \text{هسته‌های متوسط و سنگین: } 13\text{-}18 \text{ MeV} \end{array} \right\}$$

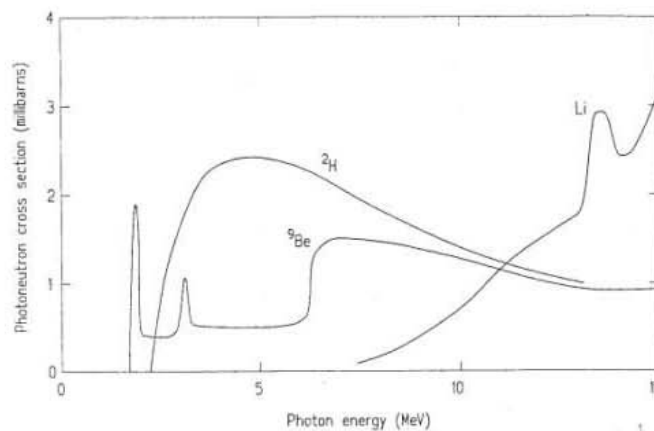
در هر حال برای شتابدهنده‌هایی که فوتون با انرژی حدود 15 MeV تولید می‌کنند، تولید نوترون در دیوارهای اطراف می‌تواند

منجر به تولید میدان‌های نوترونی شود. در آنالیز حفاظ، فوتون‌های گامای تولید شده بسیار کم‌انرژی هستند و بیش‌تر مواد آستانه‌ی فوتونوترون بسیار بالا برای تولید فوتونوترون دارند. تنها برای عناصر بسیار سبکی که در جدول (4-4) فهرست شده‌اند، آستانه تولید فوتونوترون آن‌قدر پایین است که می‌بایست نوترون‌های ثانویه را در نظر گرفت.

جدول (4-4)

Nuclide	Threshold E_t (MeV) ($-Q$ value)	Reaction
^2H	2.225	$^2\text{H}(\gamma, n)^1\text{H}$
^6Li	3.698	$^6\text{Li}(\gamma, n + p)^4\text{He}$
^6Li	5.664	$^6\text{Li}(\gamma, n)^5\text{Li}$
^7Li	7.251	$^7\text{Li}(\gamma, n)^6\text{Li}$
^9Be	1.665	$^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$
^{13}C	4.946	$^{13}\text{C}(\gamma, n)^{12}\text{C}$

تعدیل‌کننده‌های آب سنگین یا برلیومی رآکتورها، منابع فوتونوترون قابل توجهی هستند و اغلب عمق میدان نوترون را در یک حفاظ هیدروژنی توسط تولید فوتونوترون در دوتریوم تعیین می‌کنند که میزان فراوانی آن 15% هیدروژن است. همچنین فوتون‌های گیراندازی گاما که در اثر جذب نوترون به‌وجود آمده‌اند نیز پراثری هستند و لذا می‌توانند منجر به تولید فوتونوترون‌ها شوند. همان‌طور که در جدول (4-4) هم مشاهده می‌شود، واکنش‌های تولید فوتونوترون برای انجام نیاز به انرژی اولیه دارند. میزان انرژی آستانه یک واکنش بر می‌گردد به‌میزان اشباع نوترونی یک عنصر. مثلاً فوتون‌های دارای انرژی آستانه $2/225\text{MeV}$ می‌توانند به‌راحتی از عنصر دوتریم یک نوترون جدا کند حال آن‌که به ^7Li مقدار $7/251\text{MeV}$ انرژی باید صرف کرد تا بتوان نوترون آن را جدا نمود یا به‌عبارت دیگر انرژی جداسازی (Separation Energy) آن بالاست. در ^7Li هسته تا حدودی به اشباع رسیده و پایدارتر شده است. نمودار 2-4 سطح مقطع تولید فوتونوترون را برای عناصر مختلف رسم نموده است.



تصویر (2-4)

لازم به ذکر است که چشمه‌هایی که در آن‌ها برهمکنش‌های (γ, n) روی می‌دهد، دارای یک هسته مرکزی از عنصر ماده

ساطع کننده ی γ است و عنصر هدف که در اثر برخورد γ نوترون می‌دهد، در اطراف آن قرار دارد.

4-1-3) نوترون‌های حاصل از برهمکنش‌های (α, n) (Neutrons from (α, n) Reactions)

با استفاده از ذرات آلفای ساطع شده از رادیوایزوتوپ‌های مختلف می‌توان برهمکنش‌های (α, n) در موارد مناسب ایجاد کرد.¹ با وجود آن‌که هسته‌های زیادی وجود دارند که در اثر بمباران ذرات آلفای پرنرژی، نوترون ساطع می‌کنند، اما به‌طور کلی انرژی ذرات آلفا ناشی از رادیوایزوتوپ‌ها تنها قابلیت نفوذ به سدهای پتانسیلی هسته‌های سبک را دارند و به‌عبارت دیگر عمق نفوذ کمی دارند لذا قبل از این‌که در سطح جذب شوند، می‌بایست آن‌ها را در تماس با هسته‌های ساطع کننده نوترون قرار داد. برای این‌کار هسته‌های آلفا دهنده‌ای مانند امرسیوم Am را پودر کرده و با هسته‌های سبکی چون برلیوم Be مخلوط می‌کنند. با این‌کار ذرات آلفادهنده و جاذب آلفا لابلای یکدیگر قرار می‌گیرند و پیش از آن‌که ذرات آلفا انرژی خود را از دست بدهند و قابلیت نفوذ به سد پتانسیلی عنصر سبک را نداشته باشند، با هسته‌های سبک برخورد می‌کنند. به‌عبارت دیگر ذره آلفا تولید شده بلافاصله در مجاورت هسته جاذب قرار گرفته و پیش از آن‌که انرژی آلفا از دست برود، با هسته سبک واکنش کرده و نوترون ساطع می‌کند، به‌این ترتیب بازدهی تولید نوترون افزایش می‌یابد.

جدول (4-5)

Target	Natural abundance (%)	Reaction	Reaction energy (MeV) (Q value)	Threshold energy (MeV)	Coulomb barrier (MeV)
⁶ Li	7.5	⁶ Li(α, n) ⁹ B	-3.975	6.620	2.1
⁷ Li	92.5	⁷ Li(α, n) ¹⁰ B	-2.790	4.382	2.1
⁹ Be	100	⁹ Be(α, n) ¹² C	5.702	exothermic	2.6
⁹ Be	100	⁹ Be(α, n) ³ α	-1.573	2.272	2.6
¹⁰ B	19.8	¹⁰ B(α, n) ¹³ N	1.060	exothermic	3.2
¹¹ B	80.2	¹¹ B(α, n) ¹⁴ N	0.157	exothermic	3.2
¹³ C	1.11	¹³ C(α, n) ¹⁶ O	2.215	exothermic	3.7
¹⁷ O	0.04	¹⁷ O(α, n) ²⁰ Ne	0.587	exothermic	4.6
¹⁸ O	0.2	¹⁸ O(α, n) ²¹ Ne	-0.697	0.852	4.6
¹⁹ F	100	¹⁹ F(α, n) ²² Na	-1.950	2.361	5.1
²³ Na	100	²³ Na(α, n) ²⁶ Al	-2.967	3.484	6.0
²⁵ Mg	10.0	²⁵ Mg(α, n) ²⁸ Si	2.653	exothermic	6.4
²⁶ Mg	11.0	²⁶ Mg(α, n) ²⁹ Si	0.033	exothermic	6.3
²⁷ Al	100	²⁷ Al(α, n) ³⁰ P	-2.638	3.029	6.8

در جدول 4-5 نیز پاره‌ای از واکنش‌های (α, n) آورده شده است. ⁹Be پس از برهمکنش با یک آلفا به ¹²C تبدیل شده و به‌همراه آن یک نوترون آزاد می‌شود.

¹ به رادیوایزوتوپ‌هایی که آلفا ساطع می‌کنند، emitter و به موادی که در اثر برخورد α ، نوترون تولید می‌کنند، converter گویند.

جدول (6-4)

Source	Half-life	Principal alpha energies (MeV)	Average neutron energy (MeV)	Optimum neutron yield per 10^6 primary alphas ^a
$^{210}\text{Po} / \text{Li}$	138.4 d	5.305	0.48	1.3
$^{239}\text{Pu} / \text{Be}$	24100 y	5.155, 5.143, 5.105	4.6	60
$^{210}\text{Po} / \text{Be}$	138.4 d	5.305	4.5	70
$^{238}\text{Pu} / \text{Be}$	87.8 y	5.499, 5.457, 5.358	4.5	80
$^{241}\text{Am} / \text{Be}$	432 y	5.486, 5.443, 5.388	4.4	75
$^{244}\text{Cm} / \text{Be}$	18.1 y	5.805, 5.763	4.3	100^b
$^{242}\text{Cm} / \text{Be}$	163 d	6.113, 6.070	4.1	110
$^{226}\text{Ra} / \text{Be}$	1600 y	7.687, 6.003, 5.490	3.9	500^c
+ daughters		5.304, 4.785, 4.602		
$^{227}\text{Ac} / \text{Be}$	21.8 y	7.386, 6.819, 6.623	3.9	700^c
+ daughters		6.038, 5.960, 5.715		
$^{241}\text{Am} / \text{B}$	432 y	5.486, 5.443, 5.388	3	13
$^{210}\text{Po} / \text{C}$	138.4 d	5.305		0.10
$^{241}\text{Am} / \text{F}$	432 y	5.486, 5.443, 5.388	1.5	4.1
$^{210}\text{Po} / \text{F}$	138.4 d	5.305		5
$^{210}\text{Po} / \text{Na}$	138.4 d	5.305		1

^a Yield for alpha particles incident on a target thicker than the alpha-particle ranges.

^b Does not include a 4% contribution from the spontaneous fission of ^{244}Cm .

^c Yield is dependent on the proportion of daughters present. Value for ^{226}Ra corresponds to a 22-year-old source (50% contribution for ^{210}Po).

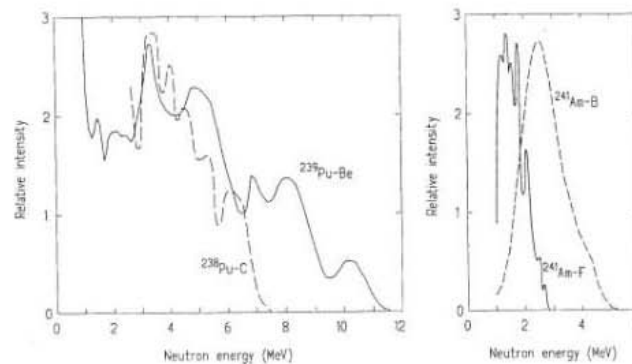
Sources: Jaeger [1968], GPO [1970], and Knoll [1989].

ویژگی‌های برخی از منابع در جدول (6-4) موجود می‌باشد.

از روی داده‌های جدول، بهره تولید نوترون به‌ازای هر 10^6 آلفا، 75 است. لذا اگر چشمه‌ای داشته باشیم که میزان فعالیت آن 5Ci باشد، کل نوترون‌های آن عبارتند از:

$$5\text{Ci} * 3/7 * 10^{10} * \frac{75}{10^6} = 1/4 * 10^4 \text{ n/s}$$

طیف پلکانی که در تصویر (3-4) نشان داده شده است، بیانگر حالت رزونانسی طیف است.

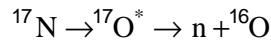


تصویر (3-4)

4-1-4) نوترون‌های فعال‌سازی (Activation Neutrons):

مواد رادیواکتیو طبیعی، ذرات α ، β ، γ می‌دهند و به‌جز در واکنش‌های خودبه‌خودی حاصل از شکافت، هیچ‌کدام از مواد

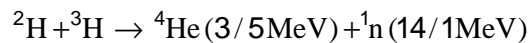
رادیواکتیو طبیعی نوترون ساطع نمی‌کنند. اما به‌طور طبیعی ایزوتوپ‌هایی می‌توان تولید کرد که در مدهای واپاشی نوترون تابش کنند. یکی از این واکنش‌ها (n,p) است. در بین هسته‌ها ^{17}N در بحث حفاظت‌سازی حائز اهمیت است. این ایزوتوپ در آب خنک‌کننده رآکتورها¹ توسط واکنش (n,p) تولید می‌شود. آب خنک‌کننده رآکتورها حاوی ^{17}O (با انرژی آستانه 8MeV و سطح مقطع $5/2\mu\text{b}$) است لذا واپاشی $^{17}\text{N}(n,p)^{17}\text{O}$ ایجاد می‌شود. ^{17}N دارای نوترون زیاد است چرا که انتظار می‌رود 14 نوترون داشته باشد. بنابراین سه نوترون اضافی دارد. در نتیجه به اکسیژن برانگیخته تبدیل شده و در نهایت اکسیژن برانگیخته نیز با آزاد کردن یک نوترون به حالت پایه برمی‌گردد.



انرژی آستانه نوترون اولیه باید 8MeV باشد تا این واکنش انجام شود. برای این نوترون‌های ثانویه تولیدی در لوله آبی که از قلب رآکتور به بیرون حاصل می‌شود، با انرژی $1 \pm 0/2\text{MeV}$ ، حفاظ ثانویه طراحی می‌شود.

4-1-5) نوترون‌های همجوشی (Fusion Neutrons):

دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب شده و حاصل این ترکیب نوترون و هسته سنگین‌تر است. در قسمت زیر دو نمونه از این واکنش‌ها نوشته شده است:



نوترون‌های با انرژی 14MeV بسیار پرکاربرد هستند و از آن‌ها در BNCT نیز اخیراً استفاده شده است. مولدهای ژنراتور نیز از این مکانیسم استفاده شده است.

4-2) منابع فوتون‌های گاما

منابع متعددی فوتون گاما تولید می‌کنند که مشتمل بر موارد ذیل می‌باشند:

(1) چشمه‌های رادیواکتیو²

(2) فوتون‌های گامای آبی ناشی از شکافت³

(3) فوتون‌های گامای حاصل از محصولات شکافت¹

¹ Water-moderated reactors

² Radioactive sources

³ Prompt Fission Gamma Photons

(4) فوتون‌های گامای گیراندازی²

(5) فوتون‌های گامای حاصل از پراکندگی ناکشسان نوترون³

(6) فوتون‌های گامای فعال‌سازی⁴

(7) تشعشع نابودی⁵

4-2-1 چشمه‌های رادیواکتیو (Radioactive Sources):

چشمه‌های رادیواکتیوی که در طی عمر تکنولوژی هسته‌ای شناخته شده‌اند، کاربردهای وسیعی در شاخه‌های علوم مختلف اعم از آموزشی، پزشکی، تحقیقات، صنعتی، دولت و ... داشته‌اند. رادیونوکلئیدها همواره در حین‌گذر از وضعیت برانگیخته به حالت پایدارتر یک یا چند پرتو گاما تابش می‌کنند. بنابراین باید مقابل این منابع رادیواکتیو حفاظ طراحی کرد. در طراحی حفاظ کل طیف انرژی چشمه باید مدنظر قرار گیرد تا پرتوهای پرنانرژی دارای فراوانی کم نیز مورد بررسی قرار بگیرد.

4-2-2 فوتون‌های گامای آنی ناشی از شکافت (Prompt Fission Gamma Photons):

دو دسته فوتون گاما از فرآیند شکافت حاصل می‌گردند. دسته اول فوتون‌های گامایی هستند که در طی بازه زمانی 60ns اول فرایند شکافت آزاد می‌شوند، به‌همین دلیل به آن‌ها فوتون‌های آنی حاصل از فرایند شکافت گویند و دسته دوم در نتیجه واپاشی آنی پاره‌های شکافت تولید می‌شوند. فوتون‌های حاصل از شکافت نقش مهمی در طراحی حفاظ و محاسبات مربوط به گرمای رآکتور دارند. تحقیقات مربوط به فوتون‌های گامای آنی بیش‌تر بر روی شکافت $^{235}\text{U}^{18}$ متمرکز شده است. برای چنین هسته‌ای تعداد فوتون‌های حاصل از شکافت، $8/13 \pm 0/35$ فوتون به‌ازای هر شکافت بوده و انرژی هر یک نیز $7/25 \pm 0/26 \text{MeV}$ است.

در تصویر (4-4) طیف مربوط به گاما‌های آنی در شکافت حرارتی ^{235}U رسم شده است. بیشینه نمودار در 15 و 30keV به‌ترتیب مربوط به پرتوهای X ساطع شده از پاره‌های سبک و سنگین شکافت هستند. طیف گامای حاصل از شکافت در (fission $6/6(\text{Photons MEV}^{-1})$ تقریباً ثابت است. در انرژی‌های بالاتر با شیب تندی نزول می‌کند.

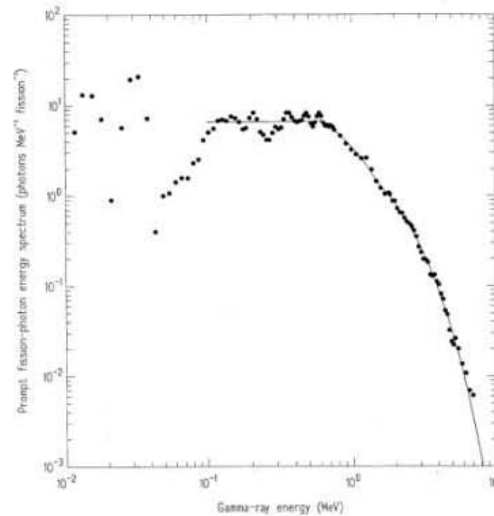
¹ Gamma Photons From Fission Products

² Capture Gamma Photons

³ Gamma Photons from inelastic neutron scattering

⁴ Activation Gamma Photons

⁵ Annihilation Radiation



تصویر (4-4)

می‌توان برای چنین طیفی رابطه زیر را نوشت:

$$N_{py} = \begin{cases} 6/6 & 0/1 < E < 0/6 \text{ MeV} \\ 20/2e^{-1/75E} & 0/6 < E < 1/5 \text{ MeV} \\ 7/2e^{-1/09E} & 1/5 < E < 10/5 \text{ MeV} \end{cases}$$

واحد $N_{py}(E)$ برحسب $\text{Photons MEV}^{-1} \text{ fission}^{-1}$ است و واحد انرژی E نیز MeV است.

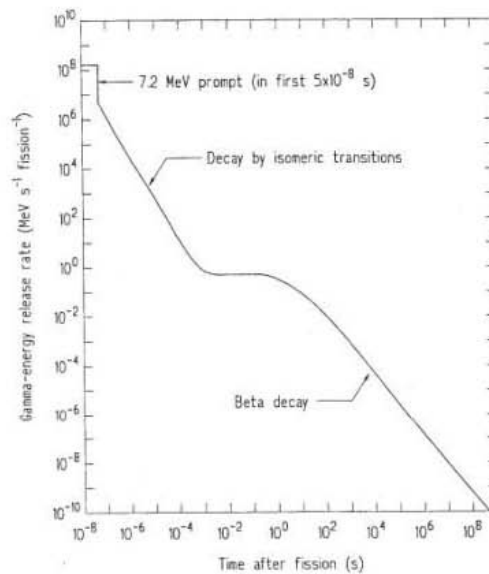
4-2-3 فوتون‌های گامای حاصل از محصولات شکافت

(Gamma Photons From Fission Products):

با توجه به کاربردهای گسترده‌ی شکافت هسته‌ای، یکی از مسائل مهم برای آنالیز حفاظ در نظر گرفتن گامای تأخیری¹ است که زمان‌های طولانی پس از شکافت توسط واپاشی پاره‌های شکافت حاصل می‌گردند. انرژی کل گامای آزاد شده توسط زنجیره‌های محصولات شکافت در زمان‌های 50ns پس از شکافت با فوتون‌های آنی ناشی از شکافت قابل مقایسه است.

در منحنی رسم شده در تصویر 4-6، ابتدای منحنی به فوتون‌های آنی ناشی از شکافت اختصاص دارد که در $5 \times 10^{-8} \text{ s}$ اول شکافت به وجود آمده‌اند و پس از آن فوتون‌های تأخیری هستند که از واپاشی فراورده‌ها به وجود می‌آیند و در قسمت سوم هم واپاشی با ساطع کردن پرتوهای β پایان می‌پذیرد.

¹ Delayed Gamma



تصویر (6-4)

بهره تولید گاماهاى تأخیری و انرژی آن‌ها در جدول (7-4) فهرست شده است.

جدول (7-4)

Fission species	Integrated gamma yield (photons/fission for $0.2 < t < 0.5$ s)	Integrated gamma yield (photons/fission for $0.2 < t < 45$ s)	Integrated energy release (MeV/fission for $0.2 < t < 45$ s)	Total energy release (MeV/fission)
	^{238}U	1.42	5.50	5.08
^{232}Th	0.966	5.07	5.04	10.8
^{235}U	0.613	3.31	3.18	6.84
^{239}Pu	0.608	3.26	2.86	6.15
^{233}U	0.312	2.01	1.97	4.24

Source: Keepin [1965]; by permission of G. Robert Keepin.

4-2-4 فوتون‌های گامای گیراندازی (Capture Gamma Photons):

در اثر جذب نوترون هسته مرکب تشکیل می‌شود که این هسته در حد بالایی از برانگیختگی قرار دارد و انرژی برانگیختگی آن در حد انرژی جنبشی نوترون فرودی به‌اضافه انرژی پیوندی نوترون است که روی هم رفته 7MeV خواهد شد. واپاشی هسته در عرض $10\text{--}12\text{s}$ و گذر هسته به مدهای میانی موجب تولید یک یا چند فوتون پرنرژی می‌کند. به این فوتون‌های گامای گیراندازی می‌گویند که در مواد جاذب نوترون روی می‌دهد. سطح مقطع نوترون حرارتی و در نتیجه آن برهمکنش (n, γ) در مواد جاذب نوترون بالاست.

قابل ذکر است که در هسته‌های سنگین و قابل شکافت ممکن است که با جذب نوترون شکافت نیز صورت بگیرد که البته در

رآکتورها شکافت برای ما مطلوب است. انتخاب هسته‌های مختلف برای شکافت نیز بر همین مبنا است. به عبارت دیگر هسته‌ای قابل استفاده است که پس از جذب نوترون احتمال شکافت آن بیش‌تر از احتمال تولید پرتو گاما باشد.

یکی از مسائل مهم که باید در حفاظ در برابر پرتوها به آن توجه داشت گاماها حاصل از نوترون‌هاست چرا که در مواردی چشمه پرتوی دارای پرتوهای گاما و نوترون‌ها توأم می‌باشد. برای ممانعت از گذر نوترون‌ها ابتدا با مواد پراکنده‌گر انرژی آن‌ها را پایین آورده و آنها را گند می‌نمائیم. سپس با عبور نوترون‌ها از لایه‌ای مانند آب سرعت آن‌ها را در حد نوترون‌های حرارتی پایین آورده و پس از آن توسط هسته‌های جاذب نوترون آن‌ها را جذب کنیم. در این مرحله است که ممکن است در اثر جذب نوترون‌ها، پرتوهای گاما ساطع شوند لذا باید حفاظی هم برای پرتوهای گامایی که در حفاظ نوترون‌ها تولید شده‌اند طراحی کرد. اگر در ابتدای امر یک حفاظ برای پرتوهای گامای اصلی ساطع شده از چشمه تعبیه شده باشد، پس از طراحی حفاظ در برابر نوترون‌ها، مجدداً باید یک لایه دیگر برای گاماهاى گیراندازی ایجاد کرد. لذا بهتر است که ابتدا حفاظ نوترون جایگذاری شود و پس از آن حفاظی برای پرتوهای گاماهاى اولیه و نیز گاماهاى ناشی از گیراندازی در حفاظ نوترون‌ها با هم تعبیه گردد.

4-2-4) فوتون‌های گامای حاصل از پراکندگی ناکشسان نوترون

(Gamma Photons from inelastic neutron scattering)

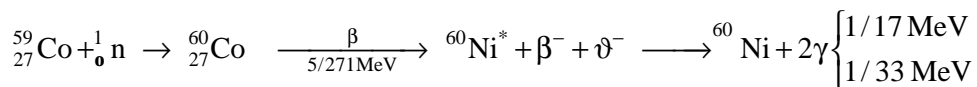
هسته‌های برانگیخته‌ای که در اثر پراکندگی ناکشسان نوترون‌ها ایجاد شده‌اند، در عرض 10^{-14} s به وضعیت پایدار واپاشی می‌کنند و انرژی برانگیختگی آن‌ها با آزاد شدن پرتوهای گاما آزاد می‌شود. به جز هسته‌های سنگین نوترون‌هایی با انرژی تقریبی 0/5MeV برای پراکندگی غیرالاستیک لازم می‌باشد. لذا فوتون‌های ثانویه‌ای که در اثر پراکندگی نوترون ایجاد می‌شوند بسیار کم انرژی‌تر از گاماهاى ناشی از پدیده گیراندازی هستند. فوتون‌های حاصل از پراکندگی ناکشسان ناشی نوترون‌های پرانرژی (در حدود 1MeV) به‌ندرت در محاسبات مربوط به حفاظ مهم تلقی می‌شوند مگر آن‌که به‌عنوان تنها منبع پرتوهای گاما ارائه شوند.

4-2-5) فوتون‌های گامای فعال‌سازی (Activation Gamma Photons):

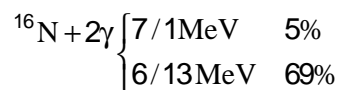
در بسیاری از مواد، جذب نوترون منجر به تولید یک رادیونوکلئید می‌شود و نیمه عمر آن می‌تواند کسری از ثانیه باشد یا ممکن است نیمه‌عمر آن به چند سال هم برسد. بیش‌تر رادیونوکلئیدهایی که در تحقیقات آزمایشگاهی، تجهیزات پزشکی و صنعتی تولید می‌شوند، به‌صورت هسته‌های فعال‌سازی ناشی از جذب نوترون در بعضی از مواد مادر¹ می‌باشند. چنین هسته‌هایی معمولاً با تابش

¹ Parent material

بتا واپاشی کرده و هسته دختر را در حالت برانگیخته رها می‌کنند و این هسته برانگیخته نیز در 10^{-14} s از طریق تابش یک فوتون گاما یا چندین گاما به حالت پایه برمی‌گردد. نیمه عمر تابش‌کننده فوتون به هسته مادر بستگی دارد در حالی که تعداد و انرژی فوتون‌های آزاد شده مشخصه‌ای از ساختار هسته عنصر دختر است. به‌عنوان نمونه می‌توان به جذب نوترون توسط ^{59}Co اشاره کرده که به این صورت می‌باشد:



یکی دیگر از واکنش‌هایی که در راکتورها ایجاد می‌شود، $^{16}_7\text{N} ({}^1_0\text{n}, \gamma) {}^{16}_8\text{O}$ است. انرژی آستانه این واکنش 916MeV و سطح مقطع مؤثر آن $19\mu\text{b}$ است. نیتروژن نیز دو گامای تقریباً پرانرژی می‌دهد که دارای این مقادیر هستند:



در آبی که برای خنک کردن راکتور استفاده می‌شود، با برخورد نوترون‌ها به اکسیژن‌های آب این واکنش به میزان زیادی انجام می‌شود و گاماهای تولید شده نیز پُرانرژی هستند. می‌توان با اندازه‌گیری آن به قدرت راکتور خارج از قلب آن پی برد. در راکتورها برای آن که اکتیویته آب کم شود با تأخیری مجدداً آب را به راکتور برمی‌گردانند. ولی از آن‌جا که این کار موجب کاهش کارایی راکتور می‌شود، لذا بهتر است قبل از آن که دمای آب به دمای محیط برسد، آب را به راکتور برگرداند ولی با ایجاد یک حفاظ ثانویه اطراف لوله‌های آب از گاماهای ساطع شده از آن ممانعت به‌عمل آورد.

(6-2-4) تشعشع نابودی (Annihilation Radiation)

پوزیترون‌هایی که در نتیجه واپاشی رادیونوکلئیدهایی تولید می‌شوند یا پوزیترون‌های حاصل از پدیده تولید زوج، در طی 10^{-10} s از سرعت آن‌ها کاسته شده و با ترکیب با یک الکترون در پدیده فنا یا نابودی شرکت می‌کنند در نتیجه این ترکیب دو فوتون گاما تولید می‌شود که انرژی هر یک 511keV می‌باشد.

(3-4) منابع پرتوهای X

اندرکنش فوتون‌ها یا ذرات باردار با ماده منجر به تولید پرتوهای X ثانویه می‌شود. به چند طریق این اندرکنش روی می‌دهد که عبارتند از:

(1) پرتوی X مشخصه¹

(2) پرتوهای X ترمزی²

(3) دستگاه مولد³ X-Ray

4-3-1) پرتوی X مشخصه (Characteristic X Rays):

تعداد الکترون‌های مشخصی در هر لایه از اتم جای گرفته‌اند. اگر وضعیت چیدمان الکترون‌ها در اطراف هسته به دلایلی چون یونش یک الکترون یا تحریک الکترون‌ها به سطوح بالاتر انرژی، تغییر کند، مجموعه‌ای از حالت‌های گذر پیچیده به طرف مکان‌های خالی سطوح کم انرژی تر (جای الکترون‌های خالی) ایجاد می‌شود تا اتم از حالت برانگیخته به حالت پایه برود. در هر گذار الکترونی تفاضل انرژی پیوندی لایه اولیه و ثانویه به صورت یک فوتون تابشی آزاد می‌شود که به آن پرتوی X مشخصه می‌گویند و یا یکی از الکترون‌های لایه خارجی به بیرون پرتاب می‌شود که به آن الکترون اوژه⁴ گویند. از آنجا که میزان انرژی آزاد شده X یا الکترون اوژه با عدد اتمی Z هر عنصر متفاوت است، در واقع مشخصه‌ای از هر عنصر است و با طیف‌نگاری می‌توان به نوع عنصر پی‌برد.

- شیوه‌های تولید اشعه X مشخصه:

در حفاظت در برابر پرتوها چندین روش تولید اشعه X را باید در نظر گرفت که ممکن است موجب تحریک اتم شده و در نتیجه آن X مشخصه تولید کند.

1- در جذب فتوالکتریک اتم جاذب، در حالت یونیزه قرار می‌گیرد. اگر انرژی فوتون برخوردی به اندازه کافی زیاد باشد تا بتواند بر انرژی پیوندی لایه K غلبه کرده و الکترون آن را جدا کند، (معمولاً در محدوده 14eV برای هیدروژن تا 115keV برای اورانیوم) در غیراین صورت فرایند جذب الکترون از لایه‌های دیگر صورت می‌گیرد. البته احتمال 100%-80% وجود دارد که الکترون از لایه K جدا شود. با جدا شدن الکترون از لایه K یا لایه‌های دیگر در اثر برخورد فوتون فرودی، اشعه X ساطع می‌شود. لذا به فوتون‌های X-Ray که در پی فرایند فتوالکتریک ایجاد می‌شوند، پرتوهای فلورسانس⁵ می‌گویند به طور گسترده‌ای برای شناسایی عنصر به کار می‌روند. به این ترتیب که به عنصر فوتون کم‌انرژی حاصل از یک منبع رادیواکتیو یا ماشین اشعه X می‌تابانند و سپس به طیف‌نگاری پرتوهای فلورسانس آن می‌پردازند. از توزیع طیف به نوع عنصر پی می‌برند.

¹ Characteristic X Rays

² Bremsstrahlung

³ X-Ray Machines

⁴ Auger electron

⁵ Fluorescent

2- واپاشی یک رادیونوکلئید می‌تواند پرتوهای X مشخصه تولید کند. در واپاشی فرایندی به نام گیراندازی الکترون¹ رخ می‌دهد که در طی آن یک الکترون مدار² که بیش تر الکترون لایه K است- به طرف هسته جذب می‌شود در نتیجه از بار الکتریکی هسته یک واحد کم می‌شود. جدا شدن الکترون از لایه K منجر به تولید اشعه X مشخصه می‌شود. منبع دوم اشعه X مشخصه که در واپاشی‌های زیادی ایجاد می‌شود، پدیده تبدیل داخلی³ است. بیش تر هسته‌های دختر حاصل از هرگونه واپاشی هسته‌ای در حالت ناپایدار هستند. این انرژی برانگیختگی ممکن است به صورت فوتون گاما ساطع شود یا به یک الکترون مدار^ی منتقل شود و آن الکترون از اتم جدا شود. بدیهی است که مجدداً الکترون لایه K در تبدیل داخلی شرکت می‌کند.

3- عبور ذات باردار از محیط مادی موجب یونش و برانگیزش اتم‌ها در ماده می‌شوند که در نتیجه وا انگیختگی اتم‌ها می‌تواند X مشخصه تولید شوند. جای خالی الکترون برانگیخته توسط الکترون لایه‌های خارجی تر تأمین می‌گردد و این فرآیند برانگیختگی زنجیروار ادامه می‌یابد و در پی آن‌ها نیز پرتوهای X مشخصه به وجود می‌آید.

- انرژی‌های پرتوهای X مشخصه:

انرژی لبه K مربوط به هر اتم که لازم است تا بتوان الکترونی از آن جدا کرد، از رابطه تقریباً دقیق زیر به دست می‌آید:

$$E_k(\text{ev}) = aZ^c \exp[-bZ^d]$$

که مقادیر c، b و a در جدول (8-4) فهرست شده‌اند.

جدول (8-4)

X Ray or Edge	a (eV)	b	c	Fit Range
K-edge	6.85198	1.168×10^{-7}	2.13240	$7 < Z < 95$
$K_{\alpha 1}$	7.51002	1.489×10^{-7}	2.07109	$7 < Z < 95$
$K_{\alpha 2}$	7.63540	1.079×10^{-7}	2.06582	$7 < Z < 95$
$K_{\beta 1}$	7.37998	1.208×10^{-7}	2.10694	$7 < Z < 95$
$K_{\beta 2}$	6.95769	1.138×10^{-7}	2.12778	$7 < Z < 95$
$K_{\beta 3}$	7.39760	1.116×10^{-7}	2.10624	$7 < Z < 95$
$L_{\alpha 1}$	0.34810	-8.338×10^{-8}	2.35265	$30 < Z < 95$
$L_{\alpha 2}$	0.35173	-9.667×10^{-8}	2.34975	$30 < Z < 95$
$L_{\beta 1}$	0.31810	1.514×10^{-7}	2.38418	$30 < Z < 95$
$L_{\beta 2}$	0.21302	-1.346×10^{-7}	2.51145	$30 < Z < 95$

رابطه دیگری که می‌توان استفاده کرد که به‌طور تقریبی انرژی لبه K را به دست می‌دهد، به صورت زیر است. در این رابطه ما از مقادیر ثابت بی‌نیاز خواهیم بود:

$$E_k(\text{ev}) = 5 / 706 Z^{2/186} \quad Z > 5$$

- شدت اشعه X مشخصه:

¹ Electron Capture
² Orbital Electron
³ Internal conversion

برای آگاهی از شدت اشعه X، بهره فلورسانس مطرح می‌گردد. بهره فلورسانس کسری از اتم‌هاست که دارای جای خالی در لایه‌های درونی اتم هستند و با پر شدن این جای خالی توسط الکترون‌های لایه‌های بالاتر، پرتو X تابش می‌شود. می‌توان بهره فلورسانس برای $1 < Z < 100$ از رابطه زیر حاصل کرد:

$$\omega_k = \frac{B^4}{1+B^4}$$

به‌گونه‌ای که B از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$B = 0.0370 + 0.03112Z + 5/44 * 10^{-5} Z^2 - 1/250 * 10^{-6} Z^3$$

با جایگذاری Z مربوط به هسته سبک اکسیژن مشاهده می‌شود که مقدار بهره فلورسانس 0/0069 است و برای اورانیوم که $(Z = 92)$ است، این مقدار 0/97 است. بنابراین در مواجهه با هسته‌های سنگین می‌بایست پرتوهای فلورسانس مورد توجه قرار داد. نکته دیگر قابل برداشت این است که بافت بدن نیز دارای عناصر سبک است، لذا می‌توان از تابع اشعه X فلورسانس در بدن صرف‌نظر کرد.

4-3-2) پرتوهای X ترمزی (Bremsstrahlung)

ذرات باردار انرژی خود را از طریق برخوردهای مکانیکی¹ با الکترون‌ها در طی مسیر حرکت خود در ماده از دست می‌دهند یا از طریق تابش اشعه ترمزی این انرژی به‌صورت فوتون از ماده خارج می‌شود. باید انرژی ذرات باردار آلفا و پروتون برای تابش ترمزی بسیار زیاد باشد، به‌گونه‌ای که از انرژی Rest Mass آن ذره بیش‌تر باشد تا تابش ترمزی روی دهد.

لذا در محدوده انرژی‌هایی که ما سروکار داریم، تنها در حد چند MeV است، تنها برخورد الکترون موجب تولید تابش ترمزی می‌شود که دارای $\text{rest mass} = 511\text{keV}$ است.

در فصل قبل راجع به توان توقف صحبت کردیم که شامل دو قسمت برخورد کولومبی و تابشی بود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\text{Radiation}}{\text{collosion}} \cong \frac{EZ}{700} \left(\frac{m}{M}\right)^2$$

جرم الکترون: m انرژی ذره: E

جرم ذره باردار: M عدد اتمی: Z

بهره تولید اشعه ترمزی به عدد اتمی عنصر هدف و انرژی ذره فرودی بستگی دارد. به‌همین دلیل برای افزایش راندمان اشعه X

¹ collision

ترمزی در آند مولد اشعه X از فلزاتی چون تنگستن استفاده می‌کنند که دارای Z بالا و نقطه ذوب بالا است و فشار بخار آن پایین است تا حتی المقدور در خلأ موجود در لامپ اشعه X تبخیر تنگستن رخ ندهد.

- پرتوهای برماشترالونگ حاصل از اهداف ضخیم برای الکترون‌های تک انرژی:

توزیع انرژی فوتون‌های تولید شده مکانیسم برماشترالونگ تا یک مقدار بیشینه ادامه می‌یابد این مقدار بیشینه منطبق بر انرژی بیشینه ذره باردار فرودی است. شکل دقیق طیف پیوسته برماشترالونگ به عوامل زیر بستگی دارد که عبارتند از: توزیع انرژی ذرات باردار فرودی، ضخامت هدف و میزان جذب پرتوهای برماشترالونگ جذب شده در هدف و موارد دیگر.

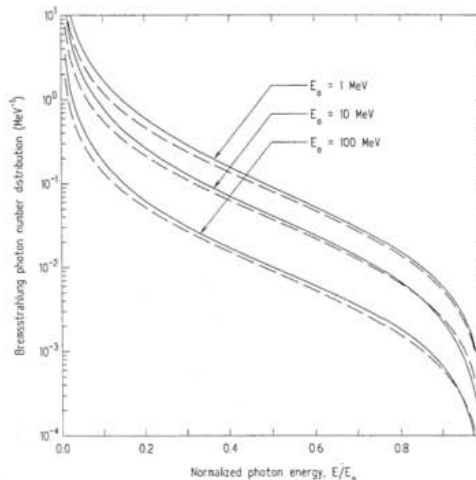
برای الکترون‌های تک انرژی E_0 که به یک ضخامت از ماده هدف برخورد می‌کند، (ضخیم بودن هدف نسبت به برد الکترون) تعداد الکترون‌های ترمزی با انرژی E را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$N_{br}(E_0, E) = 2KZ \left[\left(\frac{E_0}{E} - 1 \right) - \frac{3}{4} \ln \left(\frac{E_0}{E} \right) \right] \quad E \leq E_0$$

K ثابت نرمالیزاسیون است که به E بستگی دارد. کسری از انرژی جنبشی الکترون فرودی که به صورت برماشترالونگ تابش می‌شود، از تقریب زیر حاصل می‌گردد:

$$Y(E_0) = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} dE E N_{br}(E_0, E) = \frac{13}{16} KZE_0$$

در نمودار (7-4) توزیع فوتون‌های برماشترالونگ به تصویر کشیده شده است. تفاوت خطوط نقطه‌چین و پررنگ به علت اختلاف در رابطه‌های تقریبی مذکور و محاسبات دقیق انجام شده¹ CSDA می‌باشد.



¹ Continuous Slowing Down Approximation

تصویر (7-4)

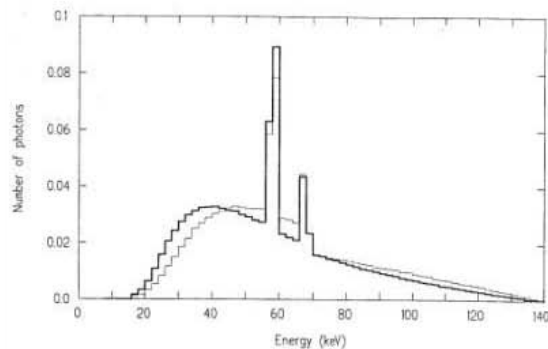
4-3-3 دستگاه مولد اشعه X

تولید فوتون‌های X به صورت برعکس اثر الکترون و فلورسانس در هر ابزار مولد الکترون‌های پرتوی صورت می‌گیرد. در این وسایل ولتاژ بالا، از تکنیک‌هایی برای شتاب دادن به الکترون‌ها استفاده می‌شود. لذا آن‌ها را به ولتاژ متناوب وصل می‌کنند تا پرتوهای X پرتوی و دارای طیف انرژی گسترده‌ای ایجاد کنند. برای افزایش راندمان دستگاه از برق سه فاز و روش‌های یکسوسازی نیز استفاده می‌نمایند. این دستگاه‌ها در پرتودرمانی و نیز تصویربرداری با اشعه X کاربرد وسیعی دارند. در جدول (4-9) پاره‌ای از خصوصیات بعضی از دستگاه‌ها آورده شده است.

جدول (4-9)

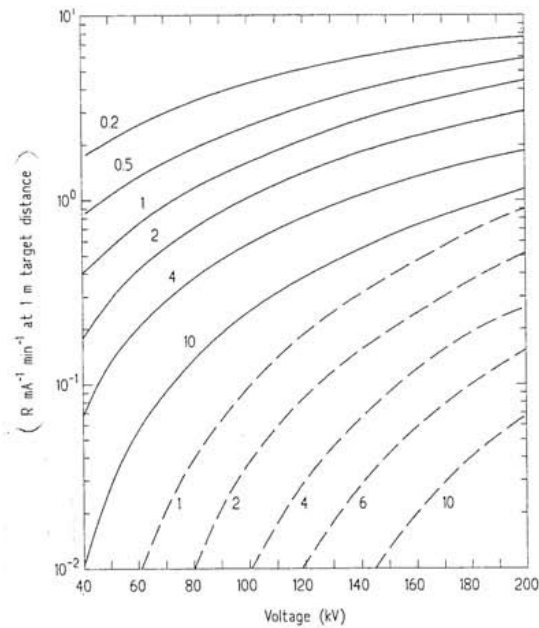
Element	X-ray line	Wavelength (10^{-10} m)	Energy (keV)	Excitation voltage (kV)
Tungsten	$K_{\alpha 1}$	0.2090	59.3182	69.525
	$K_{\beta 1}$	0.1844	67.2443	69.525
	$L_{\alpha 1}$	1.4764	8.3976	10.207
Silver	$L_{\beta 1}$	1.2818	9.6724	11.514
	$K_{\alpha 1}$	0.5594	22.1629	25.514
Molybdenum	$L_{\alpha 1}$	4.1544	2.9843	3.351
	$K_{\alpha 1}$	0.7093	17.4793	20.000
	$K_{\beta 1}$	0.6323	19.6083	20.000
Copper	$L_{\alpha 1}$	5.4066	2.2932	2.520
	$K_{\alpha 1}$	1.5406	8.0478	8.979
	$K_{\beta 1}$	1.3922	8.9053	8.979
Nickel	$K_{\alpha 1}$	1.6579	7.4782	8.333
Cobalt	$K_{\alpha 1}$	1.7890	6.9303	7.709
Iron	$K_{\alpha 1}$	1.9360	6.4038	7.112
Chromium	$K_{\alpha 1}$	2.2897	5.4147	5.989
Aluminium	$K_{\alpha 1}$	8.3393	1.4867	1.560

همان‌طور که از نمودارهای (4-9) می‌توان نتیجه گرفت، نمودار پرتو، تیوب اشعه X دارای فیلتر ذاتی به ضخامت 2.50 mm آلومینیوم می‌باشد که معادل فیلتر HVL به ضخامت 5.56 mm آلومینیوم می‌باشد. با اضافه کردن ضخامت 6 mm آلومینیوم به عنوان فیلتر خارجی نمودار نازک‌تر حاصل می‌گردد که معادل HVL به ضخامت 8.35 mm است.



تصویر (8-4)

محور قائم نمودار (9-4) همان K_0 است که در فرمول‌های محاسبه دز در فصول آتی به آن اشاره خواهد شد.



تصویر (9-4) نشان‌دهنده اکسپوژر¹ برحسب رنتگن² در فاصله یک‌متری از تیوب اشعه X با ولتاژهای مختلف و درجه‌های مختلف فیلتراسیون می‌باشد. نمودارهای پررنگ فیلتراسیون آلومینیوم و نمودارهای نقطه‌چین فیلتراسیون مس را نشان می‌دهند. واضح است که هر 10mm آلومینیوم معادل 1mm مس می‌باشد.

فصل پنجم: توابع پاسخ فوتون و نوترون

اگر بخواهیم تحلیل کاملی از حفاظ داشته باشیم، باید توصیف کاملی از میدان پرتو در هر نقطه داخل و مجاور حفاظ در زمان‌ها و شرایط مختلف داشته باشیم. البته در عمل و در کاربرد واقعاً دستیابی به چنین جزئیاتی ضروری نیست و این‌که تا چه میزان این محاسبات لازم است، بعداً مطرح می‌کنیم. بعضی وقت‌ها دانستن کمیاتی مانند دز که همبستگی خوبی بین اثرات پرتو و انرژی جذب شده در واحد جرم یا حجم ایجاد می‌کند، کافی است.

هدف اصلی این بخش آن است که بین توصیف فیزیکی میدان پرتو که چگالی شار یا شارش¹ نامیده می‌شود و شیوه‌های مختلف اندازه‌گیری دز پرتو یا پاسخ سنسور تشعشعی ارتباط مناسبی ایجاد کند. لذا در ابتدا با کمیت‌ها و واحدهای دزیمتری آشنا می‌شویم که ابتدایی‌ترین آن‌ها شامل دز جذبی و کرما می‌باشد. سپس تفاوت‌های اساسی در اثرات بیولوژیک انواع مختلف تابش که در تعریف معادله دز به کار گرفته می‌شوند، شرح داده خواهد شد. تابع پاسخ (response function) جهت ایجاد یک ارتباط تحلیلی بین شارش و دز تعریف می‌گردد. روش‌های خاصی وجود دارد که به یک تحلیلگر کمک می‌کند تا محاسبات خود را روی داده‌های مختلف انجام دهد. این داده‌ها می‌تواند یا مربوط به سطح مقطع باشد یا تابع پاسخ. این قسمت شامل بحث و اثبات تابع پاسخ است که بین شارش پرتو با مقادیر مختلف یا دز مؤثر بر بدن و پرتوافکنی بدن در اثر برخورد‌های تشعشعی در جهات متفاوت ارتباط برقرار می‌کند.

بعضی مواقع به تابع پاسخ، ضریب تبدیل (conversion coefficient) یا فاکتور تبدیل شارش به دز هم گفته می‌شود.

5-1) کمیات دزیمتری

این پرسش را در ذهن خود مطرح کنید که کدام‌یک از خصوصیات میدان پرتو، همبستگی خوبی بین اثرات میدان پرتو بر روی ماده ایجاد می‌کند؟ تأثیراتی که ممکن است شیمیایی، مکانیکی یا بیولوژیکی باشد.

در واقع کمیات دزیمتری که برای این منظور به کار می‌روند، در یک نقطه یا در یک ناحیه از فضا، یک اندازه‌گیری فیزیکی می‌باشند که بر اثر میدان منطبقند. وقتی که با پرتو دهی² یک میدان پرتو یا شارش ماهیت تشعشع یا انرژی آن برای ما مهم می‌شود، کمیت رادیومتری همانند شارش به‌اندازه کافی نمی‌تواند گویای اثرات پرتو باشد. شارش انرژی ارتباط نزدیکی با آسیب‌های ناشی از پرتوگیری مواد به‌خصوص مواد بیولوژیکی نشان می‌دهد. البته این انتخاب - شارش انرژی - نیز برای ما مطلوب نیست حتی برای ذراتی که از یک نوع بخصوص هستند. بهتر است که از کمیت دز استفاده شود چرا که به بررسی مسیر ذرات می‌پردازد یا انرژی که

¹ Fluence
² Exposure

ذرات در ناحیه‌ای از فضا برجای می‌گذارند را مورد محاسبه قرار می‌دهد.

دز (Dose): انرژی جذب شده در واحد جرمی است که در میدان پرتو قرار دارد یا به عبارتی دیگر می‌توان آن را به‌عنوان انرژی جذب شده در واحد جرم در اثر اندرکنش‌ها توصیف کرد.

انرژی را در رابطه دز منظور می‌کنیم که:

- (1) موجب یونیزاسیون محیط شود.
- (2) موجب برانگیخته شدن اتم‌ها گردد.
- (3) ممکن است انرژی موجب شود که اتم‌ها در یک سیستم جابه‌جا شوند. سیستم می‌تواند کریستال یا ماده جامد باشد.
- (4) اگر این انرژی موجب تغییرات مولکولی شود و ... منظور می‌گردد.

در این موارد و موارد مشابه آن می‌توانیم تغییرات را به‌عنوان انرژی جذب شده در نظر بگیریم.

تاریخچه نام‌گذاری دز به کاربرد آن در رادیولوژی بر می‌گردد. رادیولوژیست‌ها اولین کسانی بودند که اثرات تشعشع را بر روی مواد بیولوژیکی را مورد توجه قرار دادند و معمولاً هر کمیتی که در بازه‌ای زمانی مورد ارزیابی قرار بگیرد و بیانگر انباشت یک توده در بازه زمانی باشد، دز یا نرخ دز نامیده می‌شود. مانند دز دارو که مقداری از آن در واحد زمان تجویز می‌گردد.

در حالت کلی وقتی پرتویی وارد محیط می‌شود، یا باردار است یا بی‌بار است. ذرات باردار به‌طور مستقیم یون‌ساز هستند مانند الکترون، بتا و ... و ذرات بی‌بار مانند نوترون و فوتون از طریق اندرکنش‌هایی که با ماده انجام می‌دهند، ذرات باردار تولید می‌کنند و به این طریق موجب یونش و سایر تغییرات محیط می‌شوند. حالات زیر برای انواع ذرات مترتب است:

- (1) ذرات بدون بار اولیه مانند نوترون‌ها یا فوتون‌ها که در حین عبور از ماده با هسته‌ها یا الکترون‌های ماده اندرکنش می‌کنند. فوتون‌ها با الکترون‌های محیط بیش‌تر واکنش می‌کنند و نوترون‌ها بیش‌تر با هسته واکنش کرده و لذا محصولاتی همانند ذرات سنگین آلفا تولید می‌کنند. از دست دادن انرژی در اندرکنش‌های اولیه بین فوتون‌ها و محیط به‌صورت ناپیوسته است ولی وقتی ذرات باردار تولید می‌کنند، در تمام طول مسیر حرکت خود در محیط، به‌طور پیوسته انرژی خود را به اتم‌ها منتقل می‌کنند.
- (2) همان‌طور که بیان شد، ذرات ثانویه‌ای در نتیجه اندرکنش‌ها ایجاد می‌شوند که انرژی جنبشی آن‌ها به مقدار انرژی فوتون‌های اولیه و نوع اندرکنش آن‌ها بستگی دارد.

- (3) همچنین ذرات باردار ثانویه در گذر از ماده انرژی خود را به دو طریق ممکن است از دست بدهند: (1) از طریق یونش و شرکت در فرایندهایی مانند برانگیختگی و تغییر چیدمان مولکولی (2). ممکن است این ذرات تابش ترمزی ساطع کنند. تابش ترمزی در اثر یک تغییر اندازه یا جهت سرعت الکترون در مجاورت هسته روی می‌دهد و فوتون ترمزی تولید می‌کند و این فوتون که در واقع محصول سوم اندرکنش‌هاست ممکن است از ماده خارج شود یا این‌که مجدداً با ماده اندرکنش کند. یعنی این فرایند آبشارگونه

تکرار می‌گردد. لازم به ذکر است که در این عمل انرژی تولید نمی‌شود بلکه می‌توان گفت که انرژی ذرات ثانویه در طی فرایندهای یونش و برانگیزش در طی مسیر حرکت در ماده توزیع شده و به انرژی گرمایی ماده تبدیل می‌گردد.

(4) ذرات بدون بار اولیه ممکن است از طریق فرایندهای پخش و یا سایر فرایندهای ذرات بدون بار تولید کنند. این ذرات بدون بار نیز مقداری از انرژی ذرات اولیه را حمل می‌کنند که ما آن‌ها را بررسی نمی‌کنیم.

این پایان کار ذرات بدون بار بود اما ذرات باردار علاوه بر تولید ذرات باردار، ممکن است در اثر پراکندگی، ذرات بدون بار ایجاد کنند و به صورت فوق این اندرکنش‌ها ادامه یابد.

5-1-1) تسهیم انرژی¹، انرژی ویژه²، انرژی خطی³

این سه کمیت، کمیت‌های دزیمتری غیرقطعی هستند که ICRU آن‌ها را در چهارچوب کمیت‌های تشعشعی و واحدها مطرح کرده است.

انرژی تسهیم شده برای مقدار معینی از ماده به جرم m معمولاً به مجموع انرژی ذرات باردار و بدون بار که به آن حجم مذکور وارد می‌شوند، منهای مجموع انرژی ذرات باردار و بدون باری که حجم را ترک می‌کنند، اطلاق می‌شود که البته در هر دو صورت انرژی‌های Rest Mass یا انرژی که تبدیل به جرم شده کسر می‌گردد. لذا انرژی تسهیم شده در واقع موجب برانگیزش یا یونش اتم‌ها و مولکول‌ها در حجم معین می‌شوند و این امر منجر به تغییرات شیمیایی ماده می‌گردد. این انرژی عمدتاً به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود.

$$z \equiv \epsilon / m$$

که به انرژی تسهیم شده در واحد جرم گفته می‌شود و کمیت دز جذبی از آن حاصل می‌گردد.

انرژی خطی γ از تقسیم ϵ بر \bar{A} به دست می‌آید و \bar{A} متوسط طول مسیر بر حجم مورد نظر است. هنگامی که جرم را کوچک کنیم شارش یونش ذرات کوچک شود، این سه کمیت دارای نوسانات یا مقادیر تصادفی یا پراکندگی می‌شوند که برای به دست آوردن یک مقدار مشخص باید برون‌یابی کرد.

از نظر ICRU هر کمیت باید دارای مشخصه‌های زیر باشند:

(1) برای یک ناحیه خاص بتوان آن را تعریف کرد. ممکن است مقادیر، نسبت به مکان یا زمان دارای پراکندگی باشند.

¹ Energy Imparted

² Specific Energy

³ Lineal Energy

(2) ممکن است مقدار آن قابل پیش‌بینی نباشد اما باید بتوان هر مقدار خاص را به صورت احتمالی با یک توزیع احتمال به دست آورد.

(3) ماهیت تصادفی کمیت، دقت مقادیر قابل بررسی را از بین نمی‌برد.

(2-1-5) کمیات قطعی (Deterministic Quantities)

کمیت‌های دزیمتری زیادی وجود دارند که غیرتصادفی و یا قطعی هستند. حتی بعضی از آن‌ها از کمیات تصادفی نشأت می‌گیرند.

برای مثال دز جذبی (قطعی) از انرژی تسهیم شده مشتق می‌شود. هر کمیت قطعی باید از خصوصیات زیر برخوردار باشد:

(1) بتوان آن را به صورت تابع نقطه‌ای تعریف کرده و به طور کلی یک تابع دیفرانسیلی و پیوسته از موقعیت و زمان باشد. ممکن است به شیب و نرخ آن هم وابسته باشد.

(2) برای شرایط معین مقدار آن به طور ویژه تعیین می‌گردد.

(3) آن را می‌توان با میانگین‌گیری مقادیر مشاهده شده از کمیات غیرقطعی تعیین کرد که \bar{E} یا \bar{Z} گفته می‌شود. مخصوصاً در مورد میدان غیریکنواخت از مقادیر حدی استفاده می‌شود.

(3-1-5) دز جذبی (Absorbed Dose)

برای محاسبه دز می‌بایستی دو کمیت را بر هم تقسیم کنیم یعنی تغییرات انرژی را بر جرم تقسیم کنیم:

$$D = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

همانند شارش، روند به حد گرفتن و افزایش خطا به دلیل کاهش جرم وجود دارد که باید از روش‌های برون‌یابی استفاده کرد. آن‌چه

که در رابطه بالا حائز اهمیت است، محاسبه تغییرات انرژی است که بدین‌گونه انجام می‌گیرد:

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} - Q$$

$$Q = \Delta m_0 C^2$$

Q افزایش انرژی جرم سکون در حجمی است که مدنظر ماست.

$$\Delta m_0 C^2 = (\text{جرم اولیه} - \text{جرم ثانویه}) C^2$$

اگر حجم محدودی را در نظر بگیریم، کل ذراتی که وارد آن حجم می‌شوند دارای انرژی می‌باشند. از طرف دیگر ذرات دیگری هم با

انرژی‌های مشابه یا متفاوت با ذرات ورودی خارج می‌شوند. اگر فرض کنیم که هیچ تبدیل جرمی صورت نگیرد یا به عبارت دیگر

هیچ ماده‌ای خلق نشود و به جرم سکون اولیه اضافه نشود، مقدار انرژی که در این حجم جذب شده، در واقع دز انرژی است.

انرژی که موجب افزایش ماده شود، جزو دز به حساب نمی‌آید یعنی فقط آن سهم از انرژی که در ابعاد اتمی و ریزاتمی خود را نشان می‌دهد و موجب برانگیختگی اتم‌ها می‌شود، در دز به حساب می‌آید. مثلاً در پدیده تولید زوج (Pair production) دو ذره به وجود می‌آید که جزو دز به حساب نمی‌آیند ولی اگر پوزیترونی که تولید شد در همان حجم با الکترون ترکیب شده و پدیده فنا¹ روی دهد، خنثی می‌شود و به عنوان Q در نظر گرفته نمی‌شود ولی دو فوتون ساطع شده از پدیده فنا مورد بررسی قرار می‌گیرد که آیا از حجم مذکور خارج شده‌اند یا اندرکنش روی داده که در این صورت جزو دز به حساب می‌آیند.

در محاسبه دز: از کلیه انرژی‌های ذرات اعم از ذرات باردار و بدون باری که وارد حجم ما می‌شوند، انرژی‌هایی که از آن حجم خارج شده کسر می‌شود و اگر تغییراتی در انرژی در حال سکون سیستم نیز روی داده باشد (یعنی تبدیل انرژی به جرم) جزو دز نیست. لازم به ذکر است که اگر در حجم مورد نظر ماده رادیواکتیو باشد، خود Q منفی شده و پس از ضرب در منفی فرمول مثبت می‌گردد. یعنی اگر هیچ تابشی از بیرون به حجم وارد نشود، دز رو به افزایش است. دز را با تعریف زیر هم بیان می‌کنند:

$$\Delta E = \text{Energy imparted or Imparted Energy}$$

یعنی انرژی که داده شده یا به جای گذاشته شده است.

واحد دز را به صورت $[J / Kg]$ یا Gy تعریف می‌کنند. 1Gy بیانگر مقدار 1 ژول انرژی منتقل شده در یک کیلوگرم جرم ماده است. در CGS به صورت زیر بیان می‌شود:

$$100\text{erg /g} = \text{rad} \quad \text{و} \quad 1\text{Gy} = 100\text{rad}$$

واحد μGy ، mrad ، بیش تر استفاده می‌شود. دز جذبی ناشی از پرتوهای گاما که در شبانه‌روز به‌طور طبیعی دریافت می‌کنیم، $0/1-0/2\mu\text{Gy}$ است.

همان‌طور که قبلاً هم بیان نمودیم، اثرات پرتو با دز همبسته است و یک تناظر یک‌به‌یک بین اثرات پرتو و دز جذبی وجود دارد. یعنی وقتی دز زیاد شود، اثر پرتو زیاد می‌شود و اما دز جذبی به دو دلیل در حفاظ‌سازی مهم است:

(1) در جاهایی که چشمه‌های قوی پرتو وجود دارد وقتی پرتوها به محیط برخورد کرده و جذب می‌شوند، موجب بالا رفتن دمای محیط می‌شوند. حفاظ در اثر دما کیفیت خودش را از دست می‌دهد. همین حفاظ گاهی چشمه گرمایی می‌شود که باید این گرما را برداشت چرا که موجب تخریب یا صدمه به حفاظ می‌گردد.

(2) چون دز در ارتباط و همبسته با اثرات پرتوها و خصوصاً زیان‌های ناشی از پرتوهاست. مخصوصاً اگر LET پرتوها یکسان باشد یعنی پرتو در امتداد مسیرش دارای چگالی یونش یکسان باشد. LET که در اثر برخورد پرتوهای باردار با ماده تعریف می‌شود، برای

¹ Annihilation

فوتون و الکترون یکسان است. چرا که فوتون‌ها هم در نهایت الکترون تولید می‌کنند ولی برای نوترون بیش‌تر از الکترون است چرا که نوترون‌ها ذرات سنگین آلفا نیز تولید می‌کنند.

4-1-5) کرما (Kerma)

یکی دیگر از کمیات دزیمتری که مورد بررسی قرار می‌دهیم، کرماست که مخفف عبارت Kinetic Energy Released in Matter طبق تعریف قدیم یا Per unit Mass طبق تعریف جدید می‌باشد. اگر E_{tr} مجموع انرژی‌های جنبشی اولیه حاصل از تمام ذرات بارداری باشد که در اثر اندرکنش پرتوهای بدون بار در ماده آزاد شده‌اند، در واقع انرژی آزاد شده در واحد جرم است و فرمول آن نیز همانند دز است با این تفاوت که تعریف انرژی آن به‌گونه‌ای دیگر است.

$$K \equiv \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm}$$

نکات زیر را در مورد کرما باید در نظر بگیریم:

- کرما مجموع انرژی کلیه ذرات باردار ثانویه‌ای است که در اثر اندرکنش پرتوهای بدون بار در حجمی که جرم آن Δm است، تولید شده‌اند.

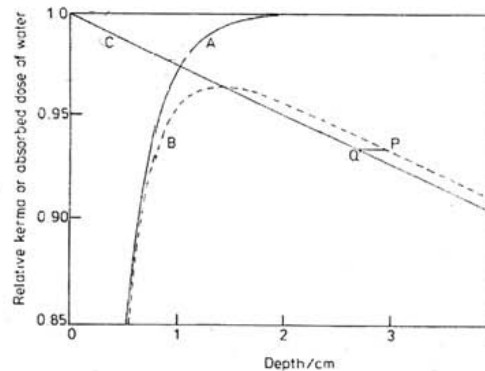
- کرما فقط برای ذرات بدون بار تعریف می‌شود یعنی برای میدان پرتوهای بدون بار مانند نوترون، گاما یا x. چرا که این ذرات، در اثر اندرکنش با ماده، ذرات بارداری تولید می‌کنند که همان ذرات باردار ثانویه هستند.

- در این‌جا منظور از اولین ثانویه‌ها هستند و از لحظه تولید، انرژی آن‌ها لحاظ می‌شود و این مسئله که انرژی در خارج از حجم مورد بررسی جذب شده یا در داخل آن، اهمیت ندارد. اما در دز، واقعاً انرژی جذب شده در حجم مورد نظر را مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

- اگر حجم کوچکی از یک ماده داشته باشیم، کرمای آن زیاد است. چون اندرکنشی که تولید می‌شود، منجر به تولید ذرات ثانویه زیادی در حجم مذکور می‌شود و از آن‌جا که حجم کوچک است این ذرات فرصت جذب شدن ندارند لذا دز جذبی بسیار کم است. ذراتی که خارج می‌شوند، نیز در کرما منظور می‌شوند بدون آن‌که انرژی خود را به محیط بدهند.

اگر محیطی داشته باشیم که ضریب جذب بالایی داشته باشد، منحنی کرما و دز را برحسب ضخامت مانند تصویر (1-5) است. همان‌طور که تصویر (1-5) دیده می‌شود، میزان کرما در ابتدا زیاد است و به تدریج از مقدار آن کاسته می‌شود به دلیل این که اولین پرتوها اندرکنش کرده و پرتوهای ثانویه را ایجاد می‌کنند و هر چه در عمق نفوذ می‌کنند، اندرکنش کرده و پرتوهای دیگری تولید می‌کنند و از میزان پرتوهای ثانویه کاسته می‌شود. هرچه قدر که ضخامت ماده جاذب بیش‌تر باشد یا عدد اتمی آن بالاتر باشد این

شیب بیش تر است. اگر فرض کنیم که قبل از این ضخامت خلأ باشد، شروع منحنی دز از صفر بوده چرا که ذرات محیط خلأ صفر است. در محیط جاذب نیز در ابتدا ذرات ثانویه وجود دارند ولی هنوز اندرکنشی رخ نداده و به تدریج که انرژی جذب شده در ماده در اثر عبور ذرات از لابلای ماده و اندرکنش با اتم‌های آن بیش تر شد، مقدار دز افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ثابتی می‌رسد. از آن پس وقتی که به اندازه کافی در عمق نفوذ کرد، بدلیل آن که یک سری از الکترون‌ها به عقب برمی‌گردند، یعنی الکترون‌های ثانویه اندرکنش می‌کنند و با محیط پراکنده می‌شوند، دز کاهش می‌یابد. یعنی وقتی دوباره به خلأ نزدیک می‌شویم، نسبت پراکندگی‌ها کم شده و دز کاهش می‌یابد.



تصویر (5-1) دز جذبی و کرما در آب که مورد تابش باریکه‌های موازی فوتونی حاصل از شتاب‌دهنده خطی 6 میلیون الکترون ولتی قرار گرفته است. فرض بر این است که از پرتو ایکس ترمزی صرف‌نظر کنیم. منحنی A دز جذبی در حالتی است که فوتون‌های اولیه تضعیفی نداشته باشند و منحنی B دز جذبی عملی و منحنی C کرما است. دیده می‌شود که دز از کرما بیش تر شده که اگر تابش ترمزی باشد، این مقدار کاهش پیدا می‌کند.

هر چه انرژی کم‌تر و محیط غلیظ‌تر باشد کرما با شیب بیش تر افت پیدا می‌کند و هر چه انرژی بیش تر و محیط رقیق‌تر باشد، کرما بیش تر به یک خط افقی و کمی مایل نزدیک می‌شود که هر دو منحنی مذکور در آب رسم شده که قابل مقایسه با شکل قبل است. به‌طور کلی کرما را راحت‌تر می‌توان محاسبه کرد ولی اندازه‌گیری دز ساده‌تر است چرا که در دز همه انرژی‌های الکترون‌های ثانویه و نیز ذرات باردار اولیه ثبت می‌شود نه فقط الکترون‌هایی که در محیط به‌وجود می‌آیند. در ضمن فقط طول مسیریابی از انرژی در دز محاسبه می‌شوند که در داخل محیط است نه آن‌هایی که به بیرون رفته‌اند که این مسئله دید بهتری را برای بررسی تأثیر تشعشع بر محیط مطرح می‌کند.

واحد کرما را معمولاً برحسب $[J/Kg]$ می‌خوانند البته گاهی هم با ذکر نام آن و سپس آوردن لفظ Gy گفته می‌شود.

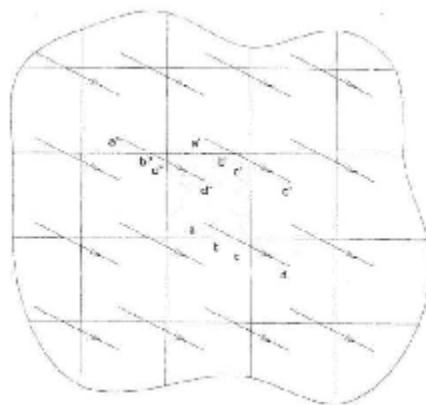
پیش از آن که سایر کمیات دزیمتری مطرح گردد، بهتر است به مفهوم تعادل الکترونی بپردازیم:

تعادل الکترونی یا تعادل ذرات باردار:

با استفاده از منحنی دزیمتری تا جایی که منحنی دزیمتری دارای شیب بالارونده است، هنوز تعادل الکترونی ایجاد نشده ولی وقتی به نقطه‌ای رسید که از آن جا با شیب ملایمی پایین رونده می‌شود، آن مرز تعادل الکترونی است. به این معنی است که ذرات بارداری که وارد حجم دزیمتری می‌شوند، انرژی که با خود به همراه می‌آورند، برابر انرژی ذاتی است که به خارج از آن حجم برده می‌شود. با توجه به تعریف دز وقتی انرژی ذرات بارداری که الکترون‌ها هستند و وارد حجم مورد نظر می‌شوند، با انرژی ذرات بارداری که از آن حجم خارج می‌شوند، با هم حذف شوند، بنابراین مثل این که الکترون‌ها نقش اساسی بازی نمی‌کنند و آنچه در فرمول دز، مؤثر است، انرژی ذرات بدون بار مانند فوتون‌ها یا نوترون‌ها می‌باشند. (در تعادل یونی به انرژی ورودی و خروجی ذرات بدون بار توجه کنیم که دز و کرما در این شرایط به هم نزدیک می‌شوند).

تعادل ذرات باردار را با CPE (Charged Particle Equilibrium) نشان می‌دهند. این تعادل دو حالت دارد. یک حالت تعادل ذرات باردار به صورت کامل یعنی ذرات ورودی و خروجی هم‌نوع و دارای توزیع زاویه‌ای و توزیع انرژی یکسان هستند که معمولاً چنین تعادل ایده‌آلی انجام نمی‌شود و یک تعادل نیم‌بند هم برای کار حفاظت‌سازی ما کفایت می‌کند و منظور نظر ما تعادلی است که ذرات دارای انرژی یکسان هستند. یعنی انرژی ورودی و خروجی یکسان است.

تصویر (2-5) یک شرایط تعادل الکترونی در حالت ساده را نشان می‌دهد و اگر ما بخواهیم دز و کرما را در مربع وسطی آن تحلیل کنیم، هر الکترون انرژی خود را در سه قسمت از دست داده است. می‌توانیم بگوئیم دزیمتری تنها مربوط به نواحی از مسیره‌است که در این ناحیه است که عبارتند از: ae ، $b'c'$ و $c''d''$



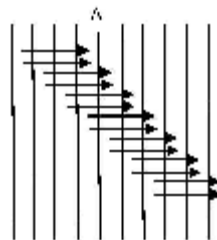
تصویر (2-5)

(در شرایط تعادل الکترونی همه مسیره‌ها مساویند.) برای محاسبه کرما به مسیری توجه می‌کنیم که اندرکنش در حجم مورد نظر آغاز شده است. یعنی در این جا اندرکنش از a تا d برای ذره پایینی در نظر گرفته می‌شود. در صورت برابر بودن تعادل الکترونی، دز با کرما برابر است.

تعادل الکترونی در چه شرایطی رخ می‌دهد؟ ذرات باردار تولید شده دارای طیفی از انرژی هستند که از انرژی‌های کم ممکن است تولید شوند تا انرژی‌های زیاد. مثلاً یک فوتون که می‌آید اگر پراکندگی کمپتون روی داده باشد، بعضی از الکترون‌های آن پر انرژی و بعضی دارای انرژی کم‌تر می‌باشند. نگاه می‌کنیم به الکترون‌هایی که بیش‌ترین انرژی را دارند ببینیم برد آن‌ها چه قدر است. معمولاً اگر پرتوهای از یک طرف انجام شده باشد، در همان امتدادی که پرتوهای بدون بار ما مثلاً از یک طرف آمده باشند، اگر ما در سطح ماده به اندازه برد پر انرژی‌ترین ذرات به جلو پیش‌روی کنیم، از آن به بعد می‌توانیم فرض کنیم که تعادل ذرات باردار برقرار است. در ابتدا چیزی از بیرون نیامده و هر چه تولید می‌شود، به سمت داخل می‌رود. به مرور که به سمت جلو می‌رویم کمی از ذرات پشتی وارد سطح می‌شوند و یک تعداد هم خارج می‌شوند تا این‌که می‌رسیم به عمقی که تعداد الکترون‌هایی که وارد می‌شوند با آن‌هایی که خارج می‌شوند، می‌توانند مساوی شوند. اگر محیط جاذب نباشند، تا فاصله زیادی این فرایند تکرار می‌شود ولی اگر محیط جاذب باشد، به دلیل این‌که خود فوتون‌ها دارند تضعیف می‌شوند، تعادل الکترونی ما تعادل کاملی نیست چون بعد از یک عمقی ورودی‌ها قوی‌تر از خروجی‌ها خواهند شد. همان قدر که ما به یک مقدار بیشینه برسیم یا آن مقدار ماکسیموم ثابت بماند یا با یک شیبی شروع به افت کند ما می‌فهمیم که شرایط تعادل الکترونی به صورت کامل یا ناقص برقرار شده است. مزیت آن این است که اگر ما بخواهیم اندازه‌گیری دز کنیم، محل قرار گرفتن دزیتری در تعادل الکترونی خیلی روی نتایج تأثیرگذار نیست. اما تا قبل از رسیدن به شرایط تعادل، اگر دزیتری را در هر قسمت بگذاریم یک عدد قرائت می‌شود.

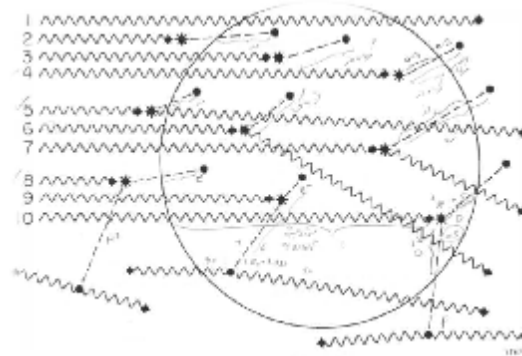
در شکل روبه‌رو از لایه A به بعد تعادل الکترونی روی داده یعنی

تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها برابر است.



تصویر (3-5)

برای تفهیم بیش‌تر، تصویر (4-5) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این شکل 10 فوتون وارد شده و هر دسته از فوتون‌ها دارای یک نوع انرژی هستند که در نوعی اندرکنش شرکت کرده‌اند. مثلاً دسته اول فوتوالکتریک و دسته دوم کمپتون و دسته سوم تولید زوج انجام داده‌اند.



تصویر (4-5)

پرتو 1: یک فوتون وارد شده و یک فوتون خارج می‌گردد و هیچ تأثیری در کرما و دز ندارد چرا که تفاضل انرژی ورودی و خروجی صفر است.

پرتو 2: فوتون ورودی قبل از ورود به حجم اندرکنش کرده و ذره باردار یا الکترونی که ایجاد شده یک مقدار از انرژی را داخل حجم از دست داده و یک مقدار از انرژی خود را خارج از حجم از دست داده است که سهمی از انرژی که داخل حجم است تنها در دز مؤثر می‌باشد و در کرما منظور نمی‌شود چون تولید در داخل حجم انجام نگرفته است.

پرتو 3: فوتون پس از ورود به حجم دچار اندرکنش شده و الکترونی تولید کرده که تمام انرژی الکترون در داخل حجم جذب شده لذا به‌طور کامل در دز و کرما، هر دو مؤثر محاسبه می‌شود.

پرتو 4: اندرکنش نزدیک سطح خارجی بوده و مقداری از انرژی الکترون به خارج از حجم معین منتقل شده لذا هم در سهم داخل حجم، در دز مؤثر بوده و کل مسیر هم در داخل و در خارج جزو کرما منظور می‌شود.

پرتو 5: این فوتون 1MeV به‌همراه دو فوتون بعدی کمپتون انجام داده‌اند. بنابراین یک فوتون و یک الکترون از آن‌ها ساطع شده است، پرتو 5 قبل از رسیدن به حجم اندرکنش کرده که مقدار انرژی فوتون ورودی و خروجی از حجم با هم برابر بوده و حاصل تفاضل آن‌ها صفر است ولی سهمی از انرژی ذره باردار الکترون که به درون حجم منتقل شده تنها در دز مؤثر بوده و در کرما منظور نمی‌شود.

پرتو 6: اندرکنش در حجم مورد نظر صورت گرفته پس فوتون ورودی 1MeV بوده و اگر فرض کنیم که سهم انرژی الکترون و فوتون مساوی باشد، فوتون خروجی دارای انرژی $0/5\text{MeV}$ بوده و کل انرژی الکترون در کرما و دز لحاظ می‌شود و جمع کل ذرات باردار ورودی و خروجی هم صفر است.

$$E = 1 - 0/5 = 0/5$$

پرتو 7: اندرکنش نزدیک سطح صورت گرفته است. 1MeV وارد شده و $0/5\text{MeV}$ خارج شده و بخشی از انرژی الکترون که داخل

حجم است جزو دز محسوب می‌شود و کرما کل آن.

پرتو 8: انرژی فوتون 3MeV است که قبل از ورود به حجم، تولید زوج انجام داده و تنها الکترون آن به داخل حجم راه یافته و فقط نیمی از انرژی خود را به داخل حجم منتقل کرده است که این سهم از انرژی منتقل شده در دز محاسبه می‌گردد ولی در کرما هیچ اثری ندارد چون اندرکنش داخل حجم صورت نگرفته است. انرژی فوتون ورودی و خروجی در این حجم صفر است تنها انرژی ذرات باردار ورودی داریم و خروجی صفر است.

پرتو 9: در پرتوهای فوق مقدار Q وجود نداشت چون تبدیل انرژی به جرم صورت نمی‌گرفت ولی در تولید زوج ممکن است مقدار Q ممکن است صفر نباشد که البته به شرایط بستگی دارد. اندرکنش داخل تولید زوج داخل حجم صورت گرفته و به دو ذره الکترون و پوزیترون تبدیل شده، پایینی پوزیترون و بالایی الکترون است. پوزیترون با یک الکترون دیگر در پدیده فنا شرکت کرده و دو فوتون با انرژی $0/511\text{MeV}$ آزاد شده است. انرژی فوتون ورودی 3MeV است و جمع انرژی فوتون‌های خروجی هم تقریباً 1MeV است لذا متفاوت این‌ها باید به انرژی تبدیل شده باشد البته اگر تعادل الکترونی برقرار باشد. انرژی جنبشی تقریباً برابر 2MeV است. ذرات باردار ورودی و بدون بار صفر است. انرژی مورد محاسبه در دز به صورت زیر است:

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} - Q$$

$$\Delta E = 3 - 1 - 0 = 2$$

با توجه به این‌که 2MeV صرف یونیزاسیون و برانگیختگی شده، پس Q صفر است. یک بار Q مثبت بود یعنی یک جرمی تولید شده ولی در پدیده فنا Q منفی شد چون جرم به انرژی تبدیل شده که با هم خنثی شدند. اما اگر یکی از پرتوهای 511 داخل حجم فوتوالکتریک انجام می‌داد و از این حجم خارج نمی‌شد، مقدار دز تغییر می‌کرد.

پرتو 10: فوتون ورودی پدیده تولید زوج انجام داده و یک الکترون و پوزیترون ایجاد کرده و پوزیترون در خارج از حجم در پدیده فنا شرکت کرده لذا انرژی در صورت دز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta E = 3 - 0/5 - 0/5 - 1 = 1$$

$0/5$ برای الکترون‌ها (جرم سکون الکترون) است که به طور فرضی سهم انرژی داخل حجم آن‌ها صفر در نظر گرفته شده است. Q در این‌جا دیگر صفر نیست چرا که انرژی به جرم تبدیل شده و عمل عکس آن صورت نگرفته است پس مقدار آن $1/02$ یا تقریباً 1MeV است.

این شکل طوری کشیده شده که تعداد کل ذرات بارداری که تولید شده‌اند با ذرات باردار خروجی با هم برابر است. یعنی از روی جدول مربوط به جمع همه پدیده‌ها با هم خنثی می‌شوند.

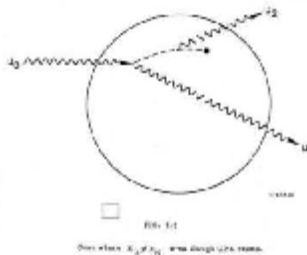
در جدول (1-5) اطلاعات تصویر (4-5) دسته‌بندی شده است.

Radiation number	Primary γ Energy	Secondary γ Energy	Secondary Charged Particle Energy		$(E_T)_e$	$(E_T)_c$	$(E_T)_n$	$(E_T)_p$	$(E_T)_d$
			e^+	e^-					
1	0.5	-	-	-	3	0	0.5	0.5	0
2	0.5	-	0.5	-	0.3	0	0	0	0
3	0.5	-	0.5	-	3	0	0.5	0	0
4	0.5	-	0.5	-	3	0.2	0.5	0	0
5	1	0.5	0.5	-	0.3	0	0.5	0.5	0
6	1	0.5	0.5	-	3	0	1	0.5	0
7	1	0.5	0.5	-	3	0.2	1	0.5	0
8	3	-	1	1	0.8	0	0	0	0
9	3	-	1	1	3	0	3	1	0
10	3	-	1	1	3	1	3	0	1
Σ					1.4	1.4	10	3	1

تفاضل انرژی فوتون‌های ورودی و خروجی کرما می‌شود. از روی جمع انرژی ذرات باردار ثانویه‌ای که در حجم موردنظر به وجود آمده‌اند نیز کرما قابل حصول است عدد 6 در می‌آید (جمع ستون چهارم و پنجم از طرف چپ). برای محاسبه دز هم می‌بایستی جمع جبری 5 ستون آخر را منظور کنیم. که باز هم عدد 6 به دست می‌آید و این نشان می‌دهد که کرما و دز به دلیل تعادل الکترونی با هم برابرند.

در بعضی مواقع تعادل الکترونی برقرار است ولی نمی‌توان گفت که دز و کرما برابر است حتی در شرایط دز کم‌تر از کرما می‌شود حال آن‌که در محیط‌هایی که خیلی جاذب باشد، دز می‌تواند بیش‌تر از کرما هم باشد. اما حالت عکس هنگامی است که تابش ترمزی ایجاد شود. یعنی انرژی الکترون‌ها در محدوده‌ای باشد که تابش ترمزی روی دهد. عدد اتمی ماده جاذب هم در تولید اشعه ترمزی یا X مؤثر است. تارگت‌های اشعه X را از تنگستن درست می‌کنند که هم عدد اتمی بالایی دارد و هم نقطه ذوب آن بالاست نمی‌آیند از آلومینیم استفاده کنند که بهره تولید آن کم باشد.

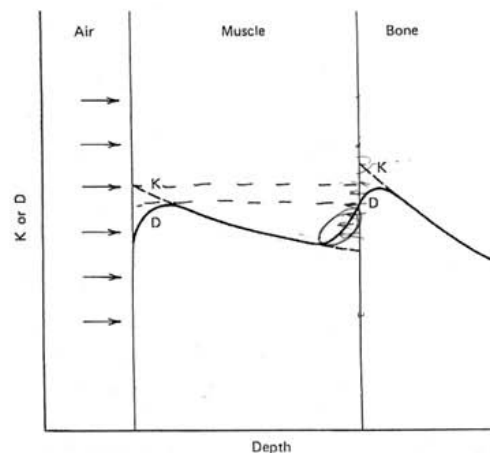
در تصویر (5-5) فرض می‌کنیم که شرایط تعادل الکترونی برقرار باشد. برای محاسبه دز داریم: $u_0 - u_1 - u_2$ و برای محاسبه کرما خواهیم داشت: $u_0 - u_1$ از مقایسه این دو عبارت دیده می‌شود که کرما بیش‌تر از دز است و دلیل آن هم سهم انرژی است که u_2 از مقدار دز می‌کاهد. این انرژی در اثر تابش ترمزی است که در حجم ما روی داده است.



تصویر (5-5)

در بافت‌های انسان به‌جز در استخوان‌ها، می‌توان دز و کرما را یکی گرفت را که عدد اتمی عناصر پایین است و تابش ترمزی روی نمی‌دهد. در مبحث حفاظ‌سازی این امر در طراحی حفاظ مطرح می‌شود و اگر حفاظ با عدد اتمی بالا مانند سرب ساخته شده

باشد، انرژی که به یک حفاظ داده می‌شود یا میزان افزایش دمای حفاظ برای ما مهم است. از آن‌جا که دز حفاظ برای ما مهم نیست و دز پشت حفاظ برای ما مهم است که میزان پرتوگیری فرد را نشان می‌دهد، برای ساخت حفاظ ضرایب تصحیح برای کرما منظور می‌شود که کاملاً فرد را در شرایط ایمن قرار دهد و موجب ارتقای کیفیت حفاظ و کارایی آن شود. کار اصلی ما محاسبه دز پشت حفاظ و کرما داخل حفاظ است.



تصویر (5-6)

در تصویر (5-6) هوا مانند خلأ عمل می‌کند و باید توجه داشته باشیم که دز هیچ‌گاه از صفر شروع نمی‌شود و همیشه تابش‌های پس‌زمینه داریم. در شکل زیر با مقایسه کرما و دز در مرز جدایی ماهیچه و استخوان و ماهیچه و خلأ دیده می‌شود که کرما در مرز استخوان ماهیچه بیشتر است. از روی شکل می‌توان فهمید که کرما دارای شیب تند است پس به احتمال زیاد پرتوها دارای انرژی اولیه کم بوده‌اند که تضعیف بیشتری بوده است و از آن‌جا که استخوان دارای عدد اتمی بیشتر است، جذب بیشتر صورت گرفته و تولید الکترون‌های ثانویه بیشتر است و کرما هم افزایش یافته است. در ضمن این‌که کرما برخلاف دز به‌طور گسسته در مرز جدایی دو محیط تغییر می‌کند. سؤالی که در این‌جا مطرح می‌شود این است که چرا در مرز مشترک ماهیچه و استخوان دز بالا می‌رود؟ به دلیل برگشت پرتوهای Backscatter دز افزایش می‌یابد. اثر مرزها interface effect وجود دارد. در پرتودهی بافت و استخوان باید به این نکته توجه شود که در مرز استخوان و ماهیچه دز بالاتری از آن‌چه که ما برای آن در نظر داریم، پرتودهی صورت می‌گیرد.

5-1-5) پرتودهی (exposure)

پرتودهی یا کسپوژر کمیتی است که با X نشان داده می‌شود. این کمیت در گذشته برای مشخص کردن میدان ناشی از پرتوهای γ و مورد استفاده قرار می‌گرفت. اکسپوژر را می‌توان به این ترتیب تعریف کرد: «مقدار مطلق بار یونی هم‌علامت که در هر جایی از هوا در اثر توقف کامل الکترون‌های مثبت و منفی به‌وجود آمده‌اند البته به‌جز آن‌هایی که توسط برمزشترالونگ به‌وجود

آمده‌اند به گونه‌ای که الکترون‌ها در حجم فزاینده‌ای از هوا در واحد جرمی از آن حجم آزاد شده باشند.»
 دامنه کاربرد این کمیت برای فوتون‌هایی است که انرژی آن‌ها بین 1 keV و 3 MeV باشد. تعیین چنین محدوده‌ای برای آن است که اندرکنش به تولید تابش ترمزی و تولید زوج پیش نرود. در محدوده کامپتون، پرتودهی مفهوم بیش‌تری پیدا می‌کند. به عبارت دیگر اگر یک حجم ΔV در نظر بگیریم که جرمش Δm باشد، وقتی فوتون‌ها با آن برخورد می‌کنند، ذرات ثانویه‌ای تولید می‌شود (مانند الکترون‌ها) که اگر بتوانیم همه جفت یون‌ها یا الکترون‌ها را جمع‌آوری کنیم، در صورتی که بارهای آن‌ها دارای یک علامت باشند و این تعداد را بر جرم تقسیم کنیم اکسپوزر حاصل می‌شود البته مشروط بر آن که در حجم مذکور همه ذرات باردار جذب شده باشند و شرایط تعادل الکترونی برقرار باشد.

مفهوم کمیت اکسپوزر ارتباط بسیار نزدیکی با کرما دارد اما دارای یک تفاوت عمده است. پدیده‌هایی که از طریق اندرکنش فوتون در حجم فزاینده‌ای از هوا اندازه‌گیری می‌شوند، انرژی جنبشی الکترون‌های اولیه نیست اما یونیزاسیون منجر به اندرکنش بیش‌تر الکترون‌های ثانویه با هوا می‌شود.

واحد SI برای اکسپوزر، کولون بر کیلوگرم است. واحد قدیمی آن نیز رونتگن R است که به‌طور دقیق $2/58 \times 10^{-4}$ کولون (با هر یک از علامت‌های بار به‌طور مجزا) در هر کیلوگرم از هوا در حجم فزاینده که در اثر اندرکنش فوتون اولیه رخ داده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کرما در هوا و اکسپوزر رابطه بسیار نزدیکی دارند. نسبت معینی از انرژی جنبشی اولیه ناشی از ذرات باردار ثانویه منجر به یونیزاسیون هوا می‌شود. فاکتور تبدیل که با علامت W نشان داده می‌شود، خوشبختانه انرژی است که مستقل از هر ماده‌ای است که اندرکنش در آن روی می‌دهد. برای هوا این مقدار $33/85 \pm 0/15$ الکترون ولت انرژی جنبشی برای هر زوج یون تخمین زده شده است. محصول K و W با تبدیل واحد مناسب، اکسپوزر X است. در هر صورت با توجه به فرمول زیر به‌علت آن که همه انرژی اولیه صرف یونش و برانگیزش نمی‌شود و مقداری به اشعه برماشترالونگ تبدیل می‌گردد، لذا مقدار کسر شده مذکور را باید در کل رابطه منظور شود.

$$\Delta Q = \frac{\Delta K}{W} \times e(1 - f_{\text{Brems}})$$

اندازه‌گیری اکسپوزر نیز همانند کرما مشکل است. برای اندازه‌گیری باید اطمینان حاصل کنیم که همه بارهای الکتریکی حاصل از اندرکنش در هوا در حجم حساس دتکتور در اندازه‌گیری لحاظ شده است. در هر حال تعدادی یونش خارج از این حجم صورت می‌گیرد و البته از طرف دیگر نیز تعدادی یونیزاسیون در فضای تست دیتکتور انجام می‌گیرد که منشأ آن‌ها اندرکنش فوتون‌هایی بوده که در خارج از حجم دتکتور صورت گرفته است و این‌ها را می‌توان جایگزین اندرکنش‌های از دست داده‌ی اول در نظر گرفت. البته به شرط آن که تعادل الکترونی برقرار باشد. به این ترتیب جمع‌آوری کاملی از بارهای الکتریکی صورت می‌گیرد. این شرایط

بیش تر برای فوتون‌های کم‌انرژی امکان‌پذیر است.

استفاده از اکسپوزر به‌عنوان اندازه‌گیری میدان پرتو تقریباً روبه انزوال است و دلیل استفاده آن در بعضی مواقع هم این است که ارتباط خوبی بین این کمیت و خطرات بیولوژیکی وجود دارد چرا که هوا و بافت از نظر خصوصیات اندرکنش فوتون با آن‌ها مشابه هستند.

5-1-6) آهنگ انتقال انرژی خطی (LET (Linear Energy Transfer

آهنگ انتقال انرژی خطی یا LET مقدار انرژی است که در هر تکه از مسیر حرکت ذره در ماده، از ذره مذکور به ماده منتقل می‌شود. این انتقال انرژی، در اثر برخورد ذره به ماده و در نتیجه الکترون‌هایی تولید می‌کند که منجر به یونش و برانگیزش اتم‌های ماده ایستاننده (stopping medium) می‌شوند. ممکن است مقداری از انرژی ذره در اثر برخورد با ماده تبدیل به فوتون گردد که در LET محاسبه نمی‌گردد و فقط برای ذرات باردار در نظر گرفته می‌شود. بیش‌تر انرژی از دست داده شده به تولید الکترون‌های کم‌انرژی منجر می‌شود که سرانجام انرژی خود را در مجاورت ناحیه مسیر ذره باردار به‌طور موضعی پراکنده می‌کنند.

$$LET = \frac{dE_1}{dl}$$

به هر حال بعضی از الکترون‌ها که دلتا نامیده می‌شوند، انرژی‌های بالایی دارند که نهایت پخش انرژی آن‌ها را نمی‌توان موضعی در نظر گرفت. اگر برای مقدار انرژی که جذب محیط جاذب می‌شود، انرژی از دست داده شده را حد بالای دلتا در نظر بگیریم، برای مثال این محدودیت را می‌توان با محدود شده نامید و آن را با L_{Δ} نشان داد. اگر L_{∞} باشد، همه فواصلی که ذره در طی آن‌ها انرژی خود را از دست داده، لحاظ می‌گردد. در این صورت LET معادل با توان ایستاندگی برخوردی می‌باشد. به‌عبارت دیگر وقتی ذرات باردار در ماده حرکت می‌کنند، با یک شیبی نسبت به مکان تغییر می‌کنند که هر چه مقدار LET بیش‌تر باشد، اثر بخشی آن بیش‌تر است. اگر ذره در بافت حرکت کند، LET منجر به تولید پراکسید هیدروژن H_2O_2 می‌شود. که تجزیه چنین ترکیبی موجب تولید رادیکال آزاد و در نتیجه آن تغییر ساختار مولکولی و ایجاد سرطان می‌شود. البته از این اثر برای از بین بردن سلول‌های سرطانی هم می‌توان استفاده کرد چرا که این سلول‌ها مقاومت کم‌تری در برابر این عامل از خود نشان می‌دهند. LET را معمولاً برحسب $keV\mu m^{-1}$ بیان می‌کنند.

5-2) کمیت‌های معادل دز (Dose equivalent)

اگر انرژی برجای گذاشته شده‌ای (imparted energy) را که توسط پرتوهای یون‌ساز به هر واحد جرم از بافت منتقل می‌شود، مقیاس مناسبی از خطرات بیولوژیکی بودند. دز جذبی بهترین کمیت دزیمتریک جهت استفاده در اهداف حفاظت در برابر تشعشع

می‌بود. به هر حال فاکتورهای دیگری نیز در رابطه با توزیع ویژه تشعشع همانند یونش و برانگیزش وجود دارند که باید آن‌ها را منظور کرد. ذرات بارداری که موجب یونش می‌شوند، ممکن است موجب تشعشع اولیه شوند یا خود آن‌ها محصول اندرکنش ذرات غیرباردار باشند که در اثر یونیزاسیون غیرمستقیم فوتون‌ها تولید شده‌اند.

1-2-5) مفهوم RBE

در رابطه با رفتار اساسی مواد بیولوژیکی یا ارگانیسم‌هایی که در معرض تشعشع قرار می‌گیرند، باید توجه داشت که حساسیت‌های مواد بیولوژیکی به انواع مختلف انرژی‌ها و مقادیر آن‌ها متفاوت می‌باشد. برای این منظور رادیوبیولوژیست‌ها RBE (Relative Biological Effectiveness) را برای هر نوع و مقدار انرژی پرتو و در واقع برای هر اثر بیولوژیکی یا endpoint تعریف نموده‌اند. RBE نسبت دز جذبی نوع مرجع تابش (به‌طور معمول پرتو X با انرژی 250keVp) که یک نوع و درجه تأثیر بیولوژیکی خاص را تولید می‌کند به مقدار مورد نیاز از دز جذبی هر پرتو که همان نوع و درجه تأثیر بیولوژیکی را تولید کند، معمولاً RBE را به‌طور تجربی تعیین می‌کنند و در آن همه فاکتورهای مؤثر بر پاسخ بیولوژیکی به تشعشع علاوه بر دز جذبی لحاظ می‌گردد.

2-2-5) فاکتور کیفیت (Quality Factor)

RBE به متغیرهای مختلفی وابسته است: ماهیت فیزیکی میدان پرتو، نوع ماده بیولوژیکی، پاسخ بیولوژیکی ویژه، درجه پاسخ، دز پرتو و نرخ دز یا اجزای دز. به این دلیل به‌کارگیری RBE در روابط مربوط به محافظت در برابر تشعشع یا استفاده آن در استانداردها و قوانین، بسیار پیچیده می‌شود. لذا در سال 1964 گروهی از متخصصان به‌جای RBE عاملی به‌نام QF یا فاکتور کیفیت را تعریف کردند که برخلاف RBE که در هر Endpoint بیولوژیکی ویژه یک تعریف معین داشت، Q در واقع میانگینی است که به‌طور کلی برای همه endpointهای مورد نظر در یک پرتوگیری با پرتوهای کم‌انرژی به‌کار می‌رود. مثلاً برای سرطان یا بیماری‌های ارثی. QF و دز جذبی هر دو توابع نقطه‌ای هستند لذا این کمیت‌های قطعی را می‌توان در نقاطی از فضا تخمین زد. نتیجه کار را به‌عنوان معادل دز Dose equivalent یا H تعریف کرده‌اند و این تعریف اندازه‌گیری مناسبی از ریسک پرتو است که در قوانین مربوط به حفاظت در برابر اشعه و حدود دز برای پرتوکاران به‌کار می‌رود.

از آن‌جا که چگالی خاص یونش و برانگیزش در طی مسیرهای ذره به‌عنوان پارامتر مهمی در تعریف متغیرها در اثرات بیولوژیک پرتوها با انواع و انرژی‌های مختلف به‌کار می‌رود و بدیهی است که چگالی با LET در ارتباط است، لذا QF نیز تعبیری از LET است. به‌دلیل این‌که بافت حاوی مقدار زیادی آب است و عددی اتمی عناصر بافت بسیار شبیه آب می‌باشد، QF به‌صورت تابع

ریاضی از LET نامحدود در آب تعریف می‌گردد.

نظر به این که یک ذره باردار انرژی خود را در طی مسیر حرکتش در ماده از دست می‌دهد، L_{∞} با تغییر انرژی ذره تغییر می‌کند و چون QF تابعی است از L_{∞} ، می‌توان در هر قسمت از مسیر حرکت ذره برای آن مقداری تعیین کرد. به هر حال نسبت دادن یک QF به یک تشعشع اولیه خاص، چه به‌طور مستقیم یونیزان باشد، چه غیرمستقیم، نیازمند اطلاعات بیش‌تری از ماهیت انرژی ذره است. در اصل آن چه که باید در ابتدا تعیین گردد، چگونگی دز جذبی است که متناسب است با انرژی که ذره با LETهای متفاوت از دست می‌دهد. سپس باید Q که با L_{∞} متناسب است را، لحاظ کرد. البته در این صورت \bar{Q} یا فاکتور کیفیت متوسط منظور می‌گردد. اگر QF تابعی خطی از LET باشد، با در نظر گرفتن یک LET میانگین می‌توان مقدار متوسطی برای Q در نظر گرفت. جدول زیر بیانگر ارتباط خطی آنها است که به‌طور موضعی مقدار Q تعیین گردیده است:

جدول (2-5)

$L_{\infty} (\text{KeV} \mu\text{m}^{-1})$	$Q(L_{\infty})$
3/5 or less	1
7/0	2
2/3	5
53	10
175 or more	20

ارتباط بین Q و L_{∞} در جدول زیر به‌طور غیرخطی ارائه گردیده که برای مقادیر معلومی از L_{∞} داده شده است.

جدول (3-5)

$L_{\infty} (\text{KeV} \mu\text{m}^{-1})$	$Q(L_{\infty})$
<10	1
10-100	$0/32L_{\infty} - 2/2$
>100	$300/\sqrt{L_{\infty}}$

QF را می‌توان برای پرتوهای یون‌ساز غیرباردار نیز تعریف کرد و این توصیف با آگاهی از ویژگی‌های ذرات باردار ثانویه که در اثر

اندرکنش پرتوهای اولیه غیرباردار با ماده تولید می‌شوند، امکان‌پذیر است. از آن‌جا که الکترون‌های ثانویه توسط اشعه گاما یا X آزاد می‌شوند، همواره می‌توان یک QF را به آن‌ها نسبت داد، همان فاکتوری که به‌طور کلی برای همه فوتون‌های یونیزاین به‌کار می‌رود. شرایط برای نوترون‌ها به این سادگی نیست و مقادیر میانگین باید برای آن‌ها تعیین گردد.

خطرات کلی تشعشع را می‌توان با تابع دزیمتریک نقطه‌ای که معادل دز¹ گفته می‌شود، موثر توجه قرار داد. این تابع همبستگی خوبی را بین خطرات تشعشع و میزان پرتوگیری بیان می‌کند که از دز جذبی و میانگین QF حاصل شده است و براساس شارش کل ذرات باردار در مجاورت نقطه مورد محاسبه استوار است. در این کمیت بدن به‌طور کلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تخمین آن می‌توان تعیین کرد که به‌طور کلی چه ریسکی بر شخص حادث می‌شود نه ریسکی که یک اندام خاص مورد پرتوگیری قرار بگیرد. این کمیت مستقل از آن است که منشأ ایجاد مخاطره در بدن چیست؟ واحد SI برای آن سیورت است و آن را با Sv نشان می‌دهند. اگر دز براساس Rem تعریف شود، معادل دز برحسب Rem می‌شود. معادل دز از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$H(\text{sivert}) = D(\text{gray}) \times \bar{Q} \quad (\text{I})$$

$$\bar{Q} \equiv \frac{1}{D} \int_0^{\infty} dL_{\infty} D(L_{\infty}) Q(L_{\infty}) \quad (\text{II})$$

$$\bar{Q} \equiv \frac{1}{D} \sum_i D_i Q_i \quad (\text{III})$$

با جایگذاری رابطه (III) در (I) به رابطه زیر دست می‌یابیم:

$$H(\text{Sievert}) = \sum_{i=1}^N Q_i D_i$$

که i مربوط به انرژی‌های مختلف پرتوها و انواع آن‌هاست. حال اگر به‌جای QF از W_R یا (Radiation Weighting Factor) استفاده کنیم که کاربرد آن در مقاصد حفاظت در برابر اشعه است و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

که روی Rهای مختلف جمع بسته می‌شود و گویای انرژی‌ها و انواع مختلف اشعه است.

3-5) مفهوم تابع پاسخ پرتوها

از آن‌جا که کمیات دزیمتری دارای پاره‌ای از خصوصیات مشابه هستند، مانند شارش در یک میدان خاص، می‌توان برای هر کدام از انواع دز یک تابع پاسخ در نظر گرفت. در واقع این تابع پاسخ شارش را به پاسخ دلخواه ما تبدیل می‌کند. پاسخ موردنظر می‌تواند هر یک از کمیات دزیمتری کرما، دز جذبی، دز معادل و ... باشد. علاوه بر این که تابع پاسخ متناسب هر نوع پاسخ متفاوت است، بنابراین اهداف مختلف و نوع پرتو نیز تغییر می‌کند. برای مثال در تابع نقطه‌ای که بدن به‌عنوان هدف است با توابعی که به‌طور عمومی

¹ Dose equivalent

برای تمام مواد و همه نقاط نوشته می‌شود، متفاوت است یا توابع پاسخ نوترون‌ها و فوتون‌ها و ذرات باردار متفاوت است. در این قسمت دسته‌بندی‌های مختلف پاسخ ارائه خواهد شد.

4-5) توابع پاسخ موضعی برای اهداف نقطه‌ای¹

اگر هدف را به‌عنوان نقطه‌ای واحد در فضا تصور کنیم و فرض کنیم که به‌طور مساوی به تمام پرتوها در همه جهت پاسخ می‌دهد، خواهیم داشت:

$$R(\mathbf{r}_0) = \int_0^\infty dE R(\mathbf{r}_0, E) \Phi(\mathbf{r}_0, E)$$

بررسی هدف در یک نقطه: \mathbf{r}_0 و شارش: $\Phi(\mathbf{r}_0, E)$ و پاسخ تابع: $R(\mathbf{r}_0, E)$ و پاسخ: $R(\mathbf{r}_0)$

اگر ما ذره‌ای تک انرژی داشتیم، $\Phi(\mathbf{r}_0)$ تنها در $R(\mathbf{r}_0, E)$ ضرب می‌شود و عبارت زیر را تشکیل می‌دهد:

$$R(\mathbf{r}_0) = R(\mathbf{r}_0, E) \Phi(\mathbf{r}_0)$$

اگر چند انرژی داشتیم بر روی انرژی‌های مختلف جمع می‌بندیم. این در مواردی است که طیف گسسته داشته باشیم.

$$R(\mathbf{r}_0) = \sum_{i=1}^N R(\mathbf{r}_0, E_i) \Phi(\mathbf{r}_0, E_i)$$

در مواقعی که دسته پرتوهای ما چند انرژی است، می‌توان انرژی‌های متعدد را دسته‌بندی کرد. در عبارت زیر علامت g بیانگر دسته‌بندی روی انرژی‌هایی است که در یک محدوده قرار دارند:

$$R(\mathbf{r}_0) = \sum_g R(\mathbf{r}_0, E_g) \Phi_g(\mathbf{r}_0)$$

$$\Phi_g(\mathbf{r}_0) = \int_{E_g} \Phi(\mathbf{r}_0, E) dE$$

در گروه‌بندی باید نوع اندرکنش مورد توجه قرار بگیرد و با توجه به نوع اندرکنش غالب دسته‌بندی روی آن محدوده انرژی صورت پذیرد. برای نوترون‌ها بیش‌تر این‌گونه مسائل مطرح می‌گردد و البته در دسته‌بندی انرژی‌ها باید به طریقی عمل کرد که هیچ‌کدام از انرژی‌ها از نظر دور نماند.

در تمامی توابع فوق‌الذکر در صورتی که $R = 1$ تنها پاسخ مربوط به خود شارش را خواهیم داشت.

با توجه به مفاهیم فصل سوم قوانین بنیادینی شرح داده شد که برای ذرات تک انرژی که از حجم ΔV عبور می‌کنند، تعداد اندرکنش‌های محتمل عبارتند از:

¹ Local response functions for point targets

$$\Delta n = \sigma N \Phi \Delta V$$

σ سطح مقطع میکروسکوپی و N تعداد اتمها در واحد حجم ماده است. اگر ϵ میانگین انرژی منتقل شده از میدان پرتوهای اولیه به محیط در طی یک اندرکنش باشد، ΔE انرژی کل انتقال یافته به ماده از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\Delta E = \epsilon \sigma N \Phi \Delta V$$

از آنجا که دز به معنای انرژی برجای گذاشته شده در واحد جرم می‌باشد و جرم نیز معادل $\rho \Delta V$ است، لذا پاسخ دز را به این صورت می‌توان نوشت:

$$R \equiv \frac{\Delta E}{\rho \Delta V} = \epsilon \frac{\sigma N}{\rho} \Phi$$

با تعمیم فرمول فوق بر روی تمام انرژی‌های ذرات و ترکیبی از اتمهای گوناگون، ϵ برای تمام اندرکنشها بیان می‌شود و عبارت زیر به دست می‌آید:

$$R(r) = \int_0^{\infty} dE \sum_i \frac{N_i(r)}{\rho(r)} \sum_j \sigma_{ji}(E) \epsilon_{ji}(E) \Phi(r, E)$$

تابع پاسخ از رابطه فوق به این صورت قابل نتیجه‌گیری است:

$$R(r, E) = \sum_i \frac{N_i(r)}{\rho(r)} \sum_j \sigma_{ji}(E) \epsilon_{ji}(E)$$

i جمع روی اتمها و ایزوتوپهای مختلف است که مورد بررسی قرار می‌گیرند، $N_i(r)$ تعداد اتمها یا هسته‌های i ام در واحد حجم و j جمع روی اندرکنشهاست. $\sigma_{ji}(E)$ سطح مقطع از نوع j ام با ماده i ام است و $\epsilon_{ji}(E)$ انرژی متوسط منتقل شده به محیط در اثر هر نوع اندرکنش¹ می‌باشد.

لازم به ذکر است که در پاسخهای مختلف، تنها $\epsilon_{ji}(E)$ متفاوت است. از آنجا که در شرایط تعادل الکترونی دز و کرما تقریباً با یکدیگر برابر هستند، می‌توان تابع پاسخ فوق را برای هر دو کمیت در شرایط تعادل الکترونی به کار برد. برای محاسبه تابع پاسخ معادل دز که یک کمیت نقطه‌ای است، رابطه زیر قابل استفاده است:

$$H(r) = \int_0^{\infty} dE R_k(E) Q_n(E) \Phi(r, E)$$

$Q_n(E)$ مقدار ضریب کیفیت² است که متناسب با اندرکنش ذرات ثانویه است و تابعی از LET می‌باشد که پیش از این بحث

¹ لازم به ذکر است که هر اندرکنش با ماده سهمی خاص در دز جذبی دارد.

² Quality Factor

شده است.

از آنجا که در حفاظت‌سازی، فوتون‌ها و نوترون‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بررسی توابع پاسخ نیز برای نوترون‌ها و فوتون‌ها حائز اهمیت است. در این مجموعه از بحث روی توابع نوترون‌ها صرفاً نظر کرده و صرفاً پاسخ‌های مربوط به توابع فوتون‌ها مطرح می‌گردد.

5-5) توابع پاسخ موضعی برای فوتون‌ها:

معمولاً پاسخ فوتون‌ها را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$R(r) = \int_0^{\infty} dE \frac{\mu_d(r, E)}{\rho(r)} E \Phi(r, E)$$

و $\mu_d(r, E)$ ضریب جذب خطی انرژی¹ از طریق این رابطه قابل تعریف است:

$$\mu_d(r, E) = \sum_i N_i(r) \sum_j \sigma_{ji}(E) \frac{\epsilon_{ji}(E)}{E}$$

$$R(E) = E \left(\frac{\mu_d(E)}{\rho} \right)$$

μ_d با توجه به نوع پاسخ اعم از کرما و دز جذبی و ... بنابر آنچه که در فصل سوم صحبت شد، متفاوت است. مثلاً برای کرما μ_{tr}

و برای دز جذبی μ_{en} می‌باشد و توابع پاسخ هر یک به صورت زیر ارائه می‌گردد:

تابع پاسخ کرما:

$$R_k(E) = 1/602 * 10^{-10} E \left(\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} \right)$$

$1/602 * 10^{-10}$ برای تبدیل واحد $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2$ به $\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تابع پاسخ دز:

$$R_D(E) = 1/602 * 10^{-10} E \left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)$$

تابع پاسخ معادل دز:

$$R_H(E) = Q_F R_D(E)$$

به ضرایب پاسخ دز ضرایب تبدیل شارش به دز¹ نیز می‌گویند.

¹ Linear energy deposition coefficient

5-6) توابع پاسخ برای انسان به عنوان هدف²:

دو نوع کمیت دز برای اهداف حفاظت در برابر پرتو برای حفظ سلامتی انسان، تعریف شده است. هر دو نوع در رابطه با فانتومها³ تعریف می‌شوند. فانتوم عبارت است از مدل ریاضی یا فیزیکی بدن انسان است. این دو نوع کمیت عبارتند از:

- کمیات حد دز (limiting Dose quantities)

- کمیات عملیاتی (Operational Dose quantities)

کمیات حد دز: این کمیات طبق توصیه‌های NCRP و ICRP برای محدودیت‌های دز در حفاظت در برابر پرتوها ارائه شده‌اند. آن‌ها براساس فانتومهای آنتروپومورفیک⁴ و میانگین‌های وزن‌دار برای دزهای عمقی در اندام‌های انسان تعریف می‌گردند.

کمیات عملیاتی: به منظور اهداف حفاظت در برابر پرتوها در محیط‌ها زیر حدودی که برای دز توصیه شده است، نیازمند تعریف کمیاتی عملیاتی هستیم. این کمیت‌ها قابل اندازه‌گیری هستند و براساس فانتومهای ساده⁵ کروی و یا استوانه‌ای یا گوه‌ای شکل قابل تعریف هستند. از کمیت‌های عملیاتی برای کالیبراسیون ابزارها در محیط‌های حفاظت شده نیز استفاده می‌شود.

5-6-1) ویژگی پرتوی محیطی (Characterization of Ambient Radiation):

وضعیت میدان با حضور فرد در آن و یا بدون حضور فرد باید مورد بررسی قرار بگیرد. چرا که حضور فرد روی شارش پرتوهای میدان مؤثر می‌باشد. لذا اصطلاحی به نام میدان آزاد (Free field) قابل تعریف است. اگر در یک نقطه معین از فضا شارش پرتوهای گوناگون بدون حضور بدن در آن‌جا مورد بررسی قرار گیرد، به آن میدان آزاد گویند. حال اگر فرض کنید که در آن نقطه یک نوع پرتوی منفرد فوتون یا نوترون دارای شارش $\Phi(E)$ باشد (بدون حضور فرد)، می‌دانیم به تعیین و محاسبه این مسئله بپردازیم که در آن نقطه و برای یک نوع پرتوی خاص، کمیت دز R برای فانتومی از انسان با به کارگیری تابع پاسخ $R(E)$ از طریق رابطه زیر چه قدر است:

$$R = \int_0^{\infty} dE R(E) \Phi(r, E)$$

در این رابطه R تابع پاسخ مربوط به فانتوم و Φ طیف انرژی شارش بدون حضور فرد است. تولید تابع پاسخ مستلزم تعیین دز جذبی و محاسبه پرتوها در داخل فانتوم است که این دز ناشی از برخورد پرتوها در توزیع زاویه‌ای تعریف شده است. به این ترتیب

¹ Fluence to dose Conversion coefficient
² Response functions for the human as a target
³ Phantom
⁴ Anthropomorphic
⁵ Geometric

می‌توانیم پاسخ را برای فانتوم با اعمال یک ضریب به نام تابع پاسخ که در جداول مطرح شده، محاسبه نمائیم. توزیع انرژی و نیز توزیع زاویه‌ای شارش ناشی از پرتوهای یون‌ساز در یک نقطه از فضا را میدان پرتو در آن نقطه گویند. هر دو کمیت حد دز و کمیت عملیاتی، به‌عنوان دز پرتوها در فانتوم‌ها قابل تعیین هستند به‌گونه‌ای که آن‌ها تحت پرتودهی یک میدان یکنواخت قرار می‌گیرند که از یک میدان پرتوی واقعی در یک نقطه از فضا ناشی می‌شود. در میدان گسترده (Expanded field) تمام سطح فانتوم تحت پرتوگیری اشعه‌ای قرار گرفته که توزیع زاویه‌ای و توزیع انرژی آن مشابه در یک نقطه دلخواه از میدان واقعی است. در میدان‌های گسترده و جهت‌دار (Expanded and aligned field) فانتوم تحت پرتوگیری تک‌جهته قرار می‌گیرد به‌گونه‌ای که تنها طیف انرژی آن مشابه میدان واقعی در یک نقطه است. همان‌طور که پیش از این مطرح شد، فانتوم‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. یک دسته فانتوم‌های هندسی ساده که دارای یک شکل هندسی مانند کره هستند و دیگر فانتوم‌های آنتروپومورفیک که برای مؤنث و مذکر متفاوت است و دارای اعضا و جوارح انسان است. پاسخ دز برای هر یک به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ضمن این‌که کمیت‌های متفاوتی با هر یک قابل ارزیابی است.

5-6-2) تابع پاسخ براساس فانتوم‌های هندسی ساده:

از دسته فانتوم‌هایی که دارای هندسه ساده هستند، می‌توان به نوع استاندارد دی که توسط کمیته ICRU طرح شده اشاره نمود. این فانتوم که به کره ICRU معروف است، به قطر 30cm و چگالی $1/0 \text{ g/cm}^3$ و از جنس معادل بافت می‌باشد و ترکیب آن دارای 76/2% اکسیژن، 11/1% کربن، 10/1% هیدروژن و 2/6% نیتروژن است. هندسه‌های مختلف و کمیت‌های قابل بررسی برای هر یک به‌شرح زیر می‌باشد:

فانتوم‌های کروی:

1- کمیت معادل دز عمقی¹: این کمیت $H_{1,d}$ در یک میدان پرتو مشابه با توزیع انرژی و شارش در یک میدان گسترده در نظر گرفته می‌شود. در ضمن دسته پرتوهای موازی از یک جهت به آن می‌تابد. کمیت معادل دز عمقی گویای معدل دز بیشینه در داخل کره است به‌گونه‌ای که مقدار بیشینه به شعاع 14cm از مرکز کره ICRU تعیین گردد. هنگامی که دسته پرتوهای نوترون و فوتون چند انرژی باشند، مشکلاتی در استفاده‌ای کمیت به‌وجود می‌آید. چرا که در عمقی از کره، بیشینه پرتو با توجه به نوع پرتو متغیر است. این کمیت جمع‌پذیر نمی‌باشد.

¹ Deep Dose equivalent Index

- 2- کمیت معادل دز سطحی¹: این کمیت $H_{1,s}$ مشابه کمیت قبل است با این تفاوت که معادل دز برابر مقدار بیشینه‌ای است که در عمق 0/007 و 0/010cm از سطح کره ICRU تعریف می‌گردد. (منطبق بر حساسیت پرتوی سلول‌های پوست)
- 3- معادل دز محیطی²: نماد این کمیت $H^*(d)$ است. معادل دز محیطی در یک میدان پرتو مشابه با توزیع انرژی و شارش در یک میدان گسترده با دسته پرتوهای موازی از یک جهت به آن می‌تابد، در نظر گرفته می‌شود. معادل دز در عمق d در امتداد شعاعی برخلاف جهت تابش پرتوها بررسی می‌گردد. این کمیت دز محاسبه شده مرتبط با معادل دز شخصی $H_p(d)$ است. معادل دز شخصی مبین معادل دز در بافت نرم در نقطه‌ای به عمق d در بدن است. برای پرتوهایی با عمق نفوذ کم، عمق‌های 0/07mm برای پوست 3mm برای عدسی چشم در نظر گرفته می‌شود.
- 4- معادل دز جهت‌دار³: برای این کمیت $H'(d, \Omega)$ توزیع زاویه‌ای و توزیع انرژی برای شارش در یک نقطه مرجع در سراسر سطح کره در نظر گرفته می‌شود. عمق‌هایی که برای معادل دز جهت‌دار در نظر گرفته می‌شود، همانند عمق‌های مفروض برای معادل دز محیطی است. ویژگی معادل دز زاویه‌ای با نماد Ω نشان داده می‌شود و لازم است که زاویه‌ای که با هر یک از پرتوها می‌سازد، تعیین می‌گردد. در یک محیط که تحت تابش تک جهته قرار می‌گیرد، $H'(d, \Omega)$ را با $H'(d)$ نشان می‌دهند و معادل $H^*(d)$ است.

هندسه‌های تشعشع برای فانتوم‌های کروی: توابع پاسخ نوترون و فوتون برای عمق‌های مختلف به هندسه تابش یا تشعشع بستگی دارد که عبارتند از:

PAR: a single parallel beam

OPP: two opposed plane parallel beams

ROT: a rotating plane parallel beam

ISO: an isotropic radiation field

فانتوم‌های استوانه‌ای و تخت: توابع پاسخ برای دسته پرتوهای موازی و صفحه‌ای هنگامی که به فانتوم‌های کروی و استوانه‌ای برخورد می‌کنند، قابل بررسی است. توابع پاسخ مربوط به این دو نوع فانتوم در جداولی فهرست شده است.

3-6-5) توابع پاسخ براساس فانتوم‌های آنتروپومورفیک:

کمیت‌های دز مؤثر و معادل دز مؤثر و دز معادل برای این‌گونه فانتوم‌ها تعریف شده است.

(1) دز معادل (Equivalent Dose)

¹ Shallow dose equivalent Index

² Ambient Dose Equivalent

³ Directional Dose Equivalent

کمیته ICRP معتقد است که جزئیات و دقت پایداری در Q-L (رابطه بین LET و Q) برای اصلاح دز جذبی آن قدر معتبر نیست که بتواند احتمال آسیب‌های ناشی از پرتوگیری تشعشع با LET بالا را نشان دهد. به دلیل اطلاعات رادیولوژیکی غیرقطعی به جای Q یا \bar{Q} ، در حال حاضر کمیته اظهار داشته است که Radiation Weighting Factor را بر اساس مروری بر اطلاعات بیولوژیکی، شرایط مختلف پرتوگیری و بررسی نتیجه محاسبات قدیمی ambient dose equivalent تعیین کنند. علاوه بر آن کمیته فاکتورهای اصلاح‌کننده را برای بافت یا ارگان به طور ویژه ارائه می‌دهد که براساس نوع و کیفیت میدان خارجی تشعشع یا نوع و کیفیت رادیونوکلئیدهای داخل بدن تقسیم‌بندی می‌شود. بنابراین اگر از ضریب اصلاح WR به جای Q استفاده کنیم به جای معادل دز، دز معادل را با روابط زیر خواهیم داشت:



تصویر (7-5)

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

T=Tissue و R=Radiation

و اگر رابطه بالا روی Rها جمع بسته شود برای تمام تشعشعات با انرژی‌های مختلف را ارائه می‌دهد که برابر است با:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

که به آن (Tissue Equivalent Dose) می‌گویند. باتوجه به این که ماهیت پرتوگیری هر بافت نسبت به بافت دیگر متمایز است لذا به هر بافت وزنی نسبت داده می‌شود که به آن W_T گویند و برای آن که تأثیر هر بافت به طور جدا منظور گردد، رابطه زیر به عنوان دز مؤثر مطرح می‌گردد:

$$E = \sum_T W_T H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

W_R عددی مربوط به ضریب هستند که هر چیزی می‌توانند باشند ولی W_T ها وقتی روی تمام بافت‌هایی که تحت تابش قرار گرفته اند جمع بسته می‌شوند، عدد کل آن‌ها معادل 1 است، یعنی هر کدام از W_T ها عددی کوچک‌تر از 1 است.

$$\sum_T W_T = 1$$

اگر یک D متوسط به همه اعضا نسبت دهیم، خواهیم داشت:

$$E = \sum \bar{D} W_R$$

که همان رابطه مربوط به معادل دز می‌شود. یعنی در معادل دز برای کل بدن، دز یکسان در نظر گرفته می‌شود که البته چنین چیزی غیردقیق است. شایان ذکر است که W_R مستقل از بافت یا ارگان است و W_T مستقل از تشعشع است. فاکتور کیفی متوسط یا همان W_R برای انواع مختلف تشعشع با مقادیر متفاوت در جدول (4-5) ارائه شده است:

جدول (4-5)

Radiation	W_R
Gamma and x rays of all energies	1
Electrons and muons of all energies	1
Protons (> 1 MeV, other than recoil)	5 ⁶
Neutrons ^b	
< 10 keV	5
10-100 keV	10
100 keV-2 MeV	20
2-20 MeV	10
> 20 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

فاکتور کیفی نوترون از رابطه زیر نیز حاصل می‌گردد. البته باید E را بر حسب MeV در فرمول جایگذاری نمود.

$$W_R = 5 + 17 \exp(-[\ln(2E)]^2 / 6)$$

4-6-5) مقادیر استاندارد پرتوگیری

مطابق فلسفه (ALARA: As Low as reasonably Achievable) طبق قوانین بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها، پرتوگیری شغلی نباید از حدود زیر تجاوز کند:

- 1) میانگین دز مؤثر سالانه 20(mSv) برای 5 سال متوالی یا به عبارت دیگر در سال نباید فرد بیش از 100(mSv) دز دریافت کند.
- 2) دز مؤثر در یک سال از 50(mSv) تجاوز نکند.
- 3) دز معادل برای عدسی‌های چشم از 150(mSv) در سال تجاوز نکند.
- 4) دز معادل برای دست‌ها و پاها و پوست 500(mSv) در سال باشد.

البته تا جایی که ممکن است طبق فلسفه ALARA و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و اجتماعی و فرهنگی پرتوگیری را کاهش داد.

مثال: فرض کنید که فردی 50 هفته در سال کار می‌کند و هر هفته هم 40 ساعت مشغول به کار است. لذا این شخص 2000

ساعت در سال در محیط پرتوکار است. نرخ دز مؤثر در هر لحظه چه قدر باید باشد تا این فرد به حد تعیین شده برسد.

$$\dot{H} < \frac{20}{2000} = 0.01 \text{ msv/h} \quad \text{or} \quad 10 \mu\text{sv/h}$$

در مورد مثال فوق \dot{H} چه قدر باشد تا حاشیه ایمنی 10 مراعات شود؟ حاشیه ایمنی یعنی این که به دز کمتری دست یابیم.

$$\text{Safty factor} = 0.01/10 = 0.001 \text{ mSv/h} = 1 \mu\text{Sv/h}$$

در پرتوگیری غیرشغلی نیز باید موارد زیر را در نظر گرفت:

(1) در مورد مردم عادی $\frac{1}{20}$ است و اعضای بدن آنها جداگانه تحت بررسی قرار نمی گیرد.

(2) برای کسانی که تحت درمان و تشخیص هستند، هیچ گونه از موارد فوق در نظر گرفته نمی شود و طبق پرتکل هایی که در نظر گرفته شده می بایست عمل شود.

(3) یک فرد به طور طبیعی تحت تشعشع پرتوهای کیهانی و پرتوهای است که از خاک و سنگها ساطع می گردد. این مقدار $0.1 - 0.2 \mu\text{Sv/h}$ می باشد. وقتی خود طبیعت این قدر اشعه می دهد، دیگر حفاظ خیلی پایین تر از این مقدار طراحی نمی شود و مقرون به صرفه نیست.

ناحیه بندی:

\dot{H} یا نرخ دز مورد ارزیابی قرار می گیرد. گاهی به جای \dot{H} از E هم به کار می برند. برای ناحیه بندی با دستگاهها به مانیتورینگ محیط می پردازند و با تبدیل کمیتها به هم می توانند مقادیر استاندارد را به شرح زیر اعمال کنند:

$$(1) \text{ اگر } \dot{H} < 2.5 \mu \frac{\text{SV}}{\text{h}} \text{ به آن ناحیه، منطقه آزاد گفته می شود.}$$

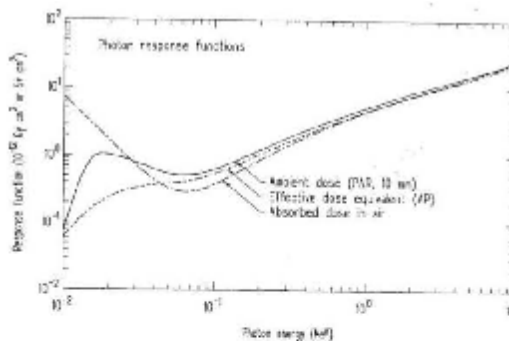
(2) اگر $2.5 < \dot{H} < 7.2 \mu \frac{\text{SV}}{\text{h}}$ به آن ناحیه، منطقه تحت نظارت گفته می شود. این ناحیه حصار دارد و هر کس نمی تواند در آن مکان رفت و آمد کند. افراد باید تحت کنترل باشند.

(3) اگر $7.5 < \dot{H} < 2000 \mu \frac{\text{SV}}{\text{h}}$ به این منطقه ناحیه تحت کنترل می گویند. ممکن است که فرد دز یکسال را در یک روز دریافت کند. در این منطقه شخص باید به همراه یک متخصص فیزیک بهداشت وارد محیط شود.

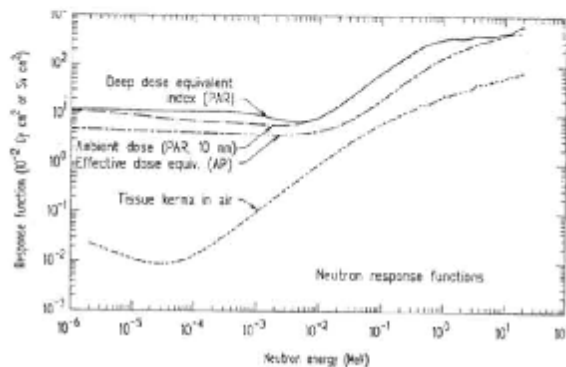
$$(4) \text{ اگر } \dot{H} > 2000 \mu \frac{\text{SV}}{\text{h}} \text{ به این منطقه ممنوعه گفته می شود و برای رفع حادثه افراد باید ریسک کنند.}$$

5-6-5) مقایسه‌ای میان توابع پاسخ:

دو تصویر 5-7 و تصویر 5-8 توابع پاسخ مختلف را فوتون‌ها و نوترون‌ها مقایسه نموده و همان‌طور که در تصویر 5-7 نشان داده شده است تمام پاسخ‌های مربوط به فوتون‌ها پس از انرژی $0/1\text{MeV}$ تقریباً به هم نزدیک شده است. برای دزیمتری پرتوها و نظارت بر رعایت استانداردها، این وضعیت مطلوبی است. ابزارهایی مانند اتاقک یونش، به دز جذبی در هوا پاسخ می‌دهد. دزیمترهای شخصی نیز معمولاً پاسخی متناسب با دز محیطی می‌دهند، لذا هر دوی دز محیطی و دز جذبی در هوا تقریباً برابر معادل دز مؤثر می‌باشند.



تصویر 5-8: A



تصویر (5-9)

با مقایسه توابع پاسخ برای نوترون‌ها این نکته دریافت می‌شود نمودارهای پاسخ‌های مختلف خیلی همراستا نیستند. کرمای بافت در هوا همواره کوچک‌ترین تابع پاسخ را دارد چرا که هیچ ضریب کیفیتی برای انرژی جنبشی ذرات باردار ثانویه اعمال نمی‌شود. خوشبختانه دز محیطی و معادل دز عمقی توابع پاسخ مشابهی دارند لذا در انرژی‌های حدود 5keV می‌توان آن‌ها را معادل در نظر گرفت. از آن‌جا که نمودار دز محیطی همواره از معادل دز مؤثر بالاتر است، یعنی تابع پاسخ دز محیطی بیش‌تر از معادل دز مؤثر است، در محاسبات مربوط به حفاظت‌سازی استفاده از توابع پاسخ دز محیطی محافظه‌کارانه‌تر است و کالیبراسیون دزیمترهای

شخصی براساس دز محیطی بهتر است.

فصل ششم: تکنیک‌های ویژه حفاظسازی برای فوتون‌ها

در این فصل به بررسی روش‌های طراحی و آنالیز حفاظ برای پرتوهای x و γ در محدوده انرژی‌های 1keV تا 20MeV می‌پردازیم. طراحی حفاظ برای پرتوهای x و γ مستلزم آگاهی از مفاهیمی چون Attenuation factor, Build up factor, پدیده آلبدو¹ یا Reflection factor و ... می‌باشد.

Build up factors که رابطه دز کل نسبت به دز uncollided (پرتوهایی بدون برخورد) را بیان می‌کند، فقط برای فوتون‌ها قابل استفاده است و بیش‌تر برای چشمه‌های نقطه‌ای تک انرژی به کار می‌رود. در این مورد دیواره حفاظ بین موضع منبع و مکان‌های مورد نظر کشیده شده است.

Attenuation factors برای چشمه‌های تک انرژی و چند انرژی مانند ماشین اشعه X مورد استفاده قرار می‌گیرد و در اکثر مواقع هنگامی قابل استفاده است که دیوار، منبع و نقاط معینی که مدنظر ما هستند را جدا کند. دیوار به اندازه کافی از منبع دور است به‌گونه‌ای که پرتوهای برخوردی با آن را می‌توان تقریباً موازی در نظر گرفت.

ویژگی‌های مشترکی برای فاکتورهای تضعیف و Build up قابل تعریف است و می‌توان از طریق یکی از آن‌ها دیگری را به‌دست آورد. پدیده آلبدو نیز مربوط به شار پرتوهای است که از یک حفاظ بازتابیده شده‌اند و نیز پدیده‌های دیگری مانند آن نیز در ادامه فصل بحث می‌شود.

ابتدا مفاهیم اولیه لازم در این مجموع بیان می‌شود و در ادامه به توصیف جزئیات مفاهیم فوق‌الذکر پرداخته خواهد شد.

1-6) مفاهیم مقدماتی

1-1-6) مفهوم فوتون‌های غیربرخوردی (uncollided photons):

با توجه به مطالب قبل می‌دانیم که احتمال آن که دسته پرتویی خودش را تا dx رسانده باشد و از ضخامت dx هم بدون برخورد بگذرد، برابر است با:

$$P(dx) = -\mu dx$$

و اگر بخواهیم برای ضخامت x بنویسیم، خواهیم داشت:

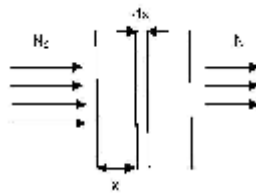
$$P(x) = e^{-\mu x}$$

¹ Albedo

اصول محاسبات برای حفاظت‌سازی در برابر فوتون‌ها عبارت فوق‌الذکر است. با توجه به این رابطه اگر ضخامت x از ماده‌ای را در نظر بگیریم که تعداد N_0 پرتو اولیه به آن برخورد می‌کنند و تعداد پرتوهای خروجی، یعنی آن‌هایی که هیچ‌گونه برخوردی انجام نداده‌اند و از مسیر خود منحرف نشده‌اند به صورت زیر است:

$$N^0 = N_0 e^{-\mu x}$$

$$N^0 = \text{uncollided}$$



تصویر (1-6)

2-1-6) پویش آزاد میانگین (MFP):

پویش آزاد میانگین نیز تنها برای پرتوهای منوانرژیتیک یا تک‌انرژی γ به کار می‌روند و اگر μ را ضریب تضعیف خطی یا سطح

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu}$$

مقطع ماکروسکوپیک بنامیم،

لازم به ذکر است که برای پرتوهای چند انرژی مانند X و ذرات باردار نمی‌توانیم از عبارت فوق استفاده کنیم.

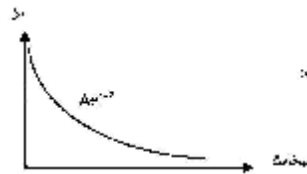
3-1-6) طول واهلش (Relaxation length):

طول واهلش برای پرتوهای چند انرژی به کار می‌رود و رابطه طول واهلش $\frac{1}{\mu'}$ است. μ' ضریب تضعیف خطی نیست، ضریبی است

که معادل مجموعه‌ای از پرتوهای مختلف است. مقدار آن‌ها برای دستگاه خاص، مواد خاص و شرایط هندسی معینی از روی جدول به دست می‌آید. لازم به ذکر است که برای هر ماده‌ای و برای هر نوع پاسخی (دز، کرما و ...) μ' ویژه‌ای قابل تعریف است.

منحنی (2-6) دارای شیب μ' است. رابطه آن بدین صورت قابل تعریف است:

$$R = Ae^{-\mu x}$$

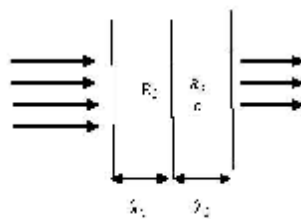


تصویر (2-6)

برای بررسی چگونگی رابطه بالا می‌توان دزیمتری را متصور شد که با حرکت در عمق‌های مختلف در ماده یا محیط شدت اشعه آن با رابطه‌ای مانند فوق تغییر می‌کند.

4-1-6 ضخامت‌های مختلف حفاظ (λ_1 و λ_2 و ...)

ضخامت‌های مختلف را معمولاً با λ نشان می‌دهیم. اگر منحنی در جاهای مختلف شیب یکسانی نداشته باشد، بنابراین λ های مختلف می‌توان برای آن در نظر گرفت. به عبارت دیگر λ عکس شیب منحنی‌های پاسخ هستند. λ_1 یعنی مسافتی که پاسخ به $\frac{1}{d}$ مقدار اولیه‌اش می‌رسد و بعد از $\lambda_1 + \lambda_2$ پاسخ به $(\frac{1}{d})^2$ مقدار اولیه خود می‌رسد. با توجه به ابتدای بحث می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت‌های مختلف برای دیواره‌های حفاظ معادل شیب منحنی پاسخ در نظر گرفته می‌شوند. اگر شکل شماتیک زیر را در نظر بگیریم و فرض کنیم که پرتوها در حال عبور از تیغه‌های مختلف حفاظ هستند، نحوه تغییر پاسخ آن‌ها به این ترتیب است: با توجه به شدت پرتوها الزاماً λ_1 و λ_2 با هم برابر نیستند. البته این حالت ممکن است روی دهد اما حالت‌های $\lambda_2 > \lambda_1$ و یا برعکس آن نیز وجود دارد.

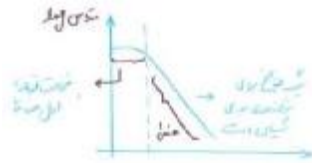


تصویر (3-6)

اگر با طیف انرژی مواجه باشیم که به‌طور نرمال شامل دسته‌ای از پرتوهای ضعیف و دسته‌ای پرتو پرانرژی باشند (مخلوط). معمولاً $\lambda_1 < \lambda_2$ چرا که در مناطق اولیه، پرتوهای کم‌انرژی بلافاصله حذف می‌شوند، در مناطق بعدی پرانرژی‌هایی که نفوذپذیری بیشتری دارند و در تیغه اول جذب نشده‌اند، باید حذف شوند. لذا $\lambda_1 < \lambda_2$ یعنی ضخامت بیشتری برای حذف آن‌ها لازم است. البته این بستگی به خصوصیات دسته اشعه دارد. اکثراً اختلاف λ_1 و λ_2 آن‌قدر جزئی است که قابل اغماض است. مقادیر λ_1 و

λ_2 در جداول موجود است.

معمولاً λ_1 جدا در نظر می‌گیرند و λ های بعدی را به‌طور یکسان فرض می‌کنند و در ضخامت اول شیب پاسخ ما متفاوت است و در ضخامت‌های بعدی تقریباً شیب‌ها یکسان خواهد شد. به‌صورت تجربی مشاهده شده که در طراحی حفاظ برای طیف انرژی خاص با در نظر گرفتن تمام اندرکنش‌ها از طریق محاسبه کدهای کامپیوتری به یک جواب نهایی ساده می‌انجامد و شیب آن قابل تعیین است.



تصویر (4-6)

برهمن اساس ضخامت‌های مختلف HVL و TVL تعریف می‌شود.

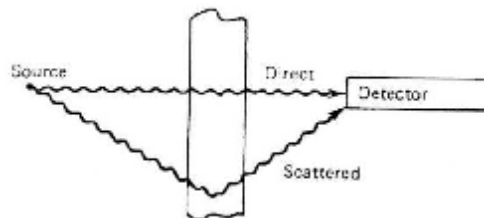
HVL (Half Value Layer): ضخامتی است که پاسخ را به نصف تعداد اولیه می‌رساند. که پاسخ می‌تواند شامل تعداد، دز و ... باشد.

TVL (Tenth Value Layer): ضخامتی است که پاسخ را به $\frac{1}{10}$ مقدار اولیه می‌رساند. $T^{(1)}, T^{(2)}, L, T^{(n)}$ می‌تواند تعریف شود

و می‌توان گفت حفاظ دارای ضخامت‌های $\frac{1}{10}$ اول و دوم و ... می‌باشد. بیش‌تر اتفاقات مربوط به جذب در $\frac{1}{10}$ اولیه روی می‌دهد.

2-6) ضریب انباشت (Build up factor):

همان‌طور که در تصویر (5-6) مشاهده می‌شود، در طرف چپ، چشمه پرتو و در طرف راست یک دتکتور وجود دارد که پرتوها پس از عبور از یک ضخامت دیواره از چشمه به دتکتور می‌رسند. در محل دتکتور پاسخی به نام R دریافت می‌کنیم که از دو منشأ به دتکتور رسیده‌اند:



تصویر (5-6)

منشأ اول: پرتوهایی که هیچ برخوردی سد راه انجام نداده باشند:

R^0 : Uncallided

منشأ دوم: پرتوهایی که اندرکنش کردند و در اثر پراکندگی ذرات ثانویه الکترونی و یا فوتونی به آشکارساز رسیده‌اند: R_s بنابراین

$R = R^0 + R_s$ می‌باشد و Build up factor به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B = \frac{R}{R^0} = \frac{R^0 + R_s}{R^0} = 1 + \frac{R_s}{R^0} \quad B > 1$$

Build up factor به عوامل متعددی بستگی دارد که عبارتند از:

- (1) انرژی پرتو
- (2) نوع پاسخ: دز، کرما و دز جذبی و ...
- (3) جنس محیط واسط (پراکنده‌گر)
- (4) هندسه محیط پراکنده‌گر
- (5) هندسه چشمه: شکل و ابعاد
- (6) فاصله چشمه و محل ثبت پاسخ

نکته: در جداول مربوط به Build up Factor، برای چشمه‌های ایزوتروپیک (همسانگرد) و در محیط‌های مختلف و ... ضرایب انباشت مختلفی ارائه شده است.

نکته: در جداول ضریب انباشت تا محیط بی‌نهایت درج شده است. در طراحی حفاظ، ضخامتی از آن در نظر گرفته می‌شود که بی‌نهایت نیست لذا پراکندگی به جلو و عقب باید در آن لحاظ شود. به‌عنوان مثال اگر ضریب انباشت یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد را برای آب از جداول استخراج کنیم، در واقع مقدار آن معادل B یا ضریب انباشت برای یک انرژی خاص در فضای بی‌نهایتی است که از آب پر شده است. اما در حفاظ‌سازی در هنگام محاسبه B در پشت حفاظ، ضخامت حفاظ محدود می‌باشد لذا باید از ضریب انباشت تصحیح شده استفاده کرد. یعنی برای تبدیل ضریب انباشت بی‌نهایت به ضریب انباشت محدود از ضرایب تصحیح خاصی استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر در حفاظ اثرات پشت حذف شده است و در ضریب تصحیح حول و حوش B حساب می‌شود. گاهی بعد از تیغه حفاظ دیواره دیگری داریم که موجب انعکاس پرتوها به عقب می‌شود، لذا پیشنهاد می‌شود که با توجه به این مسئله و با بررسی محیط حفاظ، ضریب تصحیح استفاده نشود.

6-2-1) توابع پاسخ و ضرایب انباشت برای چشمه نقطه‌ای در محیط بی‌نهایت:

اگر ضریب انباشت را داشته باشیم و شارش چشمه نقطه‌ای نیز معلوم باشد می‌توان R^0 را تعیین کرد و در نهایت مقدار R را محاسبه نمود:

$$R = R^0 \times B$$

$$R^0 = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \quad \text{محاسبه } R^0 \text{ برای چشمه نقطه‌ای همسانگرد}$$

S شدت چشمه، $\Phi = \frac{S}{4\pi r^2}$ برای چشمه همسانگرد، $e^{-\mu r}$ احتمال عبور از r تعداد پویش‌های آزاد، μr تابع پاسخ است.

$$R = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\mu r} RB(\mu r)$$

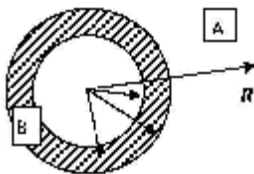
کاربرد رابطه فوق: اگر فرض کنیم که محیط واسط هواست و می‌خواهیم دز را در فاصله 100 متری از چشمه محاسبه کنیم، ابتدا مقادیر فوق را با استفاده از مفروضات مسئله و جداول جایگزین می‌کنیم. ضریب انباشت را هم می‌توان از طریق فرمول‌های تقریبی که بعداً به آن‌ها اشاره می‌کنیم، محاسبه کرد و هم می‌توان از جدول‌ها استفاده کنیم و با توجه به μr خاص جایگزین شود. گاهی اوقات برای بعضی از μr مقدار Build up Factor داده نشده است لذا با توجه به مقدار بالا و پایین‌تر از μr خاص درون‌یابی شده و مقدار ضریب انباشت برای آن به‌طور تخمینی بیان می‌گردد.

2-2-6) توابع پاسخ و ضریب انباشت برای چشمه نقطه‌ای در محیط‌های واسط مختلف متوالی:

هنگامی که چندین لایه حفاظ به‌طور متوالی قرار گرفته باشند، نحوه محاسبات متفاوت است. تصویر زیر را در نظر بگیرید.

برای محاسبه R در نقطه A خواهیم داشت:

$$R = \frac{S}{4\pi r_1^2} e^{-\mu(r_2-r_1)} RB_p(\mu(r_2-r_1)) \times K$$



تصویر (6-6)

- ضریب K همان ضریب مذکور است که جهت تصحیح ضریب انباشت بی‌نهایت استفاده می‌شود.

برای محاسبه R در نقطه B می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$R = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\mu(r-r_1)} RB_p(\mu(r-r_1)) \times K$$

البته K مقدار ضعیفی خواهد شد چون یک مقدار ماده بعد از نقطه B وجود دارد.

نکات:

- 1- ثابت می‌شود که اگر به اندازه چند پویش آزاد میانگین پیش‌روی کنیم، دیگر پرتوهای backscatter (پراکندگی روبه‌عقب) حائز اهمیت نیست. یعنی اگر عمق محیط واسط به اندازه مثلاً 10 پویش آزاد میانگین باشد، پس از محاسبه 4 پویش آزاد میانگین، می‌توان اطمینان حاصل کرد که ضخامت 6 پویش آزاد بعد از آن پرتوهای برگشتی را تأمین می‌کند و مانند ماده به ضخامت بی‌نهایت می‌تواند در نظر گرفته شود و می‌توان هیچ‌گونه ضریب تصحیح در Build up آن اعمال نکرد.
- 2- برای چشمه‌های تیغه‌ای همان روابط گذشته قابل استفاده است با این تفاوت که در محاسبه Φ در مخرج $4\pi r^2$ نخواهیم داشت و B_p به B_s مبدل خواهد شد. در هنگام محاسبه R برای چشمه تیغه‌ای (slab) باید Φ را داشته باشیم.
- 3- در مواقعی حفاظها چند لایه هستند و چند مواد با μ های مختلف کنار هم قرار می‌گیرند. در چنین حالتی کار پیچیده است و به‌کارگیری ضرایب انباشت مشکل است چرا که با توجه به عدد اتمی لایه قبلی و تفاوت آن با لایه بعدی، خواص پس‌پراکنی متفاوتی برای آن‌ها وجود دارد و برای نواحی مختلف روابط متفاوت قابل استفاده است. اما با اعمال تقریب‌هایی می‌توان B آن را محاسبه کرد. اگر عدد اتمی مواد تفاوت چندانی نداشته باشد، یک Z متوسط برای آن‌ها در نظر می‌گیریم و μ مربوط به آن را در روابط جایگزین می‌نمائیم و برای موارد دیگر راه‌کارهای دیگر در نظر گرفته می‌شود که در مراجع ذکر شده است.

3-2-6) دو رابطه اساسی برای تقریب ضریب انباشت:

برای به‌دست آوردن ضریب انباشت می‌توان از دو رابطه تقریبی زیر استفاده نمود:

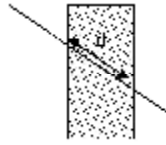
رابطه چند جمله‌های تیلور (Taylor polynomial)

$$B(E_0, \mu r) ; \sum_{i=1}^T A_i e^{-\alpha_i \mu r}$$

$$\sum A_n = 1 \Rightarrow \text{if } n=2, A_1 = 1 - A_2$$

در جدول‌ها مقادیر α_1 و A_1 ، α_2 و A_2 و α_3 و A_3 برای فوتون‌ها با انرژی مشخص، داده شده است و به این ترتیب با جایگذاری در این رابطه B حاصل می‌شود. هنگامی که چند پرتو γ داریم، باید اثرات آن‌ها را با هم جمع کنیم چرا که پاسخ‌ها به‌جز در مواردی مانند $H_{I,d}$ جمع‌پذیر هستند.

لازم به ذکر است که در هنگام عبور پرتوها به‌صورت مورب از ماده باید فاصله مورب را در روابط جایگذاری نمود. مبنا مسیری است که ذره در امتداد آن از ماده گذر می‌کند.



تصویر (7-6)

رابطه تقریب برگر (Berger Approximation)

با این تقریب فاکتور B به شکل زیر محاسبه می شود:

$$B \cong 1 + a\mu r e^{+b\mu r}$$

تقریب برگر با دو پارامتر a و b که از جداول به دست می آیند که در μ و r معین قابل تعیین است. از آن جا که در این رابطه یک قسمت نمایی مشاهده می شود، با ضرب در $e^{-\mu r}$ در رابطه R، نتیجتاً حالت نمایی بودن پاسخ را شدت می بخشد. ثابت های هر دو تقریب در جداول (1-6) و (2-6) آورده شده است.

جدول (1-6) مقادیر ثابت رابطه تیلور

Photon energy (MeV)	Air medium		Water medium		Concrete medium		Lead medium	
	A ₁	a ₂	A ₁	a ₂	A ₁	a ₂	A ₁	a ₂
0.015	1.585	-0.0032	1.675	-0.0050	1.110	0.0000	1.120	-0.0032
0.020	2.289	-0.0148	2.473	-0.0143	1.192	-0.0010	1.020	-0.0033
0.030	6.729	-0.0180	7.524	-0.0406	1.505	-0.0072	1.070	-0.0033
0.040	17.573	-0.0316	63.292	-0.0382	2.460	-0.0131	1.040	-0.0034
0.050	179.362	-0.0624	98.191	0.0501	5.866	0.0111	1.040	-0.0032
0.060	142.000	-0.0075	247.500	-0.0675	5.156	-0.0032	1.042	-0.0032
0.080	219.520	0.1237	382.500	0.1237	22.465	-0.0023	1.266	0.0030
0.100	615.000	-0.1237	823.062	-0.1406	43.350	-0.0561	0.643	-0.4470
0.150	148.122	-0.1450	142.500	-0.1500	111.751	-0.0632	1.580	-0.0037
0.200	601.000	-0.1237	50.000	-0.1500	95.324	-0.0779	1.400	-0.0032
0.300	133.500	-0.1089	226.725	-0.1084	82.752	-0.0609	1.457	-0.0048
0.400	90.300	-0.0975	103.787	-0.0975	145.579	-0.0675	1.851	-0.0055
0.500	63.400	-0.0871	203.623	0.0751	58.305	0.0835	2.265	-0.0108
0.600	70.100	-0.0769	72.515	-0.0763	127.265	-0.0565	2.400	-0.0139
0.800	103.832	-0.0532	104.935	-0.0548	73.755	-0.0491	3.149	-0.0158
1.000	86.171	-0.0444	64.373	-0.0506	52.820	-0.0630	6.000	-0.0691
1.500	58.400	-0.0312	39.009	-0.0357	71.637	-0.0277	6.000	-0.0238
2.000	32.192	-0.0271	32.003	-0.0274	34.920	-0.0262	11.600	-0.0206
3.000	22.700	-0.0195	22.748	-0.0196	38.535	-0.0152	10.850	-0.0156
4.000	11.538	-0.0233	11.703	-0.0226	17.376	-0.0199	6.280	-0.0634
5.000	9.794	-0.0219	9.661	-0.0216	6.788	-0.0271	3.390	-0.0924
6.000	9.568	-0.0179	13.639	-0.0107	9.365	-0.0247	3.500	-0.1080
8.000	4.876	-0.0278	4.862	-0.0253	7.394	-0.0344	3.500	-0.1000
10.000	5.359	-0.0215	6.821	-0.0151	5.550	-0.0259	2.391	-0.2110
15.000	5.517	-0.0135	5.534	-0.0127	5.351	-0.0224	3.945	-0.2971

Source: Extracted from American National Standard ANSI/ANS 3.4.3 D01, published by the American Nuclear Society. Original data generated by K. Shame and G. J. Walker, Health Atomic Power Laboratory, Report WAPD-TM-1628 (1983)

جدول (2-6) مقادیر ثابت برای تقریب برگ

Photon energy (MeV)	Air		Water		Concrete		Iron		Lead	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
0.015	0.08	-0.054	0.05	-0.036	0.01	-0.029	0.00	0.000	0.00	0.000
0.020	0.25	-0.032	0.26	0.032	0.03	-0.041	0.02	-0.033	0.00	0.000
0.030	0.50	-0.009	1.01	-0.006	0.10	-0.036	0.01	-0.036	0.00	0.000
0.040	2.40	0.018	2.58	0.024	0.20	-0.035	0.02	-0.032	0.01	-0.050
0.050	4.05	0.050	4.26	0.057	0.32	-0.036	0.04	-0.034	0.01	-0.045
0.060	5.27	0.075	5.39	0.082	0.78	-0.068	0.07	-0.039	0.01	-0.028
0.080	6.11	0.102	6.47	0.109	1.42	0.007	0.14	-0.034	0.02	-0.029
0.100	5.93	0.113	6.11	0.120	1.85	0.028	0.24	-0.030	0.20	0.479
0.150	4.70	0.121	4.88	0.125	2.19	0.054	0.52	-0.015	0.21	-0.075
0.200	3.94	0.113	4.13	0.118	2.20	0.065	0.77	0.004	0.08	-0.054
0.300	3.10	0.094	3.18	0.096	2.03	0.067	1.06	0.022	0.08	-0.043
0.400	2.61	0.079	2.67	0.080	1.87	0.051	1.15	0.033	0.11	-0.033
0.500	2.29	0.067	2.32	0.068	1.73	0.055	1.16	0.038	0.15	-0.028
0.600	2.05	0.058	2.07	0.059	1.60	0.049	1.14	0.035	0.19	-0.029
0.800	1.71	0.045	1.74	0.045	1.41	0.043	1.09	0.032	0.25	-0.019
1.000	1.50	0.035	1.50	0.036	1.27	0.032	1.03	0.029	0.33	-0.015
1.500	1.16	0.021	1.16	0.021	1.02	0.021	0.88	0.020	0.33	-0.007
2.000	0.97	0.013	0.97	0.013	0.80	0.014	0.75	0.018	0.38	0.004
3.000	0.75	0.005	0.74	0.005	0.71	0.007	0.65	0.014	0.37	0.019
4.000	0.61	0.001	0.62	0.000	0.59	0.004	0.55	0.015	0.31	0.038
5.000	0.53	-0.002	0.52	0.002	0.49	0.004	0.49	0.017	0.24	0.052
6.000	0.47	-0.004	0.47	-0.005	0.45	0.002	0.42	0.021	0.16	0.082
8.000	0.37	-0.004	0.38	-0.005	0.35	0.001	0.33	0.028	0.11	0.125
10.000	0.31	-0.004	0.31	0.005	0.30	0.000	0.25	0.039	0.07	0.151
15.000	0.23	-0.006	0.23	-0.008	0.21	0.004	0.16	0.060	0.00	0.300

Source: A. B. Chilton, J. K. Shultz, and R. E. Fow, *Principles of Radiation Shielding*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984. A. B. Chilton, G. E. Eisenhauer, and G. L. Slaughter, *Nucl. Sci. Eng.*, 73, 97-107 (1980). A. B. Chilton, *Nucl. Sci. Eng.*, 69, 433-458 (1979).

مقادیر ثابت به دست آمده از جداول را به طور تقریبی می توان برای مواد مشابه (هوا و آب و ...) به کار برد.

4-2-6) تأثیر مرزها بر محیط‌های کراندار و محاسبه ضریب انباشت آن‌ها:

در قسمت‌های قبل گفته شد که B موجود در جداول یا حاصل از روابط تقریبی مقدار آن برای محیط‌های بی‌نهایت است. برای آن که B را برای یک حفاظ محدود محاسبه کنیم و پاسخ دز و ... را در نقطه‌ای پشت حفاظ به‌دست آوریم، به‌این ترتیب عمل می‌کنیم:

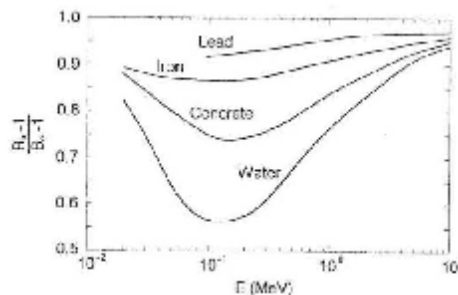
(1) از نمودار (8-6) مقدار $\frac{B_x - 1}{B_\infty - 1}$ تا انرژی 10MeV داده شده است با توجه به نمودار مقدار آن را از روی نمودار برای انرژی خاص می‌خوانیم.

(2) مقدار $\frac{B_x - 1}{B_\infty - 1}$ را برابر مقدار قرائت شده قرار می‌دهیم.

(3) B_∞ را نیز می‌توان از جداول یا تقریب‌های مذکور به‌دست می‌آورد.

(4) با جایگذاری 2 و 3 در $\frac{B_x - 1}{B_\infty - 1}$ ، مقدار B_x به‌دست می‌آید.

برای محاسبات تقریبی می‌توان B را از روابط تقریبی به‌دست آورد و در صورت لزوم از اعمال ضرایب تصحیح بهره‌مند شد.



تصویر (8-6)

3-6) مفاهیم مقدماتی طراحی حفاظ

طبقه‌بندی حفاظ در دستگاه‌های تشخیصی و درمانی به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. اگر فردی را در نظر بگیریم که در شرایط

پرتوگیری بر روی تخت مقابل منبع پرتو قرار گیرد، برای چنین مجموعه‌ای، طبقه‌بندی حفاظ را چنین مطرح می‌نمائیم:

- حفاظ اولیه (Primary Barrier): حفاظی که پرتوهای اصلی پس از ساطع شدن از منبع به سمت آن نشانه‌گیری می‌شوند و به آن برخورد می‌کنند مانند موضع مقابل یک منبع.

- حفاظ ثانویه (Secondary Barrier): اگر فرض کنیم که تخت بیمار مقابل منبع قرار داشته باشد، پرتوها پس از برخورد به آن

پراکنده می‌شوند که برای پرتوهای پراکنده نیز باید حفاظ طراحی شود. علاوه بر آن در یک منبع همراه با تولید پرتوهای اصلی، پرتوهای نامطلوبی به نام پرتوهای نشتی از آن خارج می‌شود که برای کاهش اثرات زیان‌بار آن نیز مستلزم طراحی حفاظ هستیم. گاهاً به جای استفاده از واژه حفاظ Shield از کلمه Barrier یا سد نیز استفاده می‌شود.

6-3-1) اصطلاحات کاربردی در مبحث حفاظ‌سازی:

1- Work Load: بار کاری دستگاه‌های پرتو پزشکی است و با نماد W نشان داده می‌شود. W عبارتند از مقدار مجموع نرخ دز جذبی است که در مدت 1 هفته به فاصله 1m از چشمه پرتو تعیین می‌گردد. برای محاسبه آن فرض می‌شود که دستگاه در مدت یک هفته در تمام ساعات کار کند. واحد W برابر است با $[Gy\ week^{-1}]$ و رابطه‌ای که بتوان W_2 را در فاصله d_2 تخمین زد عبارتند از:

$$W_2 = \frac{W(1m)^2}{d_2^2}$$

در بعضی از مواقع لازم است که بررسی شود دز جذبی پشت حفاظ در مدت یک هفته بیش‌تر از یک مقدار نشود تا قوانین حفاظت رعایت گردد.

مثال: هر روز 40 بیمار توسط یک دستگاه پزشکی پرتوگیری می‌کنند. به‌ازای هر بیمار 5field استفاده می‌شود و به‌ازای هر field, 50monitor unit به کار می‌رود. [monitor unit : یک جریان معین در یک مدت زمان مشخص دزی معادل 1 cGy را به بیمار اعمال می‌کند.] تعداد روزهایی که افراد کار می‌کنند 5 روز است. بار کاری آن عبارتند از:

$$W = 40 \frac{\text{Patient}}{\text{day}} \times 5 \frac{\text{Field}}{\text{Patient}} \times 50 \frac{\text{MeV}}{\text{Field}} \times 5 \frac{\text{day}}{\text{Week}} \times 1 \frac{\text{cGy}}{\text{MeV}} = 50000 \frac{\text{cGy}}{\text{Week}}$$

2- Use Factor: کسری از زمان بار کاری W بیم اولیه است که به‌طرف یک حفاظ اولیه معین تابیده می‌شود. در واقع مقدار U به تنظیم جهت‌گیری پرتو بستگی دارد. مثلاً یک دستگاه که در فواصل زمانی مختلف راستای پرتوهای آن فرق می‌کند، به‌این‌ترتیب می‌توان مقدار V را در هر جهت (کف، سقف و ...) به‌طور مجزا محاسبه کرد.

3- Occupancy Factor فاکتور اشغال که با نماد T آن را نشان می‌دهند و به این معناست که در یک ناحیه چه کسری از زمان شخص به‌طور حداکثر تحت پرتوگیری قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر T کسری از ساعات کاری در مدت یک هفته است که شخص در محیط قرار می‌گیرد و در طول سال متوسط‌گیری می‌شود.

نکته: $UT < 1$ و $R = \frac{WUT}{r^2}$ برای حفاظ اولیه می‌باشد.

2-3-6 محاسبه پاسخ طبق قوانین پرتوگیری:

تاکنون R را در مواقعی محاسبه می‌نمودیم که هیچ نوع حفاظی در مقابل پرتوها وجود نداشت. حال اگر ملزم باشیم برای یک R_L محدود شده به طراحی حفاظ بپردازیم تا تضعیف به‌گونه‌ای صورت گیرد که پاسخ از R اولیه بدون حفاظ به R_L با اعمال حفاظ برسد. نتیجتاً خواهیم داشت:

$$R_L = R \times A_f$$

به A_f فاکتور تضعیف (Attenuation Factor) می‌گویند و به B_f در رابطه $B_f = K_0 A_f$ خروجی نرمالیزه شده¹ حفاظ و به K_0 خروجی پرتو² گویند. بنابراین می‌توان R_L را به‌صورت مقابل نیز می‌توان تعریف کرد:

$$R_L = \frac{R'_L}{\text{safty factor}}$$

طبق قوانین پرتوگیری R_L در هر زمان تحت شرایط مختلف قابل تغییر است. از آن‌جا که در طراحی حفاظ امکان تخریب و ساخت مجدد آن هر ساله وجود ندارد، بنابراین بهتر است در هنگام طراحی حفاظ، ضریبی به‌نام Safety Factor هم در نظر گرفت تا محاسبات محافظه‌کارانه‌ای انجام شود و اگر محدوده دز کاهش یافت باز هم حفاظ طراحی شده قابل استفاده باشد. در نهایت با اعمال یک Safety Factor به R_L خواهیم رسید و با معلوم بودن مقدار R می‌بایست A_f را تعیین نمائیم. این بحث مطرح می‌شود که با چه ضخامتی می‌توان به A_f دست یافت. بنابراین با استفاده از TVL و HVL می‌توان این ضخامت‌ها را تعیین کرد. اگر برای حفاظ‌سازی از TVL استفاده کنیم، تعداد آن‌ها با این روش قابل محاسبه است:

$$\text{TVL تعداد} : \log_{10} A_f^{-1}$$

و برای این‌که به ضخامت مورد نظر دست یابیم، خواهیم داشت:

$$(\log_{10} A_f^{-1}) T_{\frac{1}{10}}$$

همان‌طور که پیش از این بیان شد، TVL اول با بقیه متفاوت است لذا برای اعمال این تفاوت رابطه به‌صورت زیر در می‌آید.

$$T_{\text{barrier}} = \text{TVL}_1 + (n - 1)\text{TVL}_e$$

¹ Normalized shield output
² Radiation output

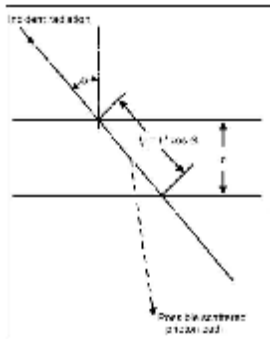
6-4) فاکتورهای تضعیف A_f برای دسته پرتوهای فوتونی:

برای محاسبه‌ی فاکتورهای تضعیف، فوتون‌ها را از چند جنبه مورد بررسی قرار می‌دهیم. مسئله اول تک‌انرژی بودن¹ یا چند انرژی² بودن پرتوها و دیگری زاویه تابش آن‌هاست. طیف پرتوهای X محدوده زیادی از انرژی‌ها را شامل می‌شود.

6-4-1) فاکتورهای تضعیف برای دسته پرتوهای تک انرژی فوتون:

اگر فرض کنیم دسته پرتوهای فوتون به صورت مورب به یک حفاظ تخت برخورد می‌کنند، باید ضرایب تضعیف را برای راستای فوتون‌های مورب در نظر گرفت. لذا با یک رابطه کسینوسی می‌توان این تبدیل را اعمال نمود.

$$R_L = \frac{RS_p}{4\pi^2} * e^{\frac{-\mu t}{\cos \theta}} * B\left(\frac{\mu t}{\cos \theta}\right)$$



تصویر (6-10) راستای مورب پرتو

نکات:

- S_p تعداد فوتون‌ها است و اکتیویته آن‌ها نیست لذا باید تمام تبدیلات اکتیویته به تعداد صورت گیرد. ممکن است به‌ازای هر واپاشی دو فوتون داشته باشیم. بنابراین آن را نیز منظور می‌کنیم.
- اگر پرتوها عمود بر حفاظ بتابند، $\cos \theta = 1$ است.

6-4-2) فاکتورهای تضعیف برای دسته پرتوهای X:

برای دسته پرتو چند انرژی X ملزم به استفاده از روابط دیگری هستیم که در محاسبه حفاظ برای دستگاه‌های مولد اشعه X

1) monoenergetic
2) polyenergetic

استفاده می‌گردد:

$$D(P) = \frac{i}{r^2} B_f = \frac{i}{r^2} K_0 A_f$$

مقدار A_f به تعیین‌کننده ضخامت و جنس حفاظ است که از رابطه زیر مقدار آن به دست می‌آید:

$$A_f = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-1/\gamma}$$

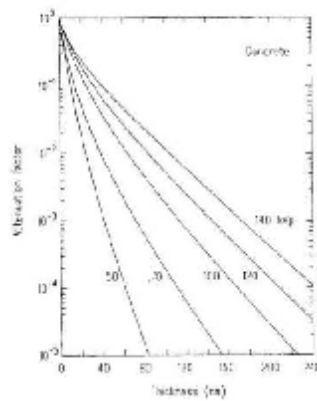
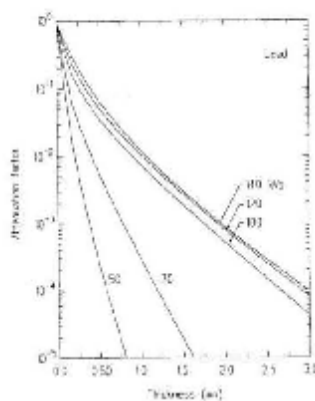
ضرایب ثابت این رابطه نیز در جدول (3-6) درج شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، مقدار K_0 براساس kV_{cp}

مختلف فهرست شده است. بنابراین مقادیر A_f و K_0 به میزان ولتاژ انرژی بیشینه kV_{cp} نسبت مستقیمی دارد.

جدول (3-6) ضرایب ثابت در رابطه فاکتور تضعیف A_f

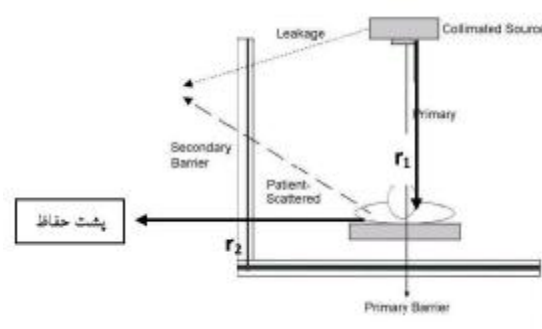
kV _{cp}	K_0^*	α (mm ⁻¹)	β (mm ⁻¹)	γ	α (mm ⁻¹)	β (mm ⁻¹)	γ
Lead, $\rho = 11.35$ g/cm ³							
30	2.40	38.80	178.7	0.3473	7.405	41.92	0.3859
35	3.60	29.55	164.7	0.3943	5.715	43.41	0.4857
50	1.20	8.801	27.25	0.2957	1.817	4.946	0.4021
70	2.88	5.569	23.45	0.5881	0.7148	3.798	0.5378
100	5.64	2.900	15.28	0.7557	0.3415	3.420	0.7045
120	7.62	2.246	8.950	0.5873	0.2338	1.787	0.8116
140	9.66	2.009	5.916	0.4018	0.1724	1.398	0.8458
Concrete, $\rho = 2.35$ g/cm ³							
30	2.40	0.2173	1.698	0.3593	0.8361	1.590	0.3693
35	3.60	0.2828	1.807	0.4648	0.2306	1.894	0.4683
50	1.20	0.09032	0.1712	0.2324	0.04721	0.1769	0.4912
70	2.88	0.05087	0.1656	0.3847	0.05783	0.1357	0.5967
100	5.64	0.03925	0.08567	0.4273	0.04278	0.08460	0.9791
120	7.62	0.03536	0.07109	0.6073	0.03758	0.06808	1.0310
140	9.66	0.03345	0.07476	1.0470	0.03407	0.05145	1.0570
Plate glass, $\rho = 2.56$ g/cm ³							
30	2.40	0.2173	1.698	0.3593	0.8361	1.590	0.3693
35	3.60	0.2828	1.807	0.4648	0.2306	1.894	0.4683
50	1.20	0.09032	0.1712	0.2324	0.04721	0.1769	0.4912
70	2.88	0.05087	0.1656	0.3847	0.05783	0.1357	0.5967
100	5.64	0.03925	0.08567	0.4273	0.04278	0.08460	0.9791
120	7.62	0.03536	0.07109	0.6073	0.03758	0.06808	1.0310
140	9.66	0.03345	0.07476	1.0470	0.03407	0.05145	1.0570
Gypsum wallboard, $\rho = 0.75$ g/cm ³							
30	2.40	0.1208	0.7043	0.2613	0.02166	0.03966	0.2843
35	3.60	0.08878	0.6988	0.4945	0.01901	0.02873	0.3732
50	1.20	0.03893	0.08730	0.5105	0.01075	0.001862	1.170
70	2.88	0.02302	0.07163	0.7290	0.008553	0.000500	1.194
100	5.64	0.01466	0.04171	0.8939	0.007230	0.000934	1.309
120	7.62	0.01335	0.03047	0.8568	0.006735	-0.000531	1.006
140	9.66	0.01098	0.02436	0.9964	0.006191	-0.001849	1.530
Wood, $\rho = 0.55$ g/cm ³							
30	2.40	0.1208	0.7043	0.2613	0.02166	0.03966	0.2843
35	3.60	0.08878	0.6988	0.4945	0.01901	0.02873	0.3732
50	1.20	0.03893	0.08730	0.5105	0.01075	0.001862	1.170
70	2.88	0.02302	0.07163	0.7290	0.008553	0.000500	1.194
100	5.64	0.01466	0.04171	0.8939	0.007230	0.000934	1.309
120	7.62	0.01335	0.03047	0.8568	0.006735	-0.000531	1.006
140	9.66	0.01098	0.02436	0.9964	0.006191	-0.001849	1.530

* Radiation output in units (μSv m² h⁻¹ at 1 m). To convert to (R m² h⁻¹) multiply by 0.1.



تصویر (6-10) ضرایب تضعیف را در ضخامت‌های مختلف در سرب و بتون به تصویر کشیده است.

(6-5) حفاظسازی در برابر پرتوهای پراکنده و نشتی:



تصویر (6-11)

در دستگاه‌های مولد فوتون‌ها هدف تولید دسته پرتوهای با انرژی معین است. این دسته پرتوها با ابزارهایی مانند کالیماتورها¹ به موضع خاصی هدایت شده و آن ناحیه به صورت کانونی پرتوگیری می‌کند. در مقابل این دسته پرتوها حفاظ اولیه طراحی می‌شود. اما پرتوهای نامطلوبی نیز در حین کار دستگاه یا حتی در مواقعی که دستگاه خاموش است، از منبع ساطع می‌گردد که باید برای آن‌ها حفاظ طراحی کرد. همان‌طور که در تصویر (6-11) مشاهده می‌گردد. این پرتوها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(1) پرتوهای پراکنده شده (scattered radiation)

(2) پرتوهای نشتی (leakaged radiation)

پرتوهای پراکنده شده در واقع همان پرتوهای اصلی هستند که با برخورد به تخت بیمار یا دیوارها تحت زاویه دیگری پراکنده می‌شوند در حالی که پرتوهای نشتی مستقیماً از محفظه منبع به بیرون تابش می‌شوند. در هر صورت برای هر دو دسته نامطلوب پرتو باید حفاظ طراحی شود تا از اثرات نامطلوب آن‌ها ممانعت به عمل آید.

لازم به ذکر است که:

در دستگاه‌های تصویربرداری رابطه تقریبی زیر برقرار است:

$$X_{\text{Leakage}} = X_{\text{Scatter}}$$

در دستگاه‌های درمانی که میزان ولتاژ آن‌ها $> 500\text{keV}$ است، رابطه تقریبی زیر را می‌توان مطرح نمود:

$$X_{\text{Leakage}} < \frac{1}{1000} X_{\text{direct}}$$

¹ collimators

برای حفاظت‌سازی در برابر پرتوهای نشتی یا به‌عبارت دیگر جهت محاسبه دز پرتوها پشت حفاظ، رابطه زیر قابل استفاده است:

$$X_{\text{Behind shield}} = \left(\frac{\alpha F(\text{cm})^2}{400} \right) \frac{(it)}{r_1^2 r_2^2} B_f$$

a: کسر پرتوهای پراکنده شده از هدف پراکنده‌گر برای میدان 20×20 که در فاصله 1m از هدف x قرار گرفته‌اند.

r_1 : فاصله منبع اشعه x تا موضع بیمار

r_2 : فاصله تخته تا نقطه تحت بررسی (جایی که در حال محاسبه میزان پرتودهی آن هستیم)

F(Field size): اندازه میدان

(it): مقدار (mA-min) یعنی بیمار تحت چه جریانی و در چه مدت زمانی پرتوگیری می‌کند.

$$B_f = K_0 A_f$$

نکات:

X می‌تواند هر یک از پاسخ‌های دز معادل، اکسیژر و ... باشد چرا که همه پاسخ‌ها در ضرایبی با یکدیگر متفاوت هستند.

مقادیر a را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$a(100\text{keV}) = 0/0013$$

$$a(500\text{keV}) = 0/0019$$

در مواقعی که چگالی حفاظ طراحی شده دقیقاً معادل مواد موجود برای ساخت حفاظ نبود، از طریق رابطه زیر ضخامت از ماده حفاظ در دسترس را انتخاب می‌کنیم که با مقادیر محاسبه شده برابر گردد:

$$\rho_1 x_1 = \rho_2 x_2$$

- به همان نسبت که چگالی کم شده باید ضخامت افزایش یابد.

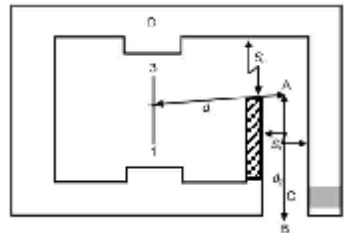
6-6) مفهوم آلبدو (Albedo Concept):

موضع پرتوگیری تحت شرایط مختلفی پرتودهی قرار گرفته و میزان دز پرتوهای آن دستخوش تغییرات محیط می‌گردد. یکی از این عوامل، پرتوهای پراکنده شده هستند. این اثر انعکاسی را می‌توان پراکندگی به عقب نیز در نظر گرفت که در محاسبات حفاظ باید منظور گردد.

7-6) مفهوم جویبارش (Striming):

در مکان‌هایی که منبع مولد پرتوها اعم از فوتون‌ها یا نوترون‌ها، در مناطقی از اتاق که تحت پرتوگیری قرار می‌گیرند، حفاظ طراحی

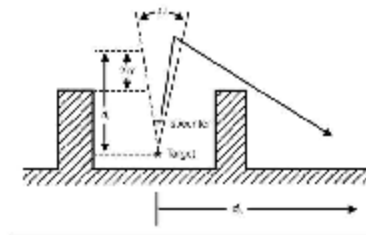
می‌شود. یعنی علاوه بر دیوارها و کف، برای جلوگیری از نشت پرتوها از درب اتاق نیز، باید درب با لایه‌های از مواد حفاظتی مانند سرب، پوشیده شود. برای این که حفاظت کامل شود این در را معمولاً به صورت کشویی طراحی می‌کنند اما وزن زیاد در و نشتی از کناره‌های در اجتناب‌ناپذیر است. به دو دلیل از دیواره‌ای به شکل زیر علاوه بر حفاظ‌های اصلی استفاده می‌نمایند. اول آن که بتوانند از درب سبک‌تری با لایه‌های حفاظتی کم‌تری استفاده کنند. دوم این که از برخورد اولیه شخص در هنگام ورود به اتاق با شار وسیعی از پرتوها ممانعت به عمل آورند. این دیواره موجب پراکندگی متوالی پرتوها می‌شود و به این ترتیب در اثر هر برخورد مقداری از اشعه‌ها حذف می‌گردند، لذا مقدار پرتو کم‌تری به جلوی درب ورودی می‌رسند. این راهرو مانند جویباری عمل می‌کند که رفته‌رفته از میزان دز پرتوها می‌کاهد. تصویر (6-12) این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد.



تصویر (6-12) دیواره هاشورخورده راهرویی ساخته که از میزان پرتوهای موجود در درب ورودی کاسته است. به این پدیده جویبارش گویند.

6-8) مفهوم آسمان تاب (Skyshine):

بعضی مواقع در مکان‌های انبار سوخت یا موارد دیگر دیوارها تا سقف کشیده نشده است. این دیواره‌های نیمه، راه خوبی برای ورود پرتوهایی هستند که پس از برخورد به سقف انعکاس یافته‌اند. البته با ساختن سقف‌های بلند می‌توان از میزان این پدیده کاست. تصویر (6-13) گویای این مطلب است.



تصویر (6-13) پدیده skyshine

مجموعه تست

1 - پرتوهای گاما با انرژی 1MeV بر روی یک ماده می‌تابند. چه اندرکنش‌هایی در این برخوردها حاکم است؟

(1) پدیده کمپتون غالب

(2) پدیده کمپتون، جفت یونسازی و فتوالکتریک

(3) جفت یونسازی و فتوالکتریک و بعضی اوقات آزادسازی فتونوترون

(4) هیچ کدام

2 - اگر فوتون‌های با انرژی 1MeV و 0/1MeV تحت زاویه 90 درجه در برخورد با یک ماده پراکنده شوند، چند درصد از انرژی خود را به ترتیب از راست به چپ از دست می‌دهند؟

(1) 19/4 ، 16/3 (2) 33/4 ، 73/3 (3) 66/2 ، 16/3 (4) 66/2 ، 33/4

3 - ضریب کاهش خطی (μ_e) پرتوهای X و گاما در حدود انرژی 1MeV برای عناصر مختلف تقریباً هم مقدارند. کدام یک از موارد زیر برای حفاظ این پرتوها مناسب‌اند؟

(1) پارافین و آب بستگی به در دسترس بودن هر یک

(2) سرب، آهن، بتون بستگی به در دسترس بودن هر یک

(3) آلیاژ سرب، مس و غیره بستگی به در دسترس بودن هر یک

(4) همه موارد فوق بستگی به شرایط مورد نیاز و در دسترس بودن هر یک

4 - دز مؤثر E کدام است؟

$$H(Sr) = D_0 \times W_R \quad (1)$$

$$E(Sr) = \sum_i^n W_T \sum_i^n D_T(Gy) \cdot W_R \quad (2)$$

$$E(\text{rem}) = \sum_i^n W_T \sum_i^n D_T(Gy) \cdot W_R \quad (3)$$

$$E(\text{mSr}) = \sum_i^n W_R \sum_i^n D_T(\text{Gy}) \cdot W_T \quad (4)$$

5 - در یک میدان مختلط گاما، نوترون و بتا به ترتیب مقادیر 0/5 میلی رنتگن در ساعت، 1 میکروگری در ساعت و 2 میکروسیورت در ساعت اندازه گیری شده است. معادل دز در این میدان چه قدر است؟

$$(1) \quad 0/629 \text{ میلی سیورت در ساعت} \quad (2) \quad 1/23 \text{ میلی سیورت در ساعت}$$

$$(3) \quad 1/5 \text{ میلی گری در ساعت} \quad (4) \quad 3/5 \text{ میلی رم در ساعت}$$

6 - ثابت پرتو دهی (Γ) یک چشمه ^{24}Na که دو فتون گامای با انرژی های $2/75\text{MeV}$ و $1/37\text{MeV}$ در هر ثانیه به طور صددرصد ساطع می نماید کدام است؟

$$(1) \quad 2/06 \frac{\text{R}}{\text{h}} \quad \text{و} \quad 1/03 \times 10^{-8} \frac{\text{x}}{\text{hr}}$$

$$(2) \quad 1/03 \frac{\text{mR}}{\text{hr}} \quad \text{و} \quad 1/02 \times 10^{-8} \frac{\text{x} - \text{m}^2}{\text{hr}}$$

$$(3) \quad 2/06 \frac{\text{R} - \text{m}^2}{\text{Ci} - \text{hr}} \quad \text{و} \quad 1/43 \times 10^{-8} \frac{\text{x} - \text{m}^2}{\text{MBor} - \text{hr}}$$

$$(4) \quad 2/06 \frac{\text{Ci} - \text{hr}}{\text{R} - \text{m}^2} \quad \text{و} \quad 1/73 \times 10^{-8} \frac{\text{MBor} - \text{hr}}{\text{x} - \text{m}^2}$$

7 - در مورد اصل براگ - گری در دزیمتری کدام گزینه زیر صحیح است؟

$$(1) \quad \frac{dE_m}{dM_m} = \frac{S_m}{S_g} \times \frac{dE_g}{dM_g}$$

$$(2) \quad \frac{dE_g}{dM_g} = \frac{S_m}{S_g} \times \frac{dE_m}{dM_m}$$

(3) مقدار یونسازی تولید شده در یک حفره پر شده از یک گاز که توسط یک ماده جاذب پوشانیده شده باشد متناسب است با انرژی در دیواره جذب شده ضربدر توان ایستادگی دیواره نسبت به بافت و برقراری تعادل الکترونی.

(4) تمام موارد فوق

8 - دُز روزانه یک غده 18 گرمی که در آن ^{32}S به طور یکنواخت پخش شده باشد، کدام است؟

$$(\bar{E}_\beta = 0/1674 \text{ MeV} , \bar{E}_\beta = 0/0488 \text{ MeV})$$

$$0/25 \frac{\text{mGy}}{\text{d}} \quad (1) \quad 0/77 \text{ mGy} \quad (3) \quad 0/77 \frac{\text{mSr}}{\text{d}} \quad (4) \quad 0/25 \frac{\text{mSr}}{\text{d}} \quad (2)$$

9 - تعریف دقیق دز معادل میدان پرتو (Ambient Dose Equivalent) کدام است؟

- (1) دز مؤثر در روی یک فانتوم کره‌ای ICRU
- (2) دز معادل تولیدشده توسط یک میدان پرتو توسعه‌یافته و همسو در یک فانتوم کره‌ی ICRU و در عمق d در روی شعاع مخالف جهت پرتوهای همسو.
- (3) دز معادل در یک میدان یوتو بعنوان یک مقدار قابل اندازه‌گیری برای دز مؤثر برای کاربرد در مونیورینگ پرتوهای خارج از بدن. مقدار d برابر 10mm برای پرتوهای پرنفوذ توصیه شده است.
- (4) گزینه‌های 2 و 3 صحیح است.

10 - برای تعیین دز کارکنان به‌ویژه در محیط‌های مختلط نوترون استفاده می‌گردد. یکی از دزیمترهای اختراع شده در ایران دزیمترنوتر ایران است. کدام گروه پرتوهای زیر می‌تواند با این دزیمتر اندازه‌گیری شود؟

- (1) نوترون‌های حرارتی (فقط)
 - (2) دز نوترون‌های تند، حرارتی و آلبدو نوترون‌ها
 - (3) پرتوهای X، گاما، نوترون و غیره به‌طور دقیق
 - (4) همه موارد فوق بعلاوه پرتوهای آلفا رسیده بر بدن
- 11 - برای حفاظت‌گذاری یک چشمه پرتوزا که پرتوهای β پرنرزی و پرتوهای گاما ساطع می‌کند، کدام یک از حفاظ‌های زیر با ضخامت مناسب مورد نیاز است؟

- (1) یک کره‌ای از قلع با پوشش کادمیوم
- (2) یک کره سربی (اول)، پوشش پلی‌اتیلنی (دوم) و پوشش کادمیومی (سوم)
- (3) یک کره پلی‌اتیلنی (اول)، یک پوشش سربی (دوم) با ضخامت‌هایی که بتواند هر دو را جذب نماید.
- (4) هیچ‌کدام

12 - معادل دز کدام است؟

(1) حاصلضرب دز یک ماده در ضریب کیفی بافت

(2) حاصلضرب دز بافت برحسب راد در ضریب کیفی Q

(3) حاصلضرب دز عضو برحسب Gy در ضریب توزین پرتویی

(4) حاصلضرب دز عضو برحسب راد در ضریب توزین پرتویی (Sr/Gy)

13 - یک چشمه کوچک ^{32}P با توان پرتوزایی $3/7 \times 10^0$ بکرل در داخل یک حفاظ سربی با اندازه کافی

ضخیم که بتواند جلوی چشمه‌های بتا را کاملاً بگیرد، قرار دارد. شار پرتوهای ترمزی X در فاصله 10

سانتی‌متری از چشمه چند فوتون در سانتی‌متر مربع در ثانیه است؟ $E_{\beta \max} = 1/71 \text{ MeV}$ ، $Z_{\text{pb}} = 82$

(1) $14/4$ (2) $4/8 \times 10^5$ (3) $3/5 \times 10^5$ (4) $29/5$

14 - سلول‌هایی که براساس اصل برگونیه و تریبونند و به پرتوها بیش‌تر حساس‌ترند چه ویژگی دارند؟

(1) سلول‌ها باید دارای هسته بزرگ‌تری باشند.

(2) سلول‌ها و هسته لازم است حساس باشند.

(3) سلول‌ها باید دارای هسته بزرگ‌تری بوده و هر دو حساس باشند.

(4) از آهنگ میتوزی بالاتر برخوردار بوده و به‌طور کلی غیردیفرانسیه (Undifferentiated) بوده و دارای آینده

سرطان‌زایی بالاتری باشند.

15 - سلول‌هایی که در بدن حساسیت بیش‌تری به پرتوها دارند کدام‌اند؟

(1) پوست، غدد، جگر و ریه.

(2) عضله، استخوان‌ها، معده، مزودرم

(3) پوست، مزودرم، قلب، سلول‌های تناسلی، جگر و ریه.

(4) مغز استخوان بویژه قرمز، عدد لنفاوی، سلول‌های تناسلی، عدسی چشم و لمفوسیت‌ها

16 - ناحیه‌ی همگرایی سری $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2z}{2z+1}\right)^n$ در صفحه مختلط z کدام یک از گزینه‌های زیر است؟

$$\operatorname{Re}(z) > -\frac{1}{2} \quad (4) \quad \operatorname{Re}(z) < -\frac{1}{2} \quad (3) \quad \operatorname{Re}(z) > -\frac{1}{4} \quad (2) \quad \operatorname{Re}(z) < -\frac{1}{4} \quad (1)$$

پاسخنامه

1- گزینه‌ی «1» صحیح است.

پدیده فوتوالکتریک تا حدود انرژی 250KeV دارای اهمیت می‌باشد و تولید زوج هم از انرژی 1/022MeV آغاز می‌گردد و در انرژی ذکر شده تنها پدیده مهم کامپتون می‌باشد.

2- گزینه‌ی «2» صحیح است.

وقتی گفته شد با زاویه α پراکنده شده یعنی پدیده کامپتون می‌باشد. انرژی فوتون پراکنده پدیده کامپتون از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$E_{\gamma} = h \cdot f' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2} (1 - \cos(\theta))}$$

انرژی داده شده به محیط برابر است با انرژی فوتون فرودی منهای خروجی.

برای انرژی 1MeV

$$E'_{\phi} = 1 / (1 + 0/5) = 0/666 \quad \text{یعنی انرژی } E = 1 - 0/666 = 0/334 \quad \text{به محیط داده شده است. یعنی } 33/4\%$$

یعنی گزینه 2 صحیح است.

3- گزینه‌ی «4» صحیح است.

هر کدام از گزینه‌ها ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. بسته به محدودیت‌های مکانی و اقتصادی. ولی کاربرد سرب و بتن از بقیه بیشتر است، یعنی در مجموع گزینه 4 صحیح است.

4- گزینه‌ی «2» صحیح است.

فرمول دوز مؤثر یا Effective Dose چنین است:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_n \cdot D_{T-R}$$

که در آن

E is the effective dose to the entire organism:

H_T is the equivalent dose absorbed by tissue T

W_T is the tissue weighting factor defined by regulation

W_R is the radiation weighting factor defined by regulation

$D_{T,R}$ is the mass-averaged absorbed dose in tissue T by radiation type R

واحد آن سیورت می‌باشد (Sv) که در سوال Sr نوشته شده است. یعنی گزینه 2 صحیح است.

5- گزینه‌ی «؟» صحیح است.

ضریب کیفیت برای گاما و بتا برابر 1 و برای نوترون بسته به انرژی بین 2 تا 5 متغیر است.

$$H=QD$$

1 رونتگن برابر 0/0096 در بافت می‌باشد. یعنی 0/5 میلی‌رونتگن برابر 0/0000048 Gy یعنی 4/8 میکروگری

می‌باشد. چون انرژی نوترون مشخص نیست مجموع دوز گاما و بتا برابر است با:

$$\text{Dose Equivalent (Gamma and Beta)} = 1 \times (4/8 + 2) = 6/8 \mu\text{Sv} = 6800 \mu\text{Sv} = H$$

واحد معادل دوز سیورت می‌باشد پس گزینه 3 و 4 صحیح نیست. با احتساب دوز نوترون باید دوز مجموع بیش‌تر از

مقدار 6800 میکرو سیورت شود یعنی هیچ‌کدام از گزینه‌ها صحیح نیست.

6- گزینه‌ی «3» صحیح است.

واحد ثابت پرتودهی $R - m^2 / hr - A$ می‌باشد که A اکتیویته است. پس تنها گزینه 3 واحدی منطبق با این

شکل دارد.

7- گزینه‌ی «1» صحیح است.

فرمول براگ گری چنین است:

If a cavity ionization chamber is built with a wall material whose radiation absorption properties are similar to those of tissue, then the energy absorbed per unit mass of the wall material, dE_m/dM_m is related to the energy absorbed per unit mass of gas in the cavity gas, dE_g/dM_g by the relation.

$$\frac{dE_m}{dM_m} = \frac{S_m}{S_g} \times \frac{dE_g}{dM_g} = \rho_m \times W \times J$$

where S_m is the mass stopping power of the wall material and S_g is the mass stopping power of the cavity gas and their ratio can be written by $\frac{S_m}{S_g} = \rho_m$

w is the mean energy dissipated in the production of the ion-pair in the gas and J =number of ions pairs created per unit mass in the gas.

لذا گزینه 1 صحیح است.

8- گزینه ی «؟» صحیح است.

برای محاسبه دوز از فرمول زیر استفاده می کنیم:

$$DE = A \times E / m$$

که m جرم و A اکتیویته و E انرژی است.

$$6660 \text{ dis / s} = 57542000 \text{ dis / d}$$

$$DE = 575424000 \times (0/1674 + 0/0488) * (1/6E - 13) \div 0/018 = 1/1 \text{ msv / d}$$

پس هیچ کدام از گزینه ها صحیح نمی باشد.

9- گزینه ی «2» صحیح است.

گزینه 2 صحیح است که تعریف دوز محیطی است.

10- گزینه ی «1» صحیح است.

گزینه 3 صحیح نیست چون به دلیل ترکیب پرتوهای مختلف و غیرنوترونی اندازه گیری دوز هر کدام به صورت دقیق

امکان پذیر نیست. در نتیجه این نقیض گزینه 4 نیز هست. دوزیمترهای نوترون «باید» دوز نوترون های سریع را نیز

اندازه گیری کنند. پس گزینه 1 صحیح است.

11- گزینه ی «3» صحیح است.

به دلیل تولید X ترمزی توسط بتا در هسته‌های سنگین، باید ابتدا بتا را متوقف کنیم به این منظور از مواد با عدد اتمی پایین در ابتدا استفاده می‌شود سپس به حذف و جذب گاما توسط هسته‌های سنگین پرداخته می‌شود. یعنی گزینه 3.

12- گزینه‌ی «2» صحیح است.

گزینه 2 صحیح است که تعریف دوز می‌باشد $H=QD$

13- گزینه‌ی «2» صحیح است.

$f = 3/5ZE * 10E - 4$ میزان اشعه ایکس ترمزی تولید شده است و Z عدد اتمی و T انرژی ذره بتاست.

باید انرژی میانگین ذرات بتا را قرار دهیم که یک سوم انرژی ماکزیموم است.

پس:

$$f = (1/3) * 3/5 * 1/71 * 82 * 0/0001 = 0/016359$$

$$\text{flux} = 0/016359 * 3/7E10/4(\pi)r^2 = 4/88(\text{photon} / \text{cm}^2\text{s})$$

14- گزینه‌ی «4» صحیح است.

حساسیت سلول به پرتو تا اندازه‌ای به مرحله بلوغ و همچنین نقش آن بستگی دارد. سلول‌های رشدنیافته نسبت به سلول‌های رشد یافته حساسیت بیشتری به پرتو دارند. اعضای مختلف بدن حساسیت متفاوتی نسبت به پرتو نشان می‌دهند به طوری که حساسیت آن‌ها بستگی به کار عضو، آهنگ رشد سلول‌ها و حساسیت ذاتی به پرتو دارد. علاوه بر این موارد موارد ذکر شده در گزینه 4 نیز باید افزوده شود. در نتیجه گزینه 4 صحیح است.

15- گزینه‌ی «4» صحیح است.

16- گزینه‌ی «؟» صحیح است.

مجموعه تست

1 - ضخامت چگالی ماده با کدام گزینه تعریف می‌شود؟

(1) حاصلضرب چگالی ماده جاذب در ضخامت خطی آن.

(2) حاصل تقسیم چگالی ماده جاذب در ضخامت خطی آن.

(3) حداقل ضخامت حفاظ ضرب در چگالی ماده جاذب.

(4) حاصل تقسیم چگالی ماده سنگین به ماده سبک

2 - برد بیشینه ذرات بتا در ماده در انرژی معین از کدام گزینه تبعیت می‌کند؟

(1) پلاستیک > آب (2) آب > پلاستیک (3) آب > آلومینیم (4) هوا > آلومینیم

3 - تغییرات انرژی فوتون‌های پراکنده شده در پدیده کامپتون، ...

(1) به صورت گسسته است.

(2) به صورت پیوسته است.

(3) با توجه به انرژی فوتون فرودی ممکن است گسسته یا پیوسته باشد.

(4) با توجه به انرژی بستگی الکترون به هسته هدف ممکن است گسسته یا پیوسته باشد.

4 - در اثر برهم‌کنش نوترون حرارتی ($^{10}\text{B}, (0/025\text{eV})$) با سطح مقطع 750 بارن تولید می‌شود، سطح مقطع

بور برای نوترون‌های 50eV چه قدر است؟

(1) 15/20b (2) 15/65 b (3) 16/84 b (4) 16/77 b

5 - کدام واکنش به‌عنوان چشمه نوترون قابل حمل مورد استفاده است؟

(1) (D, n) (2) (α , n) (3) (n, α) (4) (p, n)

6 - کدام گزینه صحیح است؟

(1) $1\text{Gy} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$ (2) $1\text{Gy} = 100\text{rad}$

(3) $1\text{Gy} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$ (4) هیچ‌کدام

7 - جذب نوترون با انرژی حدود 10keV در بافت‌های استخوان، ماهیچه و چربی به چه ترتیبی است؟

(1) استخوان > ماهیچه

(2) استخوان > چربی

(3) ماهیچه > استخوانی

(4) ماهیچه > چربی

8 - به انرژی جنبشی ذرات یوننده اولیه که از برهمکنش تابش فرودی با واحد جرم محیط برهم‌کنش‌کننده

تولید می‌شود چه می‌گویند؟

(2) کِرما

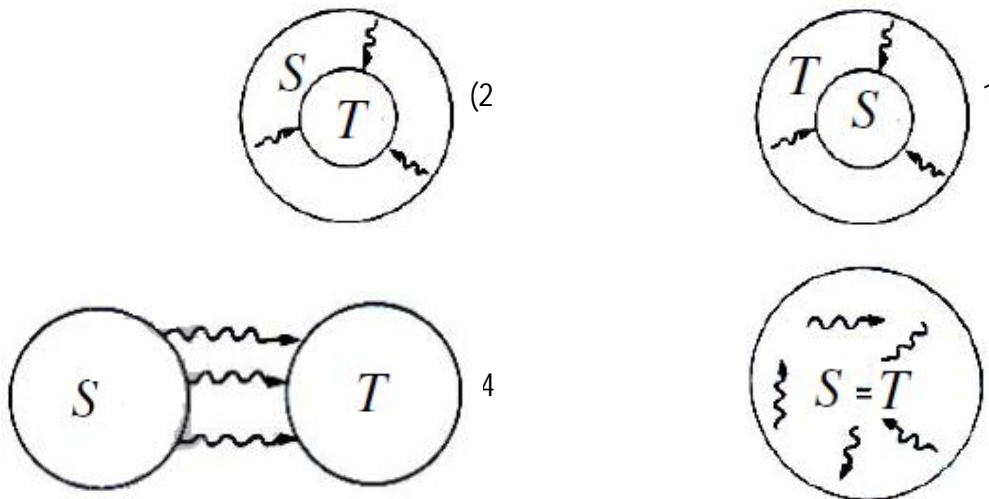
(1) گسیل ویژه پرتو گاما

(4) توان ایستاندگی بافت

(3) یونش ویژه

9 - اگر در شکل‌های زیر S علامت چشمه و T علامت هدف باشد، کدام گزینه ارتباط فیزیکی میان

اندام‌های چشمه و هدف را به درستی بیان نمی‌کند؟



10 - عبارت $\dot{D}_n(E) = \frac{\phi(E)\sum E\tau N_i\sigma_i f_i}{J}$ معرف چیست؟
 $1 \text{ kg} \cdot \text{Gy}$

(1) دُز ناشی از واپاشی کل رادیوایزوتوپ در اندام

(2) آهنگ دُز برخورد اول برای نوترون‌های تند

- (3) دُز جذب شده در اتاقک با دیواره هوا
- (4) دُز جذب شده ناشی از برهم‌کنش ذرات یوننده اولیه با اتم‌های محیط
- 11 - کدام اثرات ناشی از برهم‌کنش پرتوها با نسوج را اثرات آستانه‌ای می‌گویند؟
- (1) اثرات دارای عدم ارتباط بین تعداد دُز و تأثیر آن بر اندام
- (2) جذب هر میزان دُز توسط اندام
- (3) اثرات تصادفی
- (4) اثرات غیرتصادفی
- 12 - کدام گزینه جزء آثار مشترک بین سه گروه سندرم تابش حاد نیست؟
- (1) تهوع و استفراغ
- (2) کسالت و خستگی
- (3) خون‌ریزی معده
- (4) بالا رفتن دمای بدن
- 13 - بیش پرتوگیری منفرد خیلی زیاد یا بیش پرتوگیری‌های در حد کم و مداوم چه تأثیری بر بدن می‌گذارد؟
- (1) ایجاد سندرم معده‌ای - روده‌ای
- (2) ایجاد سندرم دستگاه عصبی مرکزی
- (3) آثار تأخیری
- (4) آثار حاد
- 14 - کدام رادیو ایزوتوپ به‌عنوان عنصر «استخوان‌خواه» شناخته می‌شود؟
- (1) رادیم
- (2) استرونیسم
- (3) اورانیوم
- (4) مزوتوریم
- 15 - کدام گزینه صحیح است؟
- (1) هیچ نوع اثر ژنتیکی ناشی از تابش با شدت کم در انسان مشاهده نشده است.
- (2) هر نوع عوارض بدنی که ممکن است ناشی از آهنگ دُز زمینه یا mGy در سال باشد به‌هیچ‌عنوان تحت‌الشعاع عوامل دیگر قرار نمی‌گیرد.
- (3) تأثیر تمام تابش‌ها در تولید آب مروارید یکسان است.
- (4) پدیده کوتاهی عمر در اثر پرتوگیری هم در انسان و هم در حیوانات مشاهده می‌شود.

16 - اولین ارگان تخصصی ملل متحد چه نام داشت؟

(1) کمیسیون بین‌المللی یکاها و اندازه‌گیری‌های پرتوشناختی (ICRU)

(2) کمیسیون بین‌المللی حفاظت پرتوشناختی (ICRP)

(3) سازمان بین‌المللی کار (ILO)

(4) سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)

17 - عبارت «دُز معادل برای افراد مختلف نباید از آن چه کمیسیون (ICRP) با مراعات جنبه‌های احتیاطی

پیشنهاد کرده است بیشینه شود» به کدام گزینه مربوط است؟

(1) معیارهای اصلی ایمنی تابش

(2) دستورالعمل کمیته مشورتی حفاظت در برابر پرتو ایکس

(3) دستورالعمل سازمان بین‌المللی بهداشت شغلی

(4) محدودیت دُز توصیه شده توسط (ICRP)

18 - ضریب وزنی و احتمال خطر برای اثرات تصادفی در کدام بافت بیش‌تر است؟

(1) غده تیروئید (2) ریه (3) پستان (4) سطح استخوان

19 - کمیسیون ICRP حد دُز معادل تمام بدن را برای افراد جامعه چه قدر تعیین کرده است؟

(1) 500mSv (2) 50mSv

(3) 5mSv (4) تعیین نکرده است.

20 - بیشینه بار بدنی تمام استخوان خواهان در مقایسه با دُز معادل رساننده به استخوان کدام عنصر تعیین

می‌شود؟

(1) توریم (2) رادیم (3) استرانسیم (4) کلسیم

پاسخنامه

- 1- گزینه‌ی «1» صحیح است.
- 2- گزینه‌ی «1» صحیح است.
- 3- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 4- گزینه‌ی «4» صحیح است.
- 5- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 6- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 7- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 8- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 9- گزینه‌ی «1» صحیح است.
- 10- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 11- گزینه‌ی «4» صحیح است.
- 12- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 13- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 14- گزینه‌ی «2» صحیح است.
- 15- گزینه‌ی «1» صحیح است.
- 16- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 17- گزینه‌ی «4» صحیح است.
- 18- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 19- گزینه‌ی «3» صحیح است.
- 20- گزینه‌ی «2» صحیح است.

سوالات تشریحی:

1 - الف. یونش ویژه را تعریف کنید.

ب. چگونگی تغییرات یونش ویژه را برحسب انرژی با رسم شکل بیان نمائید.

اساس کار و مشخصات اتاقک با دیواره هوا را بیان کنید. (با رسم شکل)

الف. معادلات زیر مربوط به چیست؟

$$\sum_T W_T H_{50,T} \leq 0.05 Sv$$

$$H_{50T} \leq 0.5 Sv$$

ب. هر یک نشان دهنده چه واقعیتی است؟

2 - شخصی هنگام کار با دستگاه پرتو ایکس دُزی معادل 750mR دریافت کرده است. این پرتوگیری

برحسب یکه‌های SI چه قدر است؟ ($1R = 2.58 \times 10^{-4} \frac{C}{kg}$ و $1X = 3881R$)

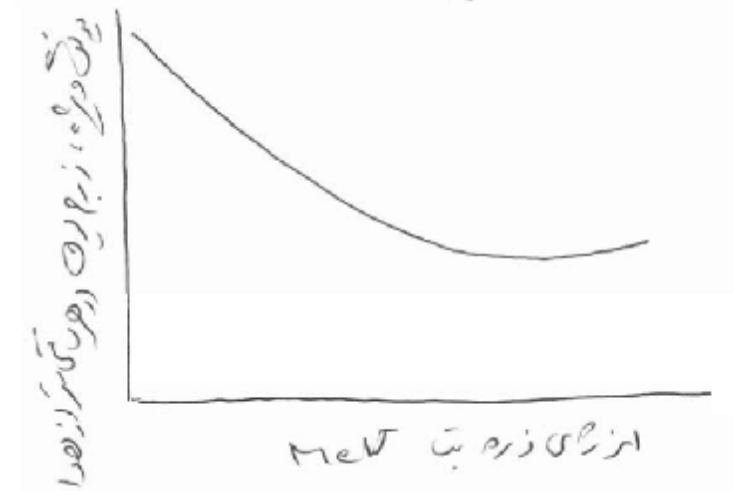
پاسخنامه

1- الف) یونش ویژه عبارتست از تعداد زوج یون‌های تشکیل شده در هر واحد مسافتی که ذره بتا می‌پیماید.

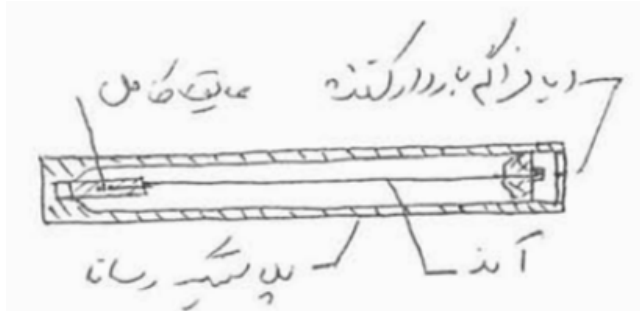
ب) یونش ویژه برای ذرات بتا در انرژی‌های پایین نسبتاً بالاست. با افزایش انرژی ذره، یونش ویژه آن سریعاً کاهش

می‌یابد تا این‌که در حدود انرژی 1MeV به کمینه‌ای پهن می‌رسد. مانند شکل زیر چنانچه انرژی ذره از این مقدار

هم تجاوز کند یونش ویژه به آرامی شروع به افزایش مجدد می‌کند.



2- وسیله قابل حمل مناسب اندازه‌گیری پرتوها برای کارهای خارج از آزمایشگاه را می‌توان با مترکم کردن هوا در اطراف محفظه اندازه‌گیری فراهم کرد. در این صورت باید شرایط لازم برای تعریف یکای پرتوگیری همیشه برقرار بماند. بدیهی است که ساختن وسیله‌ای که دیواره‌های آن هوای فشرده باشد عملاً بسیار دشوار خواهد بود. اما می‌توان وسیله‌ای ساخت که دیواره‌های آن از ماده معادل هوا باشد. یعنی ماده‌ای که خواص جذب پرتو X در آن بسیار شبیه به همین خواص در هوا باشد. چنین اتاقتی را می‌توان به شکل یک خازن الکتریکی و به صورتی که در طرح زیر دیده می‌شود ساخت دیواره بیرونی این وسیله به شکل استوانه‌ای از جنس پلاستیک با ضخامت تقریباً 4/75mm است که رسانای الکتریکی است. در مرکز استوانه سیمی قرار دارد که با دیواره‌ی بیرونی هم محور است و به وسیله یک عایق جذب کاملاً از آن جدا شده است. بار این سیم مرکزی (آند) نسبت به دیواره مثبت است. هنگامی که پرتو ایکس یا گاما به این اتاقت می‌تابد یونش حاصل از برهم‌کنش میان فوتون‌ها و دیواره، در محفظه اندازه‌گیری باعث تخلیه خازن می‌شود و در نتیجه پتانسیل آند کاهش می‌یابد. کاهش ولتاژ آند با یونش تولید شده در محفظه نسبت مستقیم دارد که آن نیز به نوبه خود متناسب با میزان پرتوگیری است.



- 3- الف) این روابط مربوط به حد سالانه ورود ایزوتوپ‌های پرتوزا به بدن است که با ALI مشخص می‌شود.
 ب) رابطه (1) نشان می‌دهد که به خاطر کنترل اثرات تصادفی، دُز مؤثر تمام بدن از حد سالانه تجاوز نمی‌کند.
 رابطه (2) نشان می‌دهد که به خاطر کنترل آستانه زیانبار اثرات غیرتصادفی از بافت یا هر اندام همواره کم‌تر از حد سالانه است.

-4

$$\frac{1X}{3881R} = 2/58 \times 10^{-4} \frac{X}{R} \times 1 \frac{C/kg}{X} = 2/58 \times 10^{-4} \frac{C/kg}{R}$$

$$2/58 \times 10^{-4} \frac{C/kg}{R} \times 0/75R = 1/94 \times 10^{-4} \frac{C}{kg} = 0/194 \frac{mc}{kg}$$

1 - رابطه بین μ_r و μ را توضیح دهید.

2 - چرا ${}^6_3\text{Li}$ و ${}^{10}_5\text{B}$ مواد مؤثری به عنوان حفاظ در مقابل نوترون‌ها به شمار می‌روند؟ با نوشتن واکنش‌های مربوطه توضیح دهید.

3 - با استفاده از مقادیر $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ برای کربن، هیدروژن، ضریب تضعیف خطی (μ) یک ماده پلیمری با فرمول $(\text{CH}_2)_n$ را با چگالی $\frac{1}{5} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ در انرژی 1MeV محاسبه کنید.

4 - زاویه پراکندگی مؤثر (برحسب درجه) در اندرکنش کامپتون فوتون‌های 1MeV و 0.5MeV را با استفاده از مقدار f_c به دست آورید. زاویه پراکندگی مؤثر زاویه‌ای است که انرژی فوتون پراکنده شده مساوی انرژی متوسط فوتون‌های پراکنده شده باشد. از نتایج به دست آمده چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

$$\sigma_{ca} = f_c \tau_c \quad \text{و} \quad m_0 C^2 = 0.511\text{MeV}$$

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 C^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{* از جدول مربوط به هوا استفاده نمائید.}$$

5 - یک چشمه کبالت بسته (Sealed) با اکتیویته ظاهری 100Ci درون یک استخر آب به عمق 2 متر افتاده و در کف استخر قرار گرفته است. با استفاده از روش تحلیل پرتوی و اعمال ضریب انباشت برگر، حداکثر نرخ دُز در سطح استخر را برحسب mSv/h حساب کنید. چشمه را نقطه‌ای فرض کنید.

$$B = 1 + a \mu_0 r e^{b \mu_0 r}$$

* فرض کنید که به‌ازای هر واپاشی کبالت شصت دو فوتون $1/5\text{MeV}$ تابش می‌شود.

6 - یک دستگاه مولد پرتو ایکس با ولتاژ ثابت 200kV و فیلتر 8mmAl با جریان 50mA کار می‌کند. اگر این مولد به مدت 4/5 ساعت در روز و 6 روز در هفته و 50 هفته در سال کار کند، ضخامت حفاظ بتونی لازم در فاصله 4 متری از دستگاه را بر اساس استاندارد ICRP 60 برای مردم عادی و با لحاظ نمودن حاشیه ایمنی 5، حساب کنید. KV_p معادل را دو برابر ولتاژ ثابت در نظر بگیرید.

$$IR = 0/87 \text{ rad}$$

اطلاعات و جدول‌های لازم برای حل مسائل بالا، پیوست می‌باشد.

-1

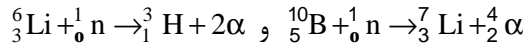
$$\begin{aligned}\mu_{tr} &= \mu - (1-f_c)\mu_c - (1-f_{pp})\mu_{pp} - (1-f_{ph})\mu_{ph} \\ &= \mu - \mu_c + \mu_c f_c - \mu_{pp} + \mu_{pp} f_{pp} - \mu_{ph} + \mu_{ph} f_{ph} \\ &= f_{ph}\mu_{ph} + f_{pp}\mu_{pp} + f_c\mu_c\end{aligned}$$

ضریب تضعیف خطی کل (μ) بدون لحاظ کردن تابش ترمزی و نابودی زوج و فلورسانت و فوتون پراکدگی کامپتون است. یعنی در حقیقت محیط بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.

در μ_{tr} فقط انرژی داده شده به ذرات مورد نظر است.

-2

B و Li با واکنش‌های زیر جاذب‌های خوبی برای نوترونی (بخصوص حرارتی) هستند. و تولید هسته‌های سنگین می‌کند که دارای برد کمی هستند و به راحتی جذب حفاظ می‌شوند.



-3

در انرژی 1MeV:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_C = 6 / 35 \times 10^2 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right)$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_H = 1 / 26 \times 10^{-1} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right)$$

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_C \rho_C + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_H \rho_H$$

$$= 0 / 082 + 0 / 027 \approx 0 / 11 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}\right)$$

-4

چون انرژی‌ها زیر 1/02 است پس pp نداریم.

$$\mu_{ca} = f_c \mu_c$$

μ_c و μ_{tr} در جداول موجود است. پس با داشتن آنان f_c به دست می‌آید.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{tr} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ph} + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ca}$$

با مشاهده جدول آخر کتاب $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ph}$ بسیار کوچک است (برای انرژی‌های 1MeV و 0/5 و در حد 10^{-6} است که از

آن در کنار μ_{ca} می‌توان صرف‌نظر کرد.

$$\text{پس } \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{tr}; \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ca}$$

برای 1MeV:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{tr} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ca} = 2/79 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right)$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = 6/35 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right) \Rightarrow f_c = \frac{2/79 \times 10^{-2}}{6/35 \times 10^{-2}} = 0/44$$

f_c کسر متوسط انرژی داده شده به الکترون‌هاست پس $(1-f_c)$ کسر انرژی تبدیل شده (خارج شده) به صورت

فوتون است.

$$1-f_c = 1-0/44 = 0/56$$

$$E = 1\text{MeV} \Rightarrow \bar{E}' = (1-f_c)E = 0/56\text{MeV}$$

$$0/56 = \frac{1}{1 + \frac{1}{0/511}(1-\cos\theta)} \Rightarrow \cos\theta = 0/6 \Rightarrow \theta = 53^\circ$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{tr} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ca} = 2/97 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\right) \quad \text{و} \quad \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = 8/68 \times 10^{-2} \quad 0/5\text{MeV} \quad \text{برای}$$

$$\frac{\mu_{ca}}{\rho} = 0/34 = f_c \Rightarrow 1-f_c = 0/66 \quad 0/66E = \bar{E}'$$

$$0/66 \times 0/5 = \bar{E}' = 0/33 \text{ MeV} \Rightarrow 0/33 = \frac{0/5}{1 + \frac{0/5}{0/511}(1 - \cos \theta)}$$

$$\cos \theta = 0/47 \Rightarrow \boxed{\theta = 62^\circ}$$

با کاهش انرژی زاویه ی پراکندگی بزرگ تر شده یعنی فوتون بیش تر تمایل دارد به سمت عقب بازگشت کند

-5

$$A = 100 \text{ Cis} = 3/7 \times 10^{12} \frac{\text{dis}}{\text{s}} \quad 3/7 \times 10^{12} \frac{\text{dis}}{\text{s}} \quad r = 2\text{m}$$

$$\frac{\mu}{\rho} = 5/75 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} = 5/75 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$$

$$E = 1/5 \text{ MeV} \text{ (دو فوتون)}$$

$$\mu = 5/75 \frac{1}{\text{m}}$$

$$Q_f = 1 \text{ فوتون}$$

$$IR = \frac{\mu}{\rho} E = 1/38 \times 10^{-15} \left(\frac{\text{m}^2 \text{s}}{\text{kg}} \right)$$

$$\text{پاسخ } R = \frac{A}{4\pi r^2} e^{-\pi r} \quad RB = \frac{3/7 \times 10^{12}}{4\pi \times 2^2} \times e^{-5/75 \times 2} \times 1/38 \times 10^{-15} \times B_x$$

$$a = 1/16 \quad b = 0/021 \quad \mu = 5/75 \frac{1}{\text{m}} \quad r = 2\text{m}$$

$$B = 1 + a\mu r e^{b\mu r}$$

$$B = 1 + 1/16 \times 5/75 \times 2 e^{0021 \times 5/75 \times 2} = 17/9 = B_\infty$$

$$(7-8) \text{ باتوجه به منابع (نمودار 7-8): } \frac{B_x - 1}{B_\infty - 1} \approx 0/8 \Rightarrow \boxed{B_x = 14/5}$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = R = 5/37 \times 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{hr}} = \boxed{5/37 \times 10^{-2} \frac{\text{MSv}}{\text{h}}}$$

-6

$$KV_p = 400 \text{ V} \quad K_0 \approx 18(\text{msv} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) \leftarrow \text{Cember کتاب از}$$

برای افراد جامعه $\frac{ik}{y} = 1 \frac{\text{msv}}{y}$ است. که با حاشیه ایمنی 5 می شود:

$$\frac{ik}{y} = \frac{1 \text{ msv}}{5 y} = X$$

چون مدت کار دستگاه اشعه X بر حسب دقیقه در سال به شکل زیر است:

$$50 \times 6 \times 4 / 5 \times 60 \text{ min} = 1 \text{ سال کاری (با توجه به صورت سؤال)}$$

$$81000(\text{min}) = 1y$$

$$\Rightarrow K_0 \approx 18 \times 81000(\text{msv} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot y^{-1}) = 1458000$$

$$X^0 = \frac{ik}{r^2} = \frac{50 \times 1458000}{4^2} = 4556250 \frac{\text{msv}}{y}$$

$$X = X^0 \times A_f \Rightarrow A_f = \frac{1}{4556250} = 4 / 38 \times 10^{-8}$$

1- اگر تک انرژی در نظر بگیریم یعنی $E = KV_p = 400 \text{ Kev}$ آن گاه:

$$\mu = 22 \left(\frac{1}{\text{m}} \right) \Rightarrow 4 / 38 \times 10^{-8} = e^{-\mu x} \Rightarrow \boxed{x = 0 / 77 \text{ m}}$$

2- از جدول 6-7 ص 235: برای $KV_p = 400$ داریم $T_{1/2} = 3 / 3 \text{ cm}$

$$n(T_{1/2}) = T \Rightarrow \left(\frac{1}{2} \right)^n = 4 / 38 \times 10^{-8} \Rightarrow n \text{Ln} \frac{1}{2} = \text{Ln} 4 / 38 \times 10^{-8}$$

$$\Rightarrow \boxed{n = 24 / 4} \Rightarrow 24 / 4 \times 3 / 3 = \boxed{80 \text{ cm}}$$

- 1 - حفاظ پرتو چیست؟ در طراحی حفاظ چه نکات و مراحل را می‌بایست در نظر داشت؟
- 2 - آخرین حدود دُز برای پرتوکاران و مردم عادی چه قدر است؟ حاشیه ایمنی مناسب در طراحی حفاظ در چه حدودی است؟ چرا این حاشیه را به کار می‌بریم؟
- 3 - یک مثال ساده ارائه کنید که در آن نشان داده شود که روش تحلیل پرتوی در مورد آن (Ray Analysis) ناموفق می‌باشد.
- 4 - چرا طول واهلش اول (λ_1) از طول واهلش دوم (λ_2) کوچک‌تر است؟ در چه شرایطی λ_1 تقریباً با λ_2 برابر است؟
- 5 - سطح مقطع پراکندگی زاویه‌ای کامپتون در انرژی‌های بسیار کم با سطح مقطع پراکندگی زاویه‌ای تامسون نشان داده می‌شود و با رابطه زیر بر حسب (استرادیان / واحد سطح) داده می‌شود:
- $$e^{\sigma_T}(\theta_s) = \frac{1}{2} r_0^2 (1 + \cos^2 \theta_s) \text{ و } r_0 = 2/818 \times 10^{-15} \text{ m}$$
- مطلوبست:
- الف) چه کسری از فوتون‌های کم انرژی در مخروطی با زاویه‌ی رأس 90 درجه روبه جلو پراکنده می‌شوند؟

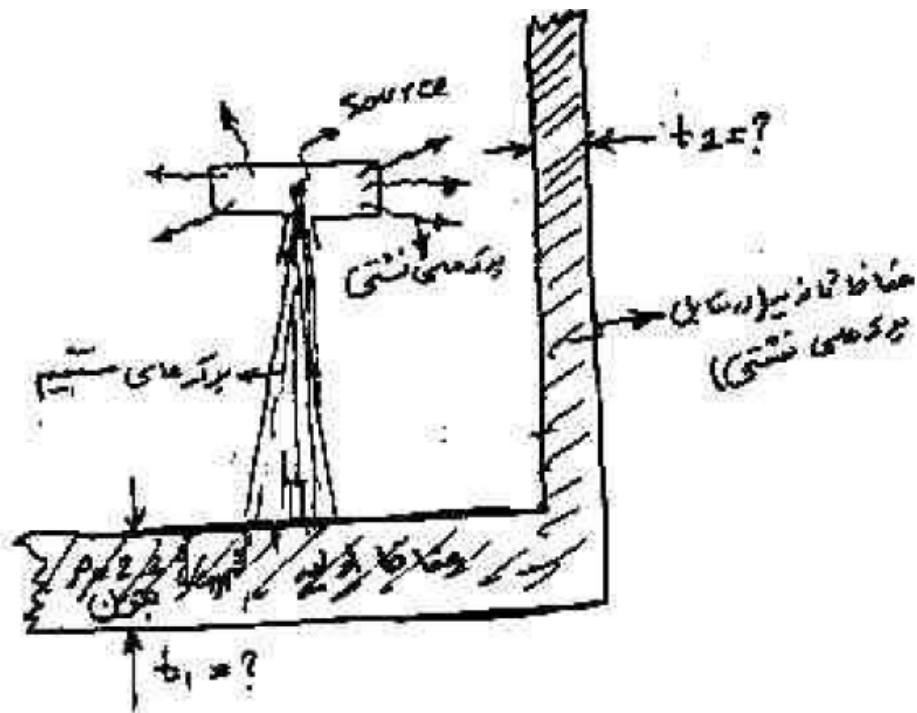
ب) ضریب تضعیف جرمی کامپتون را در انرژی‌های بسیار کم برای آهن ($^{56}_{26}\text{Fe}$) محاسبه کنید

$$\left(\frac{\mu_c}{\rho}\right)_{\text{Fe}} = ?$$

6 - یک چشمه همسانگرد نقطه‌ای که در مرکز یک مخزن کروی پر از آب قرار گرفته در هر ثانیه 10^3 پرتو گاما با انرژی 1MeV تابش می‌کند. شعاع کره چقدر باشد تا نرخ دُز در سطح خارجی مخزن برابر $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{hr}}$ باشد. از تضعیف پرتوها در جداره‌ی مخزن صرف‌نظر نموده و از ضریب بیلد‌آپ برگر استفاده کنید.

$$B = 1 + a\mu_{\text{gr}} e^{b\mu_{\text{gr}} r}$$

7 - حفاظ اطراف یک دستگاه مولد اشعه ایکس تراپی نشت پرتوها را در اطراف آن به‌گونه‌ای مهار می‌کند که در یک متری نقطه کانونی لامپ مولد اشعه ایکس (هدف) هنگامی که لامپ با ولتاژ 250KV_p و با جریان 20mA کار می‌کند، نرخ پرتوگیری برابر $1 \frac{\text{R}}{\text{h}}$ می‌باشد. اگر این دستگاه در هر هفته با بار کاری (work load) $22/000$ میلی‌آمپر- دقیقه کار کند، ضخامت حفاظ لازم در مقابل پرتوهای اولیه و ضخامت حفاظ لازم در مقابل پرتوهای نشتی را به میزانی به‌دست آورید که پرتوگری مشخص پشت هر یک از حفاظها در هر هفته کم‌تر از 10mR باشد. جنس هر در حفاظ را از بتون با چگالی $2/2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ در نظر بگیرید و فاصله سطح داخلی هر یک از حفاظها را تا کانون لامپ مولد اشعه ایکس برابر 3m فرض کنید.



پاسخ:

-1

حفاظت چیزی است که بین چشمه و شیء مورد حفاظت قرار می‌گیرد تا شدت تابش و دوز آن را جسم (شیء به میزان کافی کاهش دهد.

شیء مورد حفاظت می‌تواند انسان یا یک قطعه الکترونیکی باشد (در ماهواره‌ها)

اگر بتوانیم از مدادی استفاده کنیم که دارای صفحات کم‌تری باشد بهتر است، خاصیت تضعیف و جذب پرتوهای مورد نظر را داشته باشد، در برخی موارد انتقال حرارت حفاظ دارای اهمیت است. اگر تکفازها مخلوطی از دو نوع پرتو باشد باید بدانیم کدام را اول مهار کنیم. (مثلاً در مورد ترکیب فوتون و نوترون بهتر است اول نوترون‌ها را جذب کنیم، بعد γ های اولیه و ثانویه را)

-2

حدود دُز برای پرتوکاران: کل بدن $20 \frac{\text{msv}}{\text{y}}$ مردم عادی $1 \frac{\text{msv}}{\text{y}}$

حاشیه ایمنی 2 تا 10 می باشد.

برای ایجاد ایمنی بیشتر به خاطر احتمال عدم لحاظ برخی پرتوها و یا اشتباهات اندک در محاسبات یا کاهش بیشتر دز جذبی. (بدیهی است اگر چه دز جذبی فرد کمتر باشد بهتر است).

-4

طول واهلش برای پرتوهای مخلوط (طیف) تعریف می شود.

اگر در یک طیف تعداد فوتونهای کم انرژی زیاد باشد و تعداد فوتونهای پُرانرژی کم باشد باعث می شود که طول واهلش اول (λ_1) بزرگتر از λ_2 باشد. در λ_1 اکثر فوتونهای کم انرژی جذب می شوند و طیف ما به سمت سخت شدن می رود، که دارای λ بیش تری هستند.

اگر تعداد کم انرژیها خیلی زیاد باشد λ_1 تقریباً برابر λ_2 خواهد بود.

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \Rightarrow \ln I = -\frac{x}{\lambda} + \ln I_0 \text{ (ثابت)} \quad \text{چون}$$

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{برای پر انرژی}$$

$$\lambda = \lambda_1 \quad \text{برای کم انرژی}$$

$$m \sim \frac{1}{\lambda} \quad \text{هر چه } \lambda \text{ کم تر باشد شیب (نمودار I بر حسب X) بیش تر است یعنی}$$

$$\text{اگر } \lambda_1 = \lambda_2 \text{ پس برای پرانرژی: } m \sim \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{2\lambda_1}$$

$$m \sim \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{برای کم انرژی}$$

یعنی باید شیب پرتوهای کم انرژی 2 برابر پُر انرژیها باشد. یعنی باید شدت کم انرژیها دو برابر پرانرژیها باشد.

-6

$$S = 10^3 \frac{\text{Photon}}{\text{s}} = 36 \times 10^5 \frac{\text{Photon}}{\text{hr}} \quad \text{و } 1 \frac{\mu\text{sv}}{\text{hr}}$$

$$E = 1\text{Mev} \quad \frac{\mu}{\rho} = 7.07 \times 10^{-3} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right) \quad \mu = 7.07 \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$$

سینچش دانش

$$R = \frac{\mu}{\rho} E = 7/07 \times 10^{-3} \times 1/6 \times 10^{-13} = 11/3 \times 10^{-16} \left(\frac{\text{Jm}^2}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{H} = R = \frac{S}{4\pi r^2} \times IR \times e^{-\mu r} \times B = \frac{36 \times 10^{15}}{4\pi r^2} \times 11/3 \times 10^{-16} \times e^{-7/07r} \times B$$

$$a = 1/5 \quad b = 0/036$$

$$B = 1 + 1/5 \times 7/07r e^{0036 \times 7/07r} \approx 10/6r e^{025r}$$

$$\dot{H} = 3/2(1 + 10/6r e^{025r}) \frac{e^{-7/07r}}{r^2} = 10^{-6} \frac{5v}{hr}$$

$$\frac{r e^{025r} \times e^{-7/07r}}{r^2} = 3/12 \times 10^{-7} \Rightarrow -0/68r = \text{Ln } r - 15$$

$$\Rightarrow \text{تقریب} \Rightarrow \boxed{r \approx 18\text{m}}$$

-7

$$I = 20\text{mA} \quad W = 22000 \text{ mA} \cdot \text{min}$$

$$KV_p = 250\text{KV} \quad \text{بتون} \quad \frac{\mu}{\rho} = 0/115 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \Rightarrow \mu = 25(\text{m}^{-1})$$

$$22000 = 20(\text{mA}) \times t(\text{min}) \Rightarrow \boxed{t = 1100\text{min} = 18/3 \frac{\text{hr}}{\text{week}}}$$

$$\text{مجاز} \quad \dot{H} = 10 \frac{\text{mR}}{\text{week}} = 10 \frac{\text{mR}}{18/3\text{hr}} = 0/54 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}$$

$$\text{در فاصله 1 متری} \quad \dot{H}_1 = 1 \frac{\text{R}}{\text{h}} \sim \frac{1}{r_1^2} \quad \text{در سه متری} \quad \dot{H}_2 \sim \frac{1}{r_2^2}$$

$$\frac{\dot{H}_1}{\dot{H}_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{1 \frac{\text{R}}{\text{h}}}{\dot{H}_2} = \frac{3^2}{1} \Rightarrow \dot{H}_2 = \frac{1 \text{ R}}{9 \text{ h}} = 0/11 \frac{\text{Q}}{\text{h}} \quad (\text{در فاصله سه متری از چشمه})$$

\dot{H} مجاز در صورت مسأله برابر $10 \frac{\text{mR}}{\text{week}}$ یا همان $0/54 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}$ است پس:

$$0/54 \times 10^{-3} \left(\frac{R}{h}\right) = 0/11 \left(\frac{R}{h}\right) e^{-\mu x} \Rightarrow 4/9 \times 10^{-3} = e^{-\mu x}$$

$$5/32 = 25x \Rightarrow \boxed{x = 0/22 \text{ m}} = t_2$$

از جدول 6-7 هم می‌توان استفاده کرد:

$$\text{HVL} \approx 2/8 \text{ cm} \Rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 4/9 \times 10^{-3} \Rightarrow n = 7/7 \Rightarrow \boxed{x = nT_{1/2} = 22} = t_2$$

(از کتاب Cember)

$$K_0 = 12 \text{ msv} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1} = 12 \times 60 \text{ msv} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$$

$$= 720 \text{ msv} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1} = 72 \text{ R} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$$

$$X^0 = \frac{i}{r^2} K_0$$

$$X^0 = \frac{50}{32} \times 72 = 400 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}$$

$$\frac{0/54 \times 10^{-3} \left(\frac{R}{hr}\right)}{0/4 \left(\frac{R}{hr}\right)} = 1/35 \times 10^{-3} = e^{-\mu x} \Rightarrow \boxed{x \approx 27 \text{ cm}} = t_1$$