

مرور کلی بر استفاده و حفاظت پرتو

پرتوها معمولاً به صورت انرژی عبوری از خلاء یا ماده تعریف می‌شوند. پرتوهای یونساز اگرچه باعث مشکلات بهداشتی می‌شوند ولی نقش با ارزشی در تشخیص و درمان پزشکی، کنترل فرآیندهای صنعتی، تحقیقات و دیگر زمینه‌ها دارند، پرتوهای یونساز به طور طبیعی توسط مواد رادیواکتیو و بطور مصنوعی توسط دستگاه‌های مولد ایکس تولید می‌شوند. مقدار این پرتوها با استفاده از خواص آن‌ها آشکارسازی و اندازه‌گیری می‌شود. برای جلوگیری از اثرات تخریبی آن‌ها روش‌های مختلف حفاظت پرتویی بکار می‌رود.

پرتوها و یونسازی

بر اساس نظریه کوانتوم مکانیک امواج الکترومغناطیس رفتار ذره‌ای (فتون) دارند از طرفی ذرات متحرک مثلاً الکترون‌ها نیز رفتار موجی دارند. در این مباحث از واژه‌های کلاسیک امواج الکترومغناطیس و پرتوهای ذره‌ای باردار و بدون بار استفاده می‌کنیم. این پرتوها چنانچه مستقیم یا غیرمستقیم تولید بار نمایند، پرتوهای یونساز نامیده می‌شوند. پرتوهای یونساز نه به دلیل استفاده گسترده در پزشکی، صنعت و موارد دیگر بلکه به دلیل سرطانزایی و اثرات سوء بیولوژیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. پرتوهای یونساز به فرم‌های معمول شامل پرتوی ایکس و پرتوی گاما (امواج الکترومغناطیس پُرانرژی) و پرتوهای ذره‌ای شامل پرتوهای بتا، آلفا، نوترون و ... می‌باشند.

طول موج λ امواج الکترومغناطیس از تقسیم سرعت موج بر فرکانس بدست می‌آید. فاصله بین دو قله موج، طول موج (λ) و تعداد امواج عبوری در ثانیه فرکانس (f) نام دارد که با هرتز (Hz) اندازه‌گیری می‌شود. سرعت موج (v) تابع فرکانس، انرژی موج و جنس محیطی عبور پرتو است. البته سرعت امواج الکترومغناطیس در خلاء، مستقل از فرکانس و مقدار ثابت C است.

$$\lambda f = C = 3 \times 10^8$$

تعریف دوم تابش الکترومغناطیس از مکانیک کوانتوم منشاء می‌گیرد و گفته می‌شود یک موج الکترومغناطیس شبیه تعداد زیادی فتون است. به تجربه ثابت شده انرژی فتون یا شبه ذره متناسب با فرکانس موج الکترومغناطیس است. بنابراین امواج با طول موج کوتاه دارای فرکانس و انرژی بیشتری هستند.

$$E = hf \quad (h=6.64 \times 10^{-34} \text{ J/s})$$

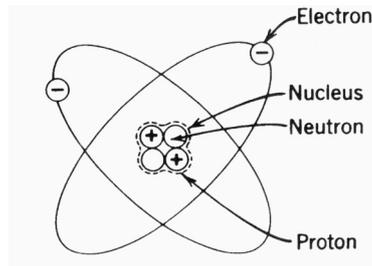
رابطه انرژی بر حسب keV و طول موج فوتون بر حسب انگستروم به صورت زیر است:

$$E(keV) = \frac{12.4}{\lambda(A^{\circ})}$$

واحد انرژی پرتوی یونساز الکترون ولت (eV) است. یک الکترون ولت، انرژی الکترون هنگام عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت و معادل 1.6×10^{-19} ارگ (erg) است. شدت یک پرتو اشاره به مقدار انرژی عبوری از واحد سطح در واحد زمان دارد و معمولاً بر حسب ارگ بر سانتیمتر مربع در ثانیه است. در حفاظت از پرتو، واحد پرتو، بر مبنای انرژی جذب شده از پرتوهای یونساز در ماده بخصوص مثلاً بافت انسان یعنی دُز تعریف و با اندازه گیری مستقیم تعیین می شود. تعریف دُز به مفهوم یونسازی در اتم و مولکولها مربوط می شود. قبل از تعریف دُز مرور مختصری بر تعاریف اتم و یونها می شود.

اتم و یونها

بر اساس نظریه بوهر، هر اتم متشکل از یک هسته حاوی یک یا چند پروتون و نوترون و ابری از الکترونها است. الکترونها توسط نیروی الکتریکی پروتونها در اطراف هسته مهار و در نتیجه بار الکتریکی اتم خنثی است. هنگامی که اتمها به طور شیمیایی با هم ترکیب شوند، مولکول تولید می شود و معمولاً تعداد الکترون مشابه پروتون است بنابراین مولکول نیز از نظر الکتریکی خنثی است. الکترون سبکترین بخش اتم و نیروی بستگی به هسته آن بسیار ضعیف تر از وابستگی پروتونها و نوترونهای داخل هسته است. روشهای فیزیکی متعددی برای خروج الکترون از اتم وجود دارد، که حاصل آن تولید یون مثبت است. الکترون آزاد شده نیز با اتصال به اتمهای دیگر تولید یون منفی می کند.



شکل ۱- ساختمان اتم هلیوم. الکترونها هریک دارای بار منفی و در ابر الکترونی دور هسته می چرخند. هر پروتون دارای بار مساوی الکترون ولی مثبت است. تعداد پروتونها (Z) عدد اتمی نامیده می شود و تعیین کننده خواص شیمیایی اتم است. اتمها در حالت طبیعی بدون بار و خنثی هستند. تعداد الکترونهای بیرون هسته مساوی تعداد پروتونهای داخل هسته است. تعداد پروتونها به اضافه نوترونها مساوی عدد جرمی (A) است. ایزوتوپهای هر عنصر دارای تعداد پروتون مساوی ولی نوترون متفاوتند.

بنابراین یون یک اتم یا مولکولی است که دارای کمبود یا زیادی الکترون است. یون از نظر شیمیایی ممکن است ناپایدار باشد و با سایر اتم‌ها یا مولکول‌ها ترکیب شده موجب تغییر عملکرد آن‌ها شود.

واحدهای پرتوهای یونساز

انرژی جذب شده در بافت (دُز پرتو)، عامل مهمی در احتمال بروز و شدت اثرات بیولوژیک پرتو است. در صورت اطلاع از میزان پرتوی ورودی بیمار، دُز جذبی قابل اندازه‌گیری است. در تخمین خطرات واقعی، دو عامل مهم دیگر، یعنی اثرات بیولوژیک نسبی پرتو و حساسیت بافت نیز با اهمیت است.

واحد پرتوتابی Exposure unite

خسارات ناشی از منابع خارجی برحسب پرتوهای اندازه‌گیری می‌شود. پرتوهای توانایی پرتوهای ایکس یا گاما در یونسازی هواست. رونتگن (R) واحد پرتوهای در سیستم قدیمی و برابر است با مقدار پرتوی ایکس یا گاما که در هر سانتیمترمکعب هوا در شرایط استاندارد یک استات کولن بار از هر نوع تولید کند. در تعریف دیگر یک رنتگن برابر با پرتوهای ایکس یا گاما است که در یک کیلوگرم هوا $2/54 \times 10^{-4}$ کولن بار از هر نوع تولید کند. واحد پرتوهای در سیستم SI که با XU نشان داده می‌شود، مقدار پرتوی ایکس یا گاما است که در هر کیلوگرم هوا یک کولن بار از هر نوع تولید کند. بنابراین: هر XU مساوی ۳۸۷۶ رنتگن است. یک رونتگن تقریباً معادل جذب ۸۶ ارگ انرژی پرتوهای یونساز در یک گرم هوای خشک یا معادل دُز جذبی ۰/۸۶ راد است.

دُز پرتو

دُز پرتو یا به عبارت دقیقتر دُز جذبی پرتوهای یونساز، مقدار کل انرژی پرتو جذبی در واحد جرم ماده است. واحد قدیمی آن راد Rad (حروف اول Radiation Absorbtion Dose) می‌باشد. یک راد برابر با ۱۰۰ erg جذب شده در یک گرم ماده یا بافت است. با معلوم بودن مقدار انرژی جذب شده برحسب erg/g واز تقسیم آن به ۱۰۰ دُز جذبی راد به دست می‌آید (یعنی، $1 \text{ Rad} = 100 \text{ erg/g}$).

در سیستم SI واحد گری (Gy)، جایگزین راد می‌شود. یک گری معادل ۱۰۰ راد، یا هر راد مساوی یک سانتی‌گری است. یک گری انرژی جذب شده یک ژول از پرتوهای یونساز در هر کیلوگرم ماده است.

سرعت دُز پرتو:

مقدار انرژی جذب شده در واحد زمان در واحد جرم بافت سرعت دُز می‌باشد. یکای آن ممکن است به حسب راد یا (mGy) در دقیقه، راد یا (cGy) در ساعت یا واحدهای نظیر بیان شود.

هنگام مقایسه خطرات پرتو، نوع پرتو بسیار مؤثر است. این مطلب توسط NCRP در تعریف واژه جدید دُز معادل مطرح شده است. NRC هنوز واژه قدیمی معادل دُز را که قدری متفاوت است و در زیر توضیح داده می‌شود، به کار می‌برد.

دُز معادل

اثرات بیولوژیک در واحد دُز جذبی بافت، تابع نوع پرتو است (اشعه X و γ در برابر ذرات پروتون و آلفا). بنابراین ضریب وزنی W_R برای هر نوع پرتو بر مبنای این اختلافات تعریف می‌شود. دُز جذبی در ضریب وزنی پرتو، دُز معادل نامیده می‌شود. برای تشخیص آن از دُز جذبی، واحد آن در سیستم قدیمی رم (rem) و در سیستم جدید SI سیورت (Sivert) نامیده و با حرف H نشان داده می‌شود:

$$(1-1) \quad H = W_R \times D \quad (\text{راد یا گری}) \quad (\text{رم یا سیورت})$$

برای پرتوهای مورد استفاده در رادیولوژی و پزشکی هسته‌ای (پرتوهای X و γ ، الکترون و پوزیترون) W_R مساوی یک است. بنابراین، دُز (D) و دُز معادل (H) دارای مقادیر مشابه ولی واحدهای متفاوت راد و رم (گری و سیورت) می‌باشند. برای ذرات نوترون و آلفا، W_R دارای مقادیر بیشتر (۵ تا ۲۰) می‌باشند.

جدول ۱-۱- ضرایب وزنی یا ضریب کیفی پرتوها

نوع پرتو	گستره انرژی پرتو	ضریب وزنی پرتو W_R
فوتون (ایکس ، گاما)	تمام انرژیها	۱
الکترون و مایون	تمام انرژیها	۱
نوترون	انرژی کمتر از ۱۰ keV	۵
نوترون	انرژی بین ۱۰ تا ۱۰۰ keV	۱۰
نوترون	انرژی بیش از ۱۰۰ keV تا ۲ MeV	۲۰
نوترون	انرژی ۲ تا ۲۰ MeV	۱۰
نوترون	انرژی بیش از ۲۰ MeV	۵
پروتون	بجز پروتونهای برگشتی با انرژی بیش از ۲ MeV	۵
ذرات آلفا	پاره‌های شکافت، هسته‌های سنگین	۲۰

معادل دُز

در قوانین NRC از معادل دُز استفاده می‌شود که با معادله‌ای مشابه معادله (۱) تعریف می‌شود ولی به جای ضریب وزنی پرتو (W_R) از ضریب کیفی پرتو (Q_R) استفاده می‌شود. برای پرتوهای مورد استفاده پزشکی هسته‌ای، Q_R نیز یک است. ولی دُز در تعریف دُز معادل، متوسط دُز در یک بافت منظور می‌شود، در حالی که برای محاسبه معادل دُز، دُز یک نقطه در بافت در نظر گرفته می‌شود.

دُز مؤثر، معادل دُز مؤثر

تخمین ریسک مربوط به تابش‌دهی یکنواخت به کل بدن است؛ بنابراین ریسک تابش‌دهی بخشی از بدن یا تابش‌دهی غیرهموزن باید به‌طور مقتضی محاسبه شود. برای این منظور ضریب وزنی بافت، مورد استفاده قرار می‌گیرد که تفاوت حساسیت بافت‌های مختلف به پرتو (روی سن و جنس یک جمعیت متوسط‌گیری می‌شود) را نشان می‌دهد. ضرایب بافت پیشنهادی NCRP در جدول (۱-۲) آورده شده است. مقررات NRC هنوز ضرایب وزنی قدیمی را به‌کار می‌برد، این ضرایب نیز در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ - ضرایب وزنی بافت، W_T ، برای بافت و اندام‌های مختلف بر طبق مقررات NCRP و NRC

اندام	گزارش ۱۱۶ NCRP	NRC
گنادها	۰/۲	۰/۲۵
مغز استخوان قرمز	۰/۱۲	۰/۱۲
کولون	—	۰/۱۲
ریه	۰/۱۲	۰/۱۲
معدده	—	۰/۱۲
مثانه	—	۰/۰۵
پستان	۰/۱۵	۰/۰۵
تیروئید	۰/۰۳	۰/۰۵
پوست	۰/۰۱	۰/۰۱
بقیه بافتها	۰/۰۳	۰/۰۵

با استفاده از ضرایب وزنی بافت NRCP، دُز مؤثر E، برای شرایطی معلوم (پرتودهی) به دست می‌آید. با این حال، با استفاده از ضرایب وزنی بافت NRC معادل دُز مؤثر یا (ede) تعیین می‌شود. دُزهای مؤثر یا (edes) برای مقایسه خطرات ناشی از پرتودهی در شرایط مختلف نظیر پرتودهی از اشعه زمینه در برابر پرتودهی از روش‌های پزشکی به جامعه است. پرتودهی با دُز مؤثر بالاتر باعث خطرات نسبتاً بیشتری می‌گردد. معادل دُز مؤثر یا ede، در موردی که ضرایب وزنی بافت NRC استفاده می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود: که از جمع روی تمام اندام‌های تابش دیده T به دست می‌آید.

$$E = \sum W_T \cdot H_T \quad (1-2)$$

واحد دیگر یکای نفر-سیورت است که برای توصیف جمعیت تابش دیده، است و دُز جمعی نامیده می‌شود. برای مثال، ۵۰۰۰ نفر که سالانه ۳ mSv دُز زمینه دریافت کنند دارای دُز جمعی ۱۵ نفر-سیورت هستند.

رادایواکتیویته

اتم‌ها با عدداً اتمی مشترک (Z) و تعداد نوترون‌های متفاوت به عنوان ایزوتوپ‌های عنصر Z شناخته می‌شوند. سیستم‌های نمایه‌گذاری متعددی برای تشخیص ایزوتوپ‌ها ابداع شده است. یکی از آن‌ها، نام عنصر با علامت شیمیایی را به همراه عددجرمی که معادل مجموع پروتون و نوترون است نشان می‌دهد. برای مثال عمده‌ترین ایزوتوپ اورانیوم طبیعی یعنی اورانیوم-۲۳۸ که شامل ۹۲ پروتون و ۱۴۶ نوترون است به صورت U-238 نمایش داده می‌شود و یا در روش دوم عدد جرمی و عدد اتمی قبل از عنصر نمایش داده می‌شود مثلاً اورانیوم قابل شکافت به صورت ${}_{92}^{235}U$ نمایش داده می‌شود که شامل ۹۲ پروتون و ۱۴۳ نوترون است. به همین ترتیب هیدروژن 1_1H ، دوتریم 2_1H و تریوم 3_1H همگی دارای عدد اتمی مشابه و تعداد نوترون متفاوت و همه اعضای خانواده هیدروژن هستند. اکسیژن ۶ ایزوتوپ و قلع حداقل ۲۳ ایزوتوپ شناخته شده دارند. خواص شیمیایی همه ایزوتوپ‌های یک عنصر مشابه، و خواص هسته‌ای آن‌ها ممکن است متفاوت باشد.

هرچند بسیاری از ایزوتوپ‌های عناصر مختلف ذاتاً پایدارند، اما تعداد زیادی نیز در شرایط پراثری و دارای نسبت ناپایدار N/Z هستند که رادایواکتیو نامیده می‌شوند. رادیونوکلوئید، ایزوتوپ رادایواکتیو یک عنصر است. هسته‌های یک اتم رادایواکتیو دستخوش یک تغییر داخلی شده، سعی می‌کنند دیر یا زود این عدم تعادل را با واپاشی رادایواکتیو یعنی انتشار فتون

یا ذره پرنرژی و تولید هسته دختر جدید اصلاح کنند. بنابراین، رادیواکتیویته، ویژگی هسته‌های خصوصی است که به‌طور خودکار با تغییر تعداد پروتون یا نوترون و معمولاً با انتشار انرژی تغییر وضعیت می‌دهند.

فراوانترین پرتوهای منتشره از مواد رادیواکتیو به ترتیب، پرتوهای گاما، پرتو یا ذرات بتا و آلفاست. از این پرتوها، گاما بیش از همه سبب نگرانی می‌شود زیرا اولاً فراوانتر است به دلیل اینکه هسته‌های آلفا و بتا نیز معمولاً اشعه گاما منتشر می‌کنند در ثانی قدرت نفوذ آن از بدن و هر حفاظی بیش از دیگر پرتوهاست. پرتوهای ایکس و گاما هر دو فتون‌های پرنرژیند و فقط در چگونگی تولید با یکدیگر متفاوتند. پرتوی ایکس از انتقال یا شتاب الکترون‌ها در اتم ناشی می‌شود، در حالی که اشعه گاما از تبدیلات هسته‌ای و پدیده‌هایی نظیر نابودی پوزیترون-الکترون تولید می‌شود.

اگر پس از یک واپاشی، هسته دختر خودش رادیواکتیو باشد، واپاشی‌های مضاعف رخ می‌دهد. برای مثال در سری U-238، اورانیوم به‌طور خودکار تجزیه شده، Th-234 بوجود می‌آید که خود مجدداً تجزیه شده پس از تابش، Pa-234 تولید می‌شود.

به سهولت می‌توان به رادیونوکلئیدهای طبیعی یا مصنوعی دسترسی پیدا نمود. برخی رادیونوکلئیدهای طبیعی نظیر K-40، Pb-87، Th-232 و U-238 از پیدایش زمین وجود داشته که ازلی نامیده می‌شوند. اورانیوم ۲۳۸ منشاء تولید یک سری کامل هسته‌های رادیواکتیو ازلی است. بعضی رادیونوکلئیدهای طبیعی نظیر C-14 دارای منشاء کیهانی هستند زیرا از بمباران اتم‌ها در لایه‌های بالای جو توسط تابش‌های کیهانی بوجود می‌آیند.

منابع تولید رادیونوکلئیدهای مصنوعی، رآکتورهای هسته‌ای، انفجارات هسته‌ای، شتاب دهنده-ها و بمباران نوترونی است. در بمباران نوترونی، مواد با روش اکتیواسیون که هسته، یک نوترون را جذب می‌نماید، رادیواکتیو می‌شوند و یا با جذب نوترون فرآیند شکافت هسته‌ای رخ داده، که هسته به دو یا چند پاره تقسیم می‌شود. یک شتاب دهنده نظیر سیکلوترون ممکن است، پروتون‌ها یا بعضی هسته‌های سریع را به‌طرف یک هدف پرتاب کرده، از طریق اکتیواسیون موجب رادیواکتیو شدن مواد شوند. همچنین اگر ماده‌ای در معرض تابش نوترون یک چشمه نوترون‌زا نظیر Cf-252 قرار گیرد، در صورت جذب نوترون، رادیوایزوتوپ تولید می‌شود.

بعضی ایزوتوپ‌های سنگین نظیر U-235 و Pu-238 هسته‌هایی دارند که طی فرآیند اکتیواسیون، با جذب نوترون بلافاصله شکافته شده، دو هسته جدید تولید می‌شود. هر یک از دو پاره، رادیواکتیو بوده و تقریباً دارای نیمی از جرم هسته ابتدایی هستند. از هر شکافت، تعدادی نوترون و مقدار قابل توجهی انرژی آزاد می‌شود. در صورت مساعد بودن شرایط، نوترون‌های آزاد

شده به نوبه خود، باعث شکافت‌های مضاعف شده، واکنش‌های زنجیره‌ای آغاز می‌شود. این فرآیند اساس عملکرد نیروگاه و انفجارات هسته‌ای است.

همچنین رادیونوکلوئیدها به عنوان ردیاب در بسیاری از کاربردهای پزشکی، صنعت و تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال اتصال یک رادیونوکلوئید به ماده پایدار، امکان مطالعه مسیر حرکت و تغییرات شیمیایی و فیزیکی ماده مورد تحقیق را فراهم می‌سازد. مزیت استفاده از رادیونوکلوئیدها، آشکارسازی پرتوهای منتشره است که در مقادیر بسیار اندک نیز میسر است.

اکتیویته و نیمه عمر

سرعت واپاشی یک نمونه رادیونوکلوئید که در زمان t اتفاق می‌افتد، به عنوان اکتیویته و معمولاً با A_t نشان داده می‌شود. اکتیویته یک نمونه با تعداد اتم‌های موجود در آن لحظه، N_t متناسب است. ثابت تناسب که برای هر رادیونوکلوئید منحصر به فرد است، ضریب تبدیل یا ثابت تجزیه λ نامیده می‌شود و تمایل ذاتی هستک داخل رادیونوکلوئید را برای واپاشی نشان می‌دهد. بنابراین اکتیویته N_t اتم در زمان t ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_t = \frac{dN_t}{dt} = \lambda N_t \quad (3a)$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3b)$$

اکتیویته با واحد قدیمی کوری (Ci) و واحد جدید، بکرل (Bq) اندازه‌گیری می‌شود. یک کوری $10^{10} \times 3.7$ تجزیه در ثانیه و یک بکرل ۱ تجزیه در ثانیه تعریف می‌شود. بنابراین هر کوری $10^{10} \times 3.7$ بکرل است. مبنای تاریخی کوری این فرض است که اکتیویته ۱ گرم رادیوم خالص تقریباً ۱ کوری است. هر پیکوکوری مساوی یک تریلیونم کوری (10^{-12} کوری) و یک نانوکوری 10^{-9} Ci (= nCi) است. برخی رادیونوکلوئیدها سم‌های شیمیایی نیز هستند و اگر اکتیویته در واحد جرم آن‌ها کم باشد، سمیت آن‌ها مهمتر می‌شود. برای مثال ^{238}U و ^{232}Th فلزات سنگینی هستند، که اکتیویته در واحد جرم ناچیز دارند. سرعت واپاشی رادیونوکلوئید معمولاً فقط با ضریب تبدیل مشخص نمی‌شود، بلکه با نیمه‌عمر رادیواکتیو یا فیزیکی نیز تعیین می‌شود. نیمه عمر مدتی است که نیمی از اتم‌های نمونه خالص رادیونوکلوئید، در جریان واپاشی تغییر می‌کنند. اگر یک رادیونوکلوئید به دختر پایدار تجزیه و در ابتدا ۱ Ci اکتیویته داشته باشد، پس از گذشت یک نیمه عمر، اکتیویته آن نیم کوری، پس از گذشت ۲ نیمه‌عمر یک چهارم کوری و پس از گذشت n نیمه‌عمر به $(\frac{1}{2})^n$ خواهد رسید. اگر دختر نیز رادیواکتیو باشد، در اکتیویته مجموع نمونه سهیم خواهد بود. محدوده نیمه عمرها کمتر از میکروثانیه تا بیلیون‌ها سال می‌باشد. اگر ثابت اکتیویته یک ماده نامعلوم باشد، با اندازه‌گیری‌های دوره‌ای و رسم

منحنی رادیواکتیویته نسبت به زمان نیمه عمر را می‌تواند تعیین نمود. اندازه‌گیری نیمه عمر معمولاً برای شناسایی یک رادیونوکلوئید خاص مفید است. با در نظر گرفتن معادله $3b$ و قرار دادن $T_{1/2}$ برای زمان t ، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda T_{1/2} = \ln(2) = 0.693 \quad (3c)$$

با استفاده از نیمه عمر فیزیکی می‌توان ثابت تجزیه λ را به دست آورد، بنابراین اکتیویته تابع زمان است. علاوه بر نیمه عمر فیزیکی، تعریف نیمه عمر بیولوژیکی نیز مهم است. این نیمه عمر، مدت زمانی است که یک بافت زنده، اندام یا یک فرد، طی فرایندهای بیولوژیکی نیمی از ماده دریافتی را از خود دفع می‌کند. بنابراین نیمه عمر مؤثر مدت زمانی است که در آن ماده رادیواکتیو موجود در بدن جانور به نصف مقدار اولیه کاهش یابد و این حاصل عمل مشترک واپاشی رادیواکتیو و حذف بیولوژیکی است. نیمه عمرهای مؤثر (eff)، فیزیکی (phys) و بیولوژیکی (bio) با معادله زیر بهم مرتبط می‌شوند:

$$\frac{1}{T_{1/2\text{ eff}}} = \frac{1}{T_{1/2\text{ phys}}} + \frac{1}{T_{1/2\text{ bio}}} \quad (3d)$$

انواع پرتوها

انواع متداول پرتوهای یونساز عبارتند از: پرتوهای ایکس، گاما، ذرات آلفا، بتا و نوترون. انواع و مشخصات پرتوهای منتشره از چند رادیونوکلوئید در جدول (۳-۱) نشان داده شده است. این پرتوها از هسته‌های رادیواکتیو ساطع می‌شوند به علاوه ذرات آلفا، هسته‌های اتم هلیوم هستند با ۲ پروتون و ۲ نوترون و بار الکتریکی مثبت. به دلیل سنگینی حتی انواع پرنرژی این پرتوها (چند Mev) به طور یکنواخت و به آرامی از میان ماده عبور و در مسیر خود، تولید یون‌های متعدد می‌کنند. بنابراین پرتوهای آلفا انرژی خود را به سرعت منتقل نموده، فقط ۳ تا ۵ سانتیمتر در هوا نفوذ می‌کنند. یک ورق کاغذ نازک می‌تواند ذرات آلفا را متوقف کند بنابراین به عنوان پرتوهای خارجی به ندرت خطرآفرین می‌شوند، زیرا قادر به نفوذ حتی از لایه خارجی پوست نمی‌باشند. رادیونوکلوئیدهای آلفا معمولاً به این دلیل که ممکن است از طریق بلعیدن، تنفس، تزریق یا زخم باز به بدن وارد شوند، خطرناکند. عناصر سنگین نظیر اورانیوم، سرب، پلوتونیوم و رادیوم انتشاردهنده‌های آلفا هستند. ذرات بتا معمولاً الکترون‌های پرنرژی هستند که حامل یک بار منفی بوده توسط رادیونوکلوئیدهای با عددجرمی کم منتشر می‌شوند. استرونتیوم-۹۰، $Cs-137$ ، $I-131$ مثال‌هایی از عناصر بتا هستند. ذرات بتا ممکن است حاوی پوزیترون باشند که ضد ذره الکترون بوده، برخلاف الکترون، بار مثبت دارد. فلئوئر-۱۸ یک نمونه رادیونوکلوئید پوزیترون دهنده است که در تصویربرداری توموگرافی پوزیترونی (positron emission tomography) استفاده گسترده دارد.

جدول ۳-۱- مواد رادیواکتیو معمول و میزان پرتوتابی مجاز آنها

رادیونوکلئید	نیمه عمر	نوع تابش	نوع استفاده	اکتیویته μCi	پرتوتابی در یکمتری $\mu R/hr$
C-14	۵۷۳۰ سال	بتا	پزشکی-باستانشناسی	۵۰	-
Cs-137	۳۰ سال	بتا-گاما	پزشکی	۱	۰/۳
Co-60	۵/۳ سال	بتا-گاما	پزشکی	۱	۱/۳
Au-198	۲/۷ روز	بتا-گاما	پزشکی	۱۰	۲/۳
H-3	۱۲/۳ سال	بتا	چند منظوره	۲۵۰	-
I-131	۸/۱ روز	بتا-گاما	پزشکی	۱۰	۲/۲
Ir-192	۲۷/۴ روز	بتا-گاما	پزشکی	۱۰	۴/۸
P-32	۱۴/۲ روز	بتا	پزشکی	۱۰	-
Po-210	۱۳۸ روز	آلفا	-	۰/۱	-
Ra-226	۱۶۲۰ سال	آلفا-بتا	پزشکی	۰/۱	۰/۰۸
Ag-111	۷/۵ روز	بتا-گاما	-	۱۰	۰/۲
Na-24	۰/۶۳ روز	بتا-گاما	-	۱۰	۱۸/۷
Sr-90	۲۸ سال	بتا	پزشکی	۰/۱	-
S-35	۸۷ روز	بتا	-	۵۰	-

منبع: انستیتو آموزشی حفاظت پرتو، گزارش شماره ۳۲، NCRPM و اشنگتن DC ۱۹۶۶ جدول ۲.

یونسازی ویژه ذرات بتا کمتر از آلفاست و انرژی خود را نسبتاً سریع از دست داده قدرت نفوذ متوسط دارند به طوری که توسط چند میلیمتر آلومینیوم متوقف می‌شوند. ذرات بتا از طریق تابش داخلی و خارجی منجر به آسیب بافت‌ها می‌شوند. یک ویژگی مهم ذرات بتا، این است که هنگام نفوذ در ماده طی فرایند برمشترالانگ تولید اشعه ایکس می‌کنند. بخصوص وقتی ذرات بتا در برخورد با حفاظ یا شیلد سریعاً متوقف شوند مثلاً در توقف با سرب، پرتوی ایکس تولید می‌شود. بنابراین برای حفاظت از اشعه بتا باید حفاظ مناسبی برای پرتوی بتا و ایکس‌های ثانویه در نظر گرفت. پرتوی ایکس و گاما هر دو فوتون هستند. این پرتوها نسبت به ذرات آلفا و بتا قدرت نفوذ بیشتری دارند، بنابراین یون‌های تولیدی نسبتاً پراکنده‌اند و برخلاف ذرات آلفا و بتا که با برد کوتاهی در بافت متوقف می‌شوند، پرتوهای ایکس و گاما با افزایش عمق بافت، تقریباً به صورت نمایی کاهش می‌یابند و در عبور از بافت، بخش زیادی از آنها ممکن است بطور کامل عبور کنند. با این وجود پرتوهای ایکس معمولاً توسط لایه سرب به ضخامت کمتر از یک اینچ حذف می‌شوند. نوترون‌ها بدون بارند و توسط نیروهای الکتریکی اجزای اتم واکنش نمی‌دهند، در نتیجه بسیار نفوذپذیرند. نوترون‌ها اصولاً از واکنش‌های هسته‌ای نظیر شکافت یا جوش

هسته‌ای تولید می‌شوند، اما رادیونوکلئیدهای مصنوعی نظیر $Cf-252$ نیز نوترون منتشر می‌کنند. نوترون‌ها معمولاً بر مبنای انرژی تقسیم بندی می‌شوند. نوترون‌های حرارتی دارای انرژی جنبشی اتم‌ها و مولکول‌های محیط یعنی حدود 0.025 eV هستند در نتیجه برای تشکیل نوکلئیدهای جدید توسط هسته‌ها، جذب می‌شوند. در حقیقت فعالسازی نوترونی، رایج‌ترین مکانیسم تولید هسته‌های رادیواکتیو است. نوترون‌های سریع، انرژی بیش از 1 MeV داشته، معمولاً با هسته‌های اتم برخورد الاستیک می‌کنند. از این طریق، نوترون‌ها انرژی خود را به هسته‌ها داده، آن‌ها را به ذرات پرانرژی تبدیل و یونساز ثانویه تولید می‌شود. نوترون‌ها می‌توانند سبب مشکلات مهمی در اطراف رآکتورهای هسته‌ای و شتاب دهنده‌ها شوند ولی به ندرت یک چشمه پرتوایی برای عموم مردم محسوب می‌شوند.

منشا تابش پرتوهای یونساز به انسان

تابش پرتوهای یونساز به بدن، توسط چشمه‌های خارج از بدن (تابش خارجی یا مستقیم) و یا نتیجه جذب مواد رادیواکتیو (تابش داخلی) در بدن رخ می‌دهد. برای عموم مردم، تابش پرتوهای طبیعی زمینه، مهمترین منبع تابش خارجی است. رایج‌ترین چشمه مصنوعی پرتوهای خارجی، دستگاه مولد ایکس است اما در برخی مواقع، مواد رادیواکتیو منتشرکننده پرتوهای گاما و ذرات بتا نیز می‌توانند نگران کننده باشند.

پرتوهای گاما و همین‌طور آلفا و بتای منتشره از مواد رادیواکتیوی که جذب بدن شده‌اند، خطرناکند. در حالی که بسیاری از پرتوهای گاما بدون برخورد از بدن خارج می‌شوند، ذرات آلفا و بتا فقط مسافت کوتاهی در بدن طی نموده، همه انرژی یونسازی خود را منتقل می‌کنند. این‌که کجا و چه مدت یک ماده رادیونوکلئید در بدن باقی می‌ماند، بسیار با اهمیت است. در حالی که رادیونوکلئیدهای پزشکی اکثراً سریع از بدن دفع می‌شوند، ^{131}I در تیروئید متمرکز شده، موجب خطر سرطان تیروئید می‌شود. خوشبختانه نیمه عمر فیزیکی این ماده $8/14$ روز است. رادیوم- 226 ، $Sr-90$ و $Ra-228$ همگی مایلند جذب استخوان شده برای مدت طولانی‌تری از آنجا تابش کنند که این امر سبب افزایش خطر سرطان استخوان و لوسمی می‌شود.

تابش‌گیری داخلی ناشی از تنفس، بلعیدن، تماس پوستی و تزریق رادیونوکلئیدهاست. رادون طبیعی رایج‌ترین چشمه تابش‌گیری ریه است که گاز حاصل از تجزیه اورانیوم، توریوم و رادیوم طبیعی خاک است و می‌تواند به زیرزمین منازل نفوذ کند. ^{220}Rn و ^{222}Rn دارای زنجیره‌های طولانی رادیونوکلئیدهای دخترند که به ذرات گرد و غبار متصل شده درون ریه جای می‌گیرند و منشا صدمات اولیه می‌شوند. مطالعات همه‌گیرشناسی، برای نمونه فراوانی سرطان ریه را در میان کارگران معدن اورانیوم نشان داده است. تابش‌گیری داخلی ناشی از بلعیدن، ممکن است به خاطر رادیونوکلئیدهای موجود در آب یا غذا باشد. برای مثال، برخی جوامع در آب شرب خود

مقدار زیادی رادیوم طبیعی دارند. آژانس حفاظت محیط آمریکا (EPA) استاندارد میزان رادیواکتیویته آب نوشیدنی را $15pCi/L$ برای رادیواکتیویته آلفا، $5pCi/L$ برای رادیوم و حد $226Ra$ و ^{40}K و $4mrem/yr$ برای رادیواکتیویته مصنوعی گاما و بتا تعیین کرده است. اورانیوم، ^{40}K و $226Ra$ به طور طبیعی در خاک و کود موجودند بنابراین در غذاهای مصرفی مردم و حیوانات یافت می-شوند.

تزیق و تماس پوست رادیونوکلئیدها معمولاً در پرتوگیری داخلی نقش کمتری دارند. برای کاهش دُز جذبی، رادیونوکلئیدهای تزریقی که معمولاً برای تشخیص یا درمان استفاده می-شوند دارای نیمه عمر مؤثر کوتاه هستند. تکنسیوم-99m که بار اصلی را در مرکز پزشکی هسته‌ای بر دوش می-کشد، نیمه عمر ۶ ساعت دارد. جذب زیرپوستی رادیونوکلئیدها معمولاً مشابه تماس پوستی قابل اغماض است. بخصوص اگر بلافاصله شسته شود. به علاوه به جز آب دارای تریتیوم (آبی که یکی از اتم های هیدروژن آن تریتیوم است) همه دُزها معمولاً به پوست محدود می-شوند.

منابع پرتوتابی

مهمترین چشمه‌های پرتوتابی عبارت است از: پرتوهای طبیعی زمینه، بارش‌های رادیواکتیو ناشی از آزمایشات هسته‌ای یا استفاده از ابزارهای هسته‌ای، پرتوهای حاصل از مولدهای پرتوی ایکس و رادیونوکلئید مصرفی در تشخیص و درمان پزشکی، پرتوهای ناشی از منابع صنعتی و دیگر مواد رادیواکتیو مصنوعی. برای کمک به درک بیشتر دُز پرتوها، برخی پرتوها که ممکن است افراد در معرض آن‌ها قرار گیرند، در جدول (۴-۱) آورده شده است. با یک حساب سرانگشتی، متوسط دُز زمینه در آمریکا حدود $3mSv$ در سال است که $2mSv$ آن ناشی از گاز رادون داخل منازل است، این عدد می‌تواند بسته به محل جغرافیایی باضریب ۲ یا بیشتر تغییر کنند. به طور متوسط تابش‌های پزشکی و محصولات پرتوزای مصرفی $0.6mSv$ به دُز زمینه اضافه می‌کنند.

پرتوتابی طبیعی زمینه: منابع طبیعی پرتوهای یونساز، عامل اصلی دُز پرتوگیری عموم مردم است. به طور متوسط حدود ۸۰ درصد دُز پرتوگیری افراد نتیجه منابع طبیعی است (به جز پرتوهای ناشی از تنباکوی سیگار). چشمه‌های اصلی پرتوهای زمینه گاز رادون، پتاسیم، رادیوم و پرتوهای کیهانی است. مهمترین منبع پرتوهای طبیعی، تنفس رادون و محصولات ناشی از واپاشی آن است. همانطور که خاطر نشان شد، بیش از نیمی از پرتوهای طبیعی، یا به طور متوسط حدود $2mSv$ ، ناشی از گاز رادون برآورد شده است. اکنون بررسی میزان گاز رادون منازل به یک کار معمول تبدیل شده است. در صورتی که غلظت رادون در هوا بیش از $0.15 Bq$ ($4pCi$) در لیتر باشد، EPA انجام عملیات مداخله را توصیه نموده است. زیرا رادون پرتو آلفا

منتشر می‌کند که علی‌رغم قدرت نفوذ ناچیز ولی از طریق تنفس وارد ریه می‌شود. درون ریه گاز رادون و محصولات دختر آن مستقیماً بافت ریه را مورد تابش قرار می‌دهند. مقدار زیاد گاز رادون مثل آنچه که در کارگران معدن اورانیوم یافت شده، علت افزایش سرطان ریه به‌شمار می‌آید. برای تخمین خطرات احتمالی ناشی از سطوح پایین پرتوتابی معمولاً مطالعات سطوح بالای پرتوتابی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پتاسیم و رادیوم، دو رادیونوکلوئید طبیعی دیگری است که در میانگین پرتوتابی تاثیر بسزایی دارند. ایزوتوپ طبیعی ^{40}K پرتوی بتا و گاما منتشر می‌کند. دُز سالانه ناشی از آن حدود $0/15$ تا $0/19$ میلی سیورت است. از آنجایی که پتاسیم ماده غذایی مهمی است و هیچ راه طبیعی برای جدا سازی ایزوتوپ‌های آن وجود ندارد، تابش‌گیری مقدار کمی ^{40}K اجتناب‌ناپذیر است.

جدول ۴-۱- تعدادی از چشمه‌های تابش که ممکن است در معرض آن‌ها قرار گیریم

چشمه	دُز
تابش‌های کیهانی	۳۰-۱۰۰ میلی‌رم در سال
مواد رادیواکتیو موجود در آب، هوا و خاک ^a	۳۶-۱۱۰ میلی‌رم در سال
محیط طبیعی دنور <i>Denver</i>	۵۱۰ میلی‌رم در سال با تابش‌های کیهانی
محیط طبیعی سانفرانسیسکو	۱۴۵ میلی‌رم در سال با تابش‌های کیهانی
سیستم بازرسی چمدان‌های فرودگاه	^b ۲/۱ میلی‌رم در سال
رادون موجود در هوا و آب چاه	۲۰۰-۲۴۰۰ میلی‌رم در سال
گاز طبیعی برای مصرف پختن	^b ۵ میلی‌رم در سال
گاز طبیعی برای گرم کردن	^b ۲۲ میلی‌رم در سال
ساعت‌های رادیولومینسانس	^b ۴۰-۱۰۴ میلی‌رم در سال
آشکار ساز دود، گاز و ذرات معلق	^b ۸ میلی‌رم در سال
پرتوی ایکس پزشکی و دندان‌پزشکی ^c	۲۰-۵۰۰ میلی‌رم در سال
مواد رادیواکتیو آجر، سنگ و بلوک بتن ^d	۸-۱۳ میلی‌رم در سال
کشیدن سیگار ^b	۸۰۰۰-۱۶۰۰۰ میلی‌رم در سال
دیگر منابع مصنوعی ^e	۱۰ میلی‌رم در سال

a پرتودهی با ارتفاع از سطح دریا و با عرض جغرافیایی، نوع خاک و سنگ قدری تغییر می‌کند، منبع اصلی تابش زمینه، پرتوهای کیهانی و پتاسیم-۴۰، توریوم، اورانیوم، رادیوم و محصولات واپاشی آن، یعنی رادون است

b گزارش ۹۵ *Bethesda MD NRCP* جدول ۵،۱ صفحه ۶۵ دُز معادل سالانه

c ممکن است به خاطر ضعف تجهیزات یا مهارت یا موارد پزشکی افزایش یابد

d ممکن است به دلیل رادیونوکلوئید موجود در مواد ترکیبی تغییر کند

e اثرات بهداشتی پرتوهای کم مقدار را ببینید. رابط علوم و بهداشت آمریکا، نیویورک، مارس ۱۹۸۹، که شامل محصولات مصرفی و توزیع مجددی که توسط انسان انجام شده است، شامل رادیواکتیو موجود در دود نیروگاه‌های زغالی یا گرد و غبار کودهای غنی از فسفر و غیره

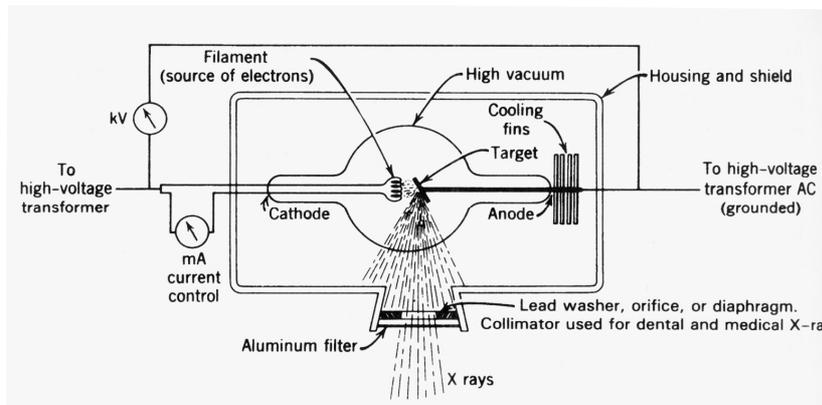
به دلیل قدرت نفوذ بسیار زیاد پرتوهای ^{40}K ، توده‌ای از پتاسیم می‌تواند از طریق تابش خارجی در دُز افراد مؤثر باشد. رادیوم نیز ماده رادیواکتیو طبیعی است و در صورت بلعیدن در بافت استخوان جمع می‌شود. میانگین دُز سالانه آن حدود 0.17 mSv است اما در بعضی مناطق جغرافیایی می‌تواند بیشتر شود. برای مثال آب شرب بعضی مناطق حاوی غلظت بالای رادیوم است.

پرتوهای کیهانی، پرتوهایی هستند که از کهکشان‌ها منشأ می‌گیرند. دُز ناشی از پرتوهای کیهانی در سطح دریا حدود 0.3 mSv در سال است. اما چون اتمسفر زمین پرتوهای کیهانی را جذب می‌کند، دُز این پرتو کاملاً به ارتفاع از سطح دریا وابسته است. برای مثال در فلات کلرادو دُز سالانه بین 0.5 تا یک میلی‌سیورت است و پرواز در ارتفاع 40 هزار فوت سبب افزایش دُز به 15 تا 20 میلی‌سیورت در سال می‌شود. دُز جذبی یک سفر هوایی بر فراز قاره آمریکا (حدود 10 ساعت در ارتفاع 40 هزار فوت) فقط 0.17 تا 0.23 میلی‌سیورت است. منابع طبیعی و مصنوعی تابش‌های یونساز در فصل ۳ به تفصیل توضیح داده شده است.

دستگاه و تجهیزات اشعه ایکس

پرتوهای ایکس بطور گسترده در تجهیزات تشخیصی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پرتوهای ایکس توسط دستگاه‌های دندانپزشکی، رادیوگرافی ثابت و متحرک، ماموگرافی، فلورسکپی، اسکنرهای CT، دستگاه‌های رادیوتراپی، ایستگاه‌های بازرسی فرودگاه، وسایل پراکنده سنجی ایکس، کاربردهای صنعتی و ضخامت سنجی و دیگر وسایل تشخیصی تولید می‌شود. بطور متوسط دُز سالانه پرتوهای ایکس پزشکی تقریباً 0.4 mSv است. هر دستگاه مولد پرتوی ایکس یک شتابدهنده ذره است که در آن الکترون‌ها از یک فیلامان داغ درون تیوب اشعه ایکس جدا شده در اثر اختلاف پتانسیل زیاد در لامپ خلاء به قسمت هدف آند برخورد می‌کند الکترون‌ها در لایه‌های سطحی هدف داخل شده، در اثر برخورد با هسته‌ها و الکترون‌های داخل هدف به سرعت گُند و از مسیر خود منحرف می‌شوند. چنانچه یک ذره باردار سریعاً افزایش یا کاهش شتاب پیدا کند، پرتوهای الکترومغناطیس منتشر خواهد کرد. در حقیقت این امر، مشابه حرکت رفت و برگشت سریع الکترون‌ها در یک آنتن است که منجر به تولید امواج رادیویی می‌شود. همین اتفاق در دستگاه‌های اشعه ایکس نیز رخ می‌دهد. هر زمان یک الکترون ناگهانی کاهش شتاب یا تغییر مسیر دهد، قسمتی یا همه انرژی جنبشی آن به انرژی اشعه ایکس تبدیل می‌شود. اگر الکترون در اثر یک برخورد بطور ناگهانی متوقف شود تمام انرژی آن به فوتونی پرنانرژی و با طول موج کوتاه تبدیل می‌شود و اگر الکترون برخورد ضعیف داشته باشد،

فوتون با طول موج بلندتر و انرژی کمتر تولید می‌شود. بنابراین، پرتوهای ایکس تیوب اشعه ایکس که پرتوهای ایکس ترمزی نامیده می‌شوند، دارای طیف وسیعی از انرژی می‌باشند. انتشار پرتوی ایکس طی فرایند مهم دیگری نیز امکان پذیر است. اشعه ایکس مشخصه، زمانی تولید می‌شود که برخی حوادث منجر به تغییر آرایش الکترون مدارهای داخلی یک اتم سنگین شوند. در تولید پرتوهای ایکس ترمزی و ایکس مشخصه اساساً هر دو فرایند اتمی است در حالی- که پرتوی گاما از برانگیختگی هسته تولید می‌شود. تنگستن به دلیل نقطه ذوب و عدد اتمی بالا معمولاً به عنوان جنس هدف در تیوب اشعه ایکس و شتابدهنده خطی مورد استفاده قرار می-گیرد (راندمان تولید پرتوی ایکس ترمزی تنگستن زیاد است). مولیبدن به دلیل انرژی ایکس مشخصه در آندهای تیوب ماموگرافی استفاده می‌شود. شدت و کمیت اشعه ایکس معمولاً برحسب جریان الکتریکی بین فیلامان و هدف داخل تیوب اشعه ایکس بیان می‌شود. انرژی در دستگاه های تشخیصی با واحد هزارولت یا کیلوولت (kV) اندازه گیری می‌شود.



شکل ۲-۱- لامپ اشعه ایکس، دستگاه‌های اشعه ایکس تشخیصی، تولید تصویر می‌کنند

با افزایش انرژی معمولاً قدرت نفوذ اشعه ایکس زیاد می‌شود و به همین دلیل ضخامت حفاظ بتن یا سرب یک مرکز براساس بیشترین انرژی پرتوهای ایکس تعیین می‌گردد. کمیت اشعه ایکس تیوب رادیولوژی با جریان درون تیوب متناسب است که با میلی آمپر (mA) سنجیده می-شود. بنابراین دُز یا انرژی جذب شده در یک جسم یا حفاظ، به کیلو ولت و میلی آمپر و عوامل دیگر بستگی دارد.

همانگونه که می‌دانیم، با عبور اشعه ایکس از یک جسم تصویر سایه آن روی فیلم یا صفحه فلورسانس ایجاد می‌شود. تصاویر رادیوگرافی (همچنین فلورسکپی و CT) توسط تضعیف متفاوت پرتو در بافت‌های مختلف بدن که دانسیته و عدد اتمی متفاوت دارند، تولید می‌شوند. در

تصاویر دندانپزشکی، سایه دندان مستقیماً روی فیلم ثبت می‌شود. در رادیوگرافی استاندارد، فیلم بین دو صفحه فلوروسنت داخل کاست قرار گرفته و نور این صفحات به فیلم تابیده می‌شود. در فلوروسکپی، تصویر اشعه ایکس خروجی از بدن بیمار که اندازه طبیعی دارد توسط لامپ مشدد تصویر (لامپ خلاء کاتدیک)، کوچک می‌شود (۲-۳ سانتیمتر)، این تصویر مرئی روی فیلم دوربین عکاسی یا دوربین تلویزیونی ضبط و سپس نمایش داده می‌شود.

دستگاه CT اسکن ترکیبی از مولد پرتوی ایکس و کامپیوتر است که به کمک تجهیزات کمکی تصاویر برش‌های بدن و در نتیجه تصاویر سه بعدی از اندام‌ها تولید می‌کند. در بسیاری از موارد، CT ها می‌توانند آنرمالی‌های داخل مجسمه و شکم را دقیق‌تر و واضح‌تر از رادیوگرافی ساده نشان دهند، برای مثال تومور، لخته خون و آنرمالی‌های آناتومیک را به‌گونه‌ای تشخیص می‌دهد که ضرورت جراحی‌های اکتشافی منتفی می‌شود.

اشعه ایکس همچنین محصول جانبی دستگاه‌هایی است که با ولتاژ بالا کار می‌کنند. این دستگاه‌ها شامل: تلویزیون با ولتاژ بالا، تلویزیون رنگی (البته توسط شیشه آن جذب می‌شود)، منابع قدرت و میکروسکوپ‌های الکترونی، تیوب‌های قوی مولد امواج میکروویو، کانال‌های انتقال دهنده امواج رادیویی، لامپ‌های یکسوکننده ولتاژ بالا و سایر دستگاه مولد پرتوهای الکترومغناطیس پرنفوذ است.

مواد رادیواکتیو در پزشکی:

مواد رادیواکتیو به طور وسیع در پزشکی استفاده می‌شوند. تقریباً یک سوم بیماران پذیرش شده در بیمارستان‌های آمریکا از روش‌های تشخیصی درمانی رادیوایزوتوپی استفاده می‌کنند که بیش از ۱۰۰ میلیون آزمایش در سال می‌شود. اکثریت بیمارستان‌های بزرگ، دارای بخش پزشکی هسته‌ای هستند. به دلیل خطرات ناشی از چشمه‌های رادیواکتیو، روش‌های جابه‌جایی و شمارش آن‌ها در مکان‌های خاصی که محل نگهداری و به‌کارگیری مواد رادیواکتیو است، انجام می‌گیرد.

مواد رادیواکتیو مورد استفاده در سیستم‌های تشخیصی قادر به اخذ اطلاعات فیزیولوژیک از اندام‌های مختلف بدن هستند. قریب ۸۰ درصد از روش‌های تشخیصی پزشکی هسته‌ای توسط رادیوایزوتوپ ^{99m}Tc که اشعه گامای 140keV با نیمه عمر ۶ ساعت منتشر می‌کند، انجام می‌شود. ماده رادیواکتیو به‌کمک حامل اختصاصی یا یک ردیاب در اثر تزریق، بلعیدن یا استنشاق در یک عضو یا بخش فیزیولوژیک بدن متمرکز شده از آن محل اشعه گاما منتشر می‌کند. چگونگی انتشار اشعه گاما از مکان‌های مختلف بدن، توسط دوربین گاما تصویربرداری می‌شود، هر ناحیه‌ای که پرتوی زیاد یا کم منتشر کند، معرف شرایط فیزیولوژیک غیرطبیعی است.

درمان سرطان، بخشی از کاربردهای رادیوایزوتوپ‌هاست. پرتوهای منتشره توسط رادیونوکلئید-ها (معمولاً اشعه گاما) به تخریب غدد سرطانی کمک می‌کند. رادیوایزوتوپ‌های رایج برای درمان سرطان‌ها Co-60، Cs-137، Ir-192 و I-125 است.

تصویربرداری توموگرافی پوزیترونی (PET) فن‌آوری تولید تصاویری شبیه CT است ولی به‌جای عبور اشعه ایکس از بدن از روش انتشار پرتوی گاما از داخل بدن استفاده می‌کند. مقداری رادیوایزوتوپ پوزیترون دهنده به همراه حامل اختصاصی بافت یا رادیاب به بیمار تزریق تا در یک اندام خاص متمرکز شود. پوزیترون خروجی معمولاً کمتر از ۱ میلی‌متر جابه‌جا شده و جذب یک الکترون می‌شود، حاصل این جذب تولید یک جفت فوتون گاما ناشی از پدیده نابودی است که با انرژی ۰/۵۱۱ MeV در دو جهت مخالف منتشر می‌شود، این پرتوها توسط مدار همزمانی از پرتوهای گامای زمینه، تفکیک می‌شوند. تصاویر PET اطلاعات با ارزش آناتومیک (همانند CT) و فیزیولوژیک (مثل پزشکی هسته‌ای) در مراحل اولیه تشکیل تومور تولید می‌کنند که نه CT و نه دوربین گاما به تنهایی قادر به انجام آن نیستند.

مواد رادیواکتیو در صنعت

مواد رادیواکتیو در بسیاری از فرایندهای صنعتی استفاده می‌شوند. برای مثال برای تشخیص وجود نفت در حفاری چاه عمیق. زمین شناسان با روش هسته‌ای شناسایی چاه (well logging)، مواد موجود در چاه را به وسیله تابش مواد رادیواکتیو کشف می‌کنند. رادیوایزوتوپ‌ها همچنین برای استریل ابزار، برای یافتن معایب قسمت‌های بحرانی فولاد، جوشکاری اتومبیل و ساختمان‌های مدرن، برای اثبات اصالت آثار هنری گرانقیمت و جرم شناسی به کمک عناصر سمی بسیار کم مقدار، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعلاوه مواد رادیواکتیو برای تابش به مواد غذایی به منظور کشتن باکتری‌های مضر بکار می‌رود. مشابه روش الکتریسیته ساکن، رادیوایزوتوپ‌ها برای حذف گرد و غبار از روی فیلم و سی دی (که البته احتمال خطر آتش سوزی دارد) نیز استفاده می‌شود. رادیونوکلئیدهای مورد استفاده صنعت معمولاً ^{60}Co ، ^{147}Pr و ^{192}Ir هستند.

محصولات مصرفی

تعدادی از محصولات مصرفی، حاوی مواد رادیواکتیو هستند. رادیوم طبیعی سال‌ها در ساخت عقربه و صفحه ساعت شب‌نما، در قطب‌نما و سایر تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گرفته ولی به دلیل خطرات پرتوها (دُز سالانه تا 3mSv) این رادیوایزوتوپ‌ها با مواد رادیواکتیو کم خطر نظیر تریتیوم H-3 و پرومتیوم، جایگزین شده‌اند. مواد جدید باعث دُز کمتر از یک میکرو سیورت در سال می‌شوند. هرچند در مواردی رادیوم، مثل گذشته هنوز استفاده می‌شود.

از محصولات مصرفی دیگر آشکارساز دود (تشخیص حریق)، لعاب و روکش ظروف می‌باشد. بسیاری از آشکارسازهای دود حاوی حدود میکروکوری رادیونوکلوئید مصنوعی آمرسیوم هستند. (برخی مدل‌های جدید، آشکارساز فوتوالکتریک است که فاقد مواد رادیواکتیوند) دُز حاصله کمتر از 0.1 mSv است. برخی لعاب و پوشش‌های رنگی حاوی اورانیوم و توریوم است. برخی لعاب‌های اورانیومی بشقاب و ظروف سفالی می‌توانند هنگام صرف غذا 0.1 mSv h^{-1} تا 0.2 دُز-ریت ایجاد کنند. و بالاخره، تنباکو معمولاً حاوی دو رادیونوکلوئید طبیعی ^{210}Po و ^{210}Pb است. این نوکلئیدها هردو محصول تجزیه رادون طبیعی بوده تمایل به چسبیدن به برگ‌های گیاه تنباکو دارند. وقتی کسی سیگار می‌کشد، این رادیونوکلوئیدها وارد ریه‌ها شده دُز قابل توجهی در بافت ریه جذب می‌کنند بطوری‌که دُز معادل سیستم تنفسی بیش از 160 mSv در سال برآورد می‌شود. این مقدار حدود 13 mSv دُز مؤثر، یعنی تقریباً ۴ برابر میانگین دُز طبیعی زمینه است. امکان تقویت اثر سرطانزایی پرتوها و مواد شیمیایی در ریه و جاهای دیگر موضوع مورد علاقه رادیوبیولوژیست‌هاست.

انرژی هسته ای

از سال ۲۰۰۱، در ایالات متحده بیش از یکصد و در دنیا بیش از چهارصد نیروگاه هسته‌ای در حال فعالیت است. با وجود طراحی متفاوت رآکتورها، فرآیند و چشمه تابش آن‌ها مشابه است. فرآیند نیروگاه‌ها به ۳ دسته عمده تقسیم می‌شوند. (الف) تولید سوخت هسته‌ای، (ب) عملیات ماشین‌های قدرت و (ج) تعویض سوخت مصرفی. تولید سوخت هسته‌ای شامل استخراج و خردکردن سنگ اورانیوم است، که عملیاتی تابش‌زاست. بخصوص در معادن زیرزمینی مقدار رادون و مواد حاصل از تجزیه آن زیاد است در نتیجه کار در چنین معادنی، با افزایش شیوع سرطان ریه همراه است. به علاوه ضایعات معدن و پسمان‌های فرآیند خردسازی سنگ حاوی غلظت بیش از حد معمول مواد رادیواکتیو اورانیوم و رادیوم است که از طریق گرد و غبار یا مایعات مرحله تصفیه اورانیوم، باعث پرتوگیری می‌شوند. گاهی اوقات، ضایعات معدن به عنوان مصالح ساختمانی توسط اهالی محل مورد استفاده قرار می‌گیرد که سبب تابش‌گیری مستقیم و استنشاق رادون می‌شود.

عملیات نیروگاهی، هرچند عملاً روی عموم مردم تاثیر ندارد، اما اکثراً منجر به پرتوگیری کارگران نیروگاه می‌شود. البته به دلیل رعایت مقررات، تعداد کمی از کارگران این نیروگاه‌ها ممکن است حتی دُز مجاز 50 mSv در سال را دریافت کنند. برخی نشت‌های مایع یا هوای آلوده از نیروگاه هسته‌ای اجتناب ناپذیر است در نتیجه به‌طور دوره‌ای مانیتورینگ و حد مجاز توسط

قوانین کمیسیون مقررات هسته‌ای (NRC) تعیین می‌گردد. دُز جمعی یک رآکتور حدود ۳۷۰۰ نفر-سیورت در ۴۵ سال تخمین زده می‌شود که کمتر از ۰/۱ mrem برای هر فرد در سال است. پسمان‌های سوخت هسته‌ای دارای اکتیویته بسیار زیاد است لذا برای استفاده مجدد یا دفع، مورد پردازش قرار می‌گیرند. بازیافت سوخت مصرف شده (که از سال ۱۹۷۰ در ایالات متحده منسوخ شده) شامل جداسازی قسمت‌های باقی مانده اورانیوم (و شاید پلوتونیوم) تولیدی در نیروگاه هسته‌ای از سایر محصولات شکافت هسته‌ای است و به صورت سوخت در نیروگاه‌های دیگر بازسازی می‌شوند. پسمان‌های پرتوزای زیاد که مستقیماً یا از بازیافت پسمان‌های سوخت تولید می‌شود، باید به‌طور صحیح دفع تا از پرتوگیری مردم جلوگیری شود. یک نگرانی بسیار مهم در نیروگاه‌های هسته‌ای، امکان بلقوه پرتوگیری ناشی از حوادث هسته‌ای است. نیروگاه‌های هسته‌ای امریکا با ویژگی‌های مضاعف حفاظتی طراحی شده است. اما دو حادثه بزرگ یکی حادثه جزیره تری مایل در پنسیلوانیا و دیگری در چرنوبیل اوکراین، نگرانی در مورد خطرات بلقوه نیروگاه‌های هسته‌ای را تشدید کرده است. حادثه جزیره تری مایل باعث آلودگی اندکی در خارج از سایت شد. بیشترین دُز ناشی از حادثه جزیره تری مایل حدود ۰/۲ mSv تا ۰/۷ و دُز جمعی ساکنین اطراف سایت ۳۳ نفر-سیورت تخمین زده شد. این دُز جمعی حاکی از افزایش ۱ یا ۲ برابر مرگ ناشی از سرطان در افراد تابش دیده است. این مقدار افزایش ریسک بسیار کمتر از آن است که در مطالعات اپیدمیولوژیک قابل اندازه‌گیری باشد. در حالیکه حادثه چرنوبیل موجب ریزش باران‌های رادیواکتیو قابل ملاحظه شد. اگرچه تنها اثر سوء مشهود، افزایش فراوانی سرطان تیروئید در کودکان، بخصوص در منطقه بلاروس بوده است، دُز جمعی کل، نیم تا یک میلیون نفر-سیورت بوده که عمده توسط جمعیت شوروی سابق و اروپا جذب شده است. برای مقایسه باید توجه داشت دُز جمعی پرتوهای زمینه جهان حدود 10×10^6 نفر-سیورت در سال است.

تولید و آزمایش تسلیحات هسته‌ای

منبع دیگر تابش‌دهی، تولید و آزمایش سلاح‌های هسته‌ای است. اگرچه سابقاً در تسلیحات هسته‌ای از اورانیوم استفاده می‌گردیده ولی امروزه از پلوتونیوم محصول رآکتور هسته‌ای استفاده می‌شود. در تولید سوخت سلاح‌های هسته‌ای، مراحل شبیه بازیافت سوخت مصرفی رآکتورها وجود دارد که موجب نگرانی‌هایی از تولید سوخت اورانیوم با این روش گردیده است. تاکنون آزمایش تسلیحات هسته‌ای سبب آزاد سازی مقداری قابل توجه مواد رادیواکتیو به محیط شده است. آلودگی‌های رادیواکتیو حاصل از انفجار سلاح‌های هسته‌ای عبارتند از: ^{131}I (۸ روز)، Sr-90 (۲۸ سال)، Sr-89 (۵۳ روز)، Cs-137 (۳۰ سال) و Ce-144 (۲۷۵ سال). از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۸۰ آزمایشات هسته‌ای بر روی سطح زمین صورت می‌گرفته که باعث بارش‌های

راديوآکتیو روی کره زمین می‌گردیده است. دُز جمعی ناشی از این آزمایشات از سال ۱۹۹۳ حدود $10^6 \times 7$ نفر-سیورت تخمین زده شده است. هر چند میانگین دُز حاصل از چنین آزمایشات هسته‌ای نسبتاً کم است، اما جمعیت مناطق نزدیک آزمایشات به طور چشمگیر تابش‌گیری نموده‌اند. برای مثال چندین مرداب در جزایر مارشال، که بسیاری از آزمایشات هسته‌ای امریکا در آنجا انجام می‌شود، خالی از سکنه شده است. در برخی از اهالی بومی، ضایعات پوستی ناشی از تابش‌گیری حاد پرتوهای یونساز بروز کرده است. در سایت نوادا، که بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۲ آزمایشات هسته‌ای انجام می‌گرفته، دُز تیروئید کودکانی که نزدیک این محل زندگی می‌کردند تا ۱Gy نیز رسیده است.

از سال ۱۹۶۳ اغلب آزمایشات هسته‌ای در زیرزمین انجام می‌شود. اثرات محیطی این آزمایشات تقریباً اندک و پرتوگیری عموم مردم ناچیز است. همچنین، تخریب و از رده خارج شدن تسلیحات هسته‌ای، سبب رها شدن مواد راديوآکتیو کمتری به محیط گردیده است، هرچند توان تکثیر سلاح‌های هسته‌ای همواره یک نگرانی محسوب می‌شود.

اثرات بیولوژیک پرتوها

اثرات پرتوهای یونساز بر سلول‌ها

پرتوهای یونساز با انتقال انرژی سبب اختلال در ساختار یا عملکرد سلول و در نتیجه باعث آسیب بیولوژیک بافت‌ها می‌شوند. انتقال انرژی به پروتوپلاسم سلول‌ها می‌تواند مستقیماً باعث تغییر در محتویات سلول نظیر شکستن یک یا دو رشته مولکول DNA به‌طور غیرمستقیم یعنی با تولید رادیکال آزاد (حالت‌های بسیار فعال اتم و مولکول‌ها) باعث واکنش‌های فیزیکی یا شیمیایی خاص شوند. رادیکال‌های تولیدی ممکن است دور از محل اصلی یونسازی، باعث تغییرات شیمیایی شوند. پرتوهای با انتقال خطی انرژی (LET) زیاد، مثلاً پرتوهای آلفا در مسیر خود به‌طور متراکم یونسازی نموده و موجب آسیب‌های شدید سلول می‌شوند. پرتوهای با LET پایین (گاما و بتا)، به دلیل نفوذ بیشتر، انرژی و آسیب خود را در ناحیه وسیع‌تری پخش می‌کنند. آسیب به DNA می‌تواند سبب توقف تکثیر سلولی، جهش نقطه‌ای یا حذف ژن شوند که تظاهرات بالینی نظیر سرطان یا عیب‌های مادرزادی ایجاد می‌کنند. در بسیاری از موارد، سلول‌ها می‌توانند آسیب‌های DNA را ترمیم کنند بخصوص اگر یکی از دو رشته DNA آسیب دیده باشد. در صورت آسیب همزمان دو رشته DNA که معمولاً توسط پرتوهای با LET بالا ایجاد می‌شود، احتمال آسیب پایدار افزایش می‌یابد. اگر آسیب ساختار سلولی جدی باشد، امکان مرگ سلولی نیز وجود دارد. اگر تعداد زیادی از سلول‌های یک عضو کشته شوند، همانند آنچه در

سوختگی با پرتو رخ می‌دهد، عمل عضو یا بافت متوقف و یا در بسیاری موارد موجب مرگ موجود زنده می‌شود.

اثرات بیولوژیک و حساسیت اندام‌ها

ممکن است بعضی پرتوها بیش از سایرین، به سلول‌ها آسیب وارد کنند همچنین برخی اندام‌ها آسیب پذیری بیشتری داشته باشند. برای در نظر گرفتن اثر فاکتور وزنی پرتو و فاکتور وزنی بافت واحدهای جدید دُز تعریف گردیده است.

اثرات قطعی و احتمالی

ارتباط پیچیده‌ای بین آسیب‌های پرتویی و تظاهرات بالینی وجود دارد، اما تقریباً تمام اثرات بیولوژیکی بر موجود زنده را می‌توان به اثرات قطعی یا احتمالی تقسیم کرد. اثرات احتمالی بیش از آن که وخامت اثر را دربرگیرد به افزایش احتمال اثر یعنی بروز سرطان یا ناهنجاری‌های موروثی مربوط است و ممکن است یک دوره تاخیر طولانی بین زمان پرتوتابی و بروز اثرات وجود داشته باشد. اعتقاد بر این است که این اثرات ناشی از آسیب DNA است. در مقررات حفاظت، اثرات احتمالی عموماً فاقد دُز آستانه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین حتی مقادیر بسیار ناچیز پرتوها نیز ممکن است بروز اثرات احتمالی را افزایش دهد.

اثرات قطعی عمدتاً به دلیل مرگ سلول‌های تابش دیده رخ می‌دهد که منجر به نقص یا حذف عملکرد بافت یا عضو می‌شود. این اثرات در پی دُز جذبی زیاد و تاخیر زمانی کوتاه ظهور می‌کنند. بروز اثر نیازمند دُز آستانه است یعنی در کمتر از یک دُز معین، اثرات قطعی مشاهده نمی‌شود. برخی اثرات قطعی پرتوتابی حاد در جدول (۵-۱) فهرست شده است. حتی دُزهای نسبتاً بالا نیز سبب آسیب فوری نمی‌شوند. دُز ۵ گری کل بدن در صورت عدم درمان، معمولاً کشنده است اما بین پرتوتابی و مرگ ممکن است چندین ماه طول بکشد. این امر به دلیل تخریب سلول اندام‌ها در اثر دُز جذبی زیاد است که منجر به توقف عملکرد صحیح اعضای بدن شده، مرگ رخ می‌دهد. بعضی اندام‌های خاص به طور ویژه به تابش حساسند. تابش حاد حدود چند سیورت به بیضه‌ها یا تخمدان‌ها ممکن است منجر به عقیمی و تابش شدید به چشم باعث آب مروارید شود.

توانایی ترمیم سلول‌های تابش دیده به میزان زیادی به دُز-ریت یعنی دُز جذبی در واحد زمان، بستگی دارد. برای مثال تابش حدود ۶ Gy پرتوی ایکس به کل بدن که هم ارز دُز معادل ۶ Sv است، اگر در یک روز انجام شود و فرد مورد درمان قرار نگیرد، ظرف ۳۰ روز قطعاً باعث مرگ می‌شود. در حالی که ۶ سیورت دُز تدریجی در مدت ۳۰ سال سبب دُز سالانه حدود 0.2Sv خواهد شد که ۴ برابر دُز مجاز شغلی یعنی 50mSv/yr است. این دُز فقط سبب افزایش احتمال بروز سرطان می‌شود و تقریباً نمی‌تواند هیچ اثر قطعی ایجاد کند. بنابراین تفاوت در دُز-ریت

نشان از تفاوت در اثر بیولوژیک دارد یعنی مرگ حتمی در ۳۰ روز و احتمال افزایش ریسک سرطان در باقیمانده عمر. فاکتور مهم دیگر در اثرات بیولوژیکی پرتوها، بخشی از بدن است که مورد تابش قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۱- چند اثر پرتوگیری حاد ناشی از پرتوهای یونساز (سندروم تابش‌گیری حاد)

اثرات	دُز مؤثر (سیورت) Sv
علامت ظاهر نمی‌شود	۰ - ۰/۱۵
شکست کروموزومی: زیر حد اثرات بالینی	۰/۵ - ۰/۱۵
حالت تهوع و استفراغ، لوکمی موقت	۰/۵ - ۱
سندروم خونی: چهار فاز: ۱- فاز خستگی، سردرد، تهوع و استفراغ ۲- فاز تاخیری، کاهش پلاکت، ریزش مو ۳- فاز کاهش مغز استخوان، انهدام سلول‌های اجدادی مغز استخوان از وخامت جدی تا مرگ (بیش از ۶ گری) ۴- فاز بهبودی، بهبودی کلی در مدت ۳ تا ۶ ماه	۱ - ۸
سندروم گوارشی: صدمه به سلول‌های اجدادی بافت پوششی معده و روده، اسهال و استفراغ، عدم تعادل شدید الکترولیت‌ها و مرگ	۸ - ۳۰
سندروم سیستم عصبی: تهوع و استفراغ و اسهال شدید، رفتار بی‌معنی، انسداد جریان خون، عدم تعادل عضلانی عصبی، تشنج، کوما و مرگ در ۴۸ ساعت	> ۳۰

در پرتودرمانی استفاده از دُز زیاد به بخشی از بدن منجر به کمترین آسیب در بافت‌های سالم می‌شود. انگشت یک فرد می‌تواند در اثر دُز جذبی ۱۰ گری بطور موضعی زخم شده، بعداً بهبود و فقط اثر زخم بماند. سلول‌های با سرعت تکثیر زیاد، معمولاً به پرتو حساس‌ترند. برای مثال گلبول‌های سفید خون و اندام‌های خونساز نظیر طحال، گره‌های لنفی و مغز استخوان، به پرتو حساسند. اگرچه اثرات قطعی پرتوها به خوبی شناخته شده‌اند، ولی در مورد اثرات احتمالی القای سرطان، نقص‌های مادرزادی یا اثرات سوء وراثتی تردیدهای زیادی، وجود دارد. برای مثال مطالعه فراوانی سرطان مخصوصاً در دُز ریت‌های پایین به دلیل وجود تاخیر زمانی بین تابش و بروز سرطان و فراوانی طبیعی سرطان، بسیار دشوار است. هرچند اثرات و سازوکار اثرات سوء پرتوهای یونساز، نسبت به مواد شیمیایی سرطان‌زا، بیشتر شناخته شده، برای مثال از مطالعه بازماندگان بمب اتمی معلوم شده، دُزهای بیش از ۰/۲ Sv منجر به افزایش شیوع سرطان و مرگ می‌شود. ولی اثرات دُزهای پایین کماکان مورد بحث است. به طور مشخص در دُزهای پایین، رابطه دُز- پاسخ، را خطی- بدون آستانه در نظر می‌گیرند و شواهد بیولوژیکی و همه‌گیر شناختی برای آن وجود دارد، براین اساس با یک حساب سرانگشتی، ریسک سرطان کشنده

ناشی از تابش‌گیری حدود ۰/۰۵ درسیورت در طول عمر است. در حالی که بسیاری معتقدند رابطه خطی بدون آستانه، نظریه‌ای مصلحت‌آمیز بوده و آن را مورد تردید قرار داده‌اند. به عبارت دیگر برخی متخصصان شواهدی دال بر هورموزیست را مورد بحث قرار می‌دهند- اثر مثبت و مفید دُز- های پایین- و به این دلیل فرضیه خطی- بدون آستانه را رد می‌کنند. با این حال، انجمن ملی حفاظت از پرتو (NCRP) در گزارش اخیر خود نتیجه‌گیری نموده "هیچ‌گونه دلیل قطعی برای رد نظریه رابطه خطی- بدون آستانه وجود ندارد". البته بنابه این گزارش: احتمال بروز اثرات در دُزهای بسیار پایین آنقدر کوچک است که ممکن است هرگز نتوان اعتبار نظریه خطی- بدون آستانه را تأیید یا رد کرد. توضیح تفصیلی اثرات بیولوژی پرتوها در فصل ۳ آورده شده است.

اصول حفاظت پرتو و استانداردها

سازمان‌های ملی و بین‌المللی واضح قوانین مربوط به حفاظت پرتوها عبارتند از: کمیسیون بین‌المللی حفاظت پرتوها (ICRP)، کمیسیون بین‌المللی واحد و سنجش پرتوها (ICRU)، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)، سازمان بین‌المللی کار (ILO)، سازمان بهداشت جهانی (WHO)، انجمن ملی حفاظت و سنجش پرتوها (NCRP)، کنفرانس مدیران ایالتی برنامه کنترل پرتو (CRCPD)، انجمن فیزیک بهداشت (HPS). اصول اساسی حفاظت پرتوها توسط کمیسیون بین‌المللی حفاظت پرتوها (ICRP) تدوین شده است که خلاصه‌ای از آن در ذیل آمده است.

عملیات و مداخلات (Practices & Interventions): حفاظت پرتوها به دو گروه "عمل و مداخله" تقسیم می‌شود. عملیات شامل مجموعه فعالیت‌هایی است که از طریق وارد نمودن چشمه‌ها، افراد و مسیرهای جدید یا تغییر شرایط چشمه‌های موجود منجر به افزایش پرتوگیری افراد شود. مثالی از عملیات (practices) تابش رادیونوکلوئیدها شامل رادیونوکلوئیدهای طبیعی معادن و اماکن دفع مواد پسمان است. از طرف دیگر مداخله، فعالیت‌هایی است که بطور کلی پرتوگیری را از طریق تغییر ساختار موجود کاهش دهد. این فعالیت‌ها شامل حذف چشمه‌های موجود، تغییر مسیرها یا کاهش تعداد افراد مورد تابش است. رادون منازل و مواد رادیواکتیو طبیعی و مصنوعی که قبلاً در محیط بوده‌اند، مثال‌هایی است که می‌توانند منجر به عملیات مداخله‌ای شوند.

موجه بودن، بهینه سازی و رعایت حدود مجاز دُز: اساس هدایت ICRP برای حفاظت پرتوها که در دنیا مورد پذیرش قرار گرفته، اصولاً بر مبنای سه فعالیت؛ (الف) موجه بودن، (ب) بهینه سازی و (ج) رعایت حدود مجاز، پایه ریزی شده است.

همه فعالیت‌های مرتبط با حفاظت پرتوها، باید توجیه پذیر باشد. به طور مشخص، هر عملیات منجر به پرتوتابی، باید دارای فواید کافی برای افراد تابش‌دیده باشد، تا خطرات ناشی از تابش را جبران کند. استفاده از پرتوی ایکس پزشکی مثالی از آن است که مزیت این روش تشخیصی باید بر زیان ناشی از تابش‌گیری غلبه کند. مداخله در این مورد، توجیه‌پذیری است. Justification یعنی فایده عمل باید بیش از زیان آن باشد. برای مثال، توجیه پذیر بودن رفع آلودگی یک مکان آلوده به ماده رادیواکتیو یعنی کاهش پرتوگیری عموم مردم و افزایش مزیت‌های اجتماعی (مثل آرامش خاطر) که باید بر هزینه‌های مالی و آسیب سلامتی کارگرانی که در رفع آلودگی دخالت داشته‌اند، غلبه کند. در صورت توجیه‌پذیری یک فعالیت، باید فعالیت‌های بهینه‌سازی انجام تا فواید آن حداکثر ممکن شود. بهینه‌سازی الزام می‌سازد عملیات مداخله در صورتی انجام شود که با آنالیز هزینه-فایده، انجام آن موجه باشد. بهینه‌سازی با این فرض صورت می‌گیرد که مقدار پرتوگیری حاصل از عملیات موجه، باید به حداقل ممکن (ALARA هرچه کمتر موجه شدنی) با توجیه عوامل اقتصادی و اجتماعی برسد. کاهش تعداد عکس‌های رادیولوژی و شیلد بدن بیمار مثالی از ALARA در رادیولوژی دندان است. کمسیون NCRP برای رسیدن به ALARA تعدادی حدود مجاز دُز را منتشر نموده است. در امر مداخله و بهینه‌سازی، شکل، مقدار و مدت زمان تابش باید به گونه‌ای باشد که حداکثر مزیت خالص (مزیت منهای هزینه) بدست آید. از آنجایی که بهینه‌سازی هزینه‌بر است برای جلوگیری از بی-عدالتی، اجباری شدن بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. این فشارها به شکل محدودیت دُز یا ریسک برای افراد گروه بحرانی که باید هزینه پرتوتابی را بپردازند، صورت می‌گیرد. اصول "موجه بودن" و "بهینه‌سازی" نقاط عطف حفاظت پرتوهاست و اغلب منجر به نتایج قابل قبولی می‌شوند. در عملیات قابل کنترل، اصل "محدود سازی" نیز استفاده می‌شود. بخصوص در تابش-گیری ناشی از عملیات قابل کنترل افراد، باید حدود مجاز دُز رعایت شود.

آژانس‌های دولتی آمریکا مسئول استفاده و حفاظت پرتوهای: در ایالات متحده تولید، مدیریت، استفاده و دفع مواد رادیواکتیو و سایر مواد خطرناک در نهایت توسط قوانینی که در کنگره تصویب می‌شود و به امضای رئیس جمهور می‌رسد، هدایت و کنترل می‌شود. پیمان انرژی اتمی (AEA) مصوب سال ۱۹۴۶ که بعد در ۱۹۵۴ اصلاح شد مثالی از این نوع است. AEA نخستین قانون مرتبط با انرژی هسته‌ای و از مهمترین اهداف آن اداره، گسترش، کنترل و استفاده صحیح از انرژی اتمی برای اهداف صلح‌آمیز بود. سایر قوانین مرتبط با مدیریت مواد رادیواکتیو عبارتند از: سیاست‌گذاری پسمان‌های رادیواکتیو کم مقدار (LLRW) در سال ۱۹۸۰ که در سال ۱۹۸۵ با اصلاحیه به LLRWPA تبدیل شد. قانون برخورد، جبران و تعهد محیط زیست سال ۱۹۸۰ که

در سال ۱۹۸۶ بازنگری و اصلاح شد. قانون سیاست‌گذاری پسمان‌های هسته‌ای ۱۹۸۲، قانون پیشگیری از آلودگی ۱۹۹۰ (PPA) و انواع قوانین ایالتی.

جدول ۱-۶ - خلاصه ای از حدود دُز پیشنهادی (منبع: گزارش شماره ۱۱۶ NRCP ۱۹۹۳ Bethesda)،

واحد معمول	واحد SI	
		الف- پرتوگیری شغلی
		۱. حد دُز مؤثر
۵ رم	۵۰ میلی سیورت	الف- سالانه
سن (سال) × ۱ رم	سن (سال) × ۱۰ میلی سیورت	ب- تجمعی
		۲. حدود دُز معادل برای بافت و اندامها
۱۵ رم	۱۵۰ میلی سیورت	الف- عدسی چشم
۵۰ رم	۵۰۰ میلی سیورت	ب- پوست، دست‌ها و پاها
		ب- پرتوگیری عموم مردم (سالانه)
۰/۱ رم	۱ میلی سیورت	۱. حد دُز مؤثر پرتوگیری پیوسته یا مکرر
۰/۵ رم	۵ میلی سیورت	۲. حد دُز مؤثر ، پرتوگیری غیر مکرر
		۳. حدود دُز معادل بافت و اندامها
۱/۵ رم	۱۵ میلی سیورت	الف- عدسی چشم
۵ رم	۵۰ میلی سیورت	ب- پوست، دست‌ها و پاها
		۴. اعمال درمانی برای منابع طبیعی
> ۰/۵ رم	> ۵ میلی سیورت	الف- دُز مؤثر (بجز رادون)
> ۲ WLM	> ۰/۰۰۷ Jh/m ³	ب- پرتوگیری از محصولات رادون-
		ج- پرتوگیری آموزشی و تمرینی (سالانه)
		۱. حد دُز مؤثر
۰/۱ رم	۱ میلی سیورت	۲. حدود دُز معادل بافت و اندامها
		الف- عدسی چشم
۱/۵ رم	۱۵ میلی سیورت	ب- پوست، دست‌ها و پاها
۵ رم	۵۰ میلی سیورت	ج- پرتوگیری جنین - رویان (ماهانه)
		۱. حد دُز معادل
۰/۰۵ رم	۰/۵ میلی سیورت	خ- دُز قابل اغماض (سالانه)
۰/۰۰۱ رم	۰/۰۱ میلی سیورت	

منبع: گزارش شماره ۱۱۶ NRCP سال ۱۹۹۳ Bethesda MD ، محدودیت‌های تابش پرتوهای یونساز. توجه: پرتوهای پزشکی مستثنی هستند بجز برای ب:۴ ، دُز مجموع پرتوگیری داخلی و خارجی به‌جز منابع طبیعی. حد کار ماهیانه (WLM) پرتوگیری تجمعی برای کار ماهیانه ۱۷۰ ساعت. WLM مساوی $3/5 \times 10^{-3} \text{ jh/m}^3$ است.

این قوانین ماهیت عمومی دارند اما از زبان و محتوایی برخوردارند که به آژانس‌های فدرال امکان نوشتن و اجرای دستورالعمل را می‌دهند. این دستورالعمل‌ها قدرت یک قانون را دارند اما توسط آژانس‌های فدرال که در ذیل مورد اشاره قرار گرفته، تدوین شده‌اند.

آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) : معمولاً استانداردهای زیست محیطی را در دستورالعمل‌های خود برای استفاده سازمان‌های فدرال و ایالتی تدوین می‌کند. EPA همچنین مقرراتی را در به‌کارگیری این استانداردها وضع می‌کند. همچنین به خاطر مسئولیتی که از انجمن سابق فدرال پرتو دریافت کرده در تدوین و تولید راهنمای استانداردهای پرتو برای تمام آژانس‌های ایالتی انجام وظیفه می‌کند

کمیسیون مقررات هسته‌ای (NRC) : این کمیسیون تحت معاهده انرژی اتمی حقوق و وظایف قابل ملاحظه‌ای برای تدوین و اجرای دستورالعمل‌ها دارد. این دستورالعمل‌ها به منظور استفاده غیرنظامی و مدیریت بهینه در مواد ذکر شده در AEA (مواد هسته‌ای ویژه، چشمه‌های مواد و محصولات جانبی که در 10CFR20 تعریف شده) و همچنین صدور مجوز برای استفاده از آن‌ها تهیه شده است. این مواد شامل مواد تولیدی و مصرفی رآکتورهای انرژی هسته‌ای: شامل رآکتورهای تحقیقاتی، آزمایشی و آموزشی، لوازم چرخه سوخت، وسایل پزشکی، دانشگاهی و صنعتی می‌شوند. به‌علاوه، انتقال (همراه با دیپارتمان انتقال)، ذخیره و دفع پسمان مواد رادیواکتیو مجاز را قانونمند می‌کند. دستورالعمل‌های این آژانس بر مبنای استانداردهای تدوینی EPA است. NRC برخی از حقوق و مسئولیت‌های خود را به ایالت‌هایی که تمایل و توانایی خود را برای قبول آن‌ها نشان دهند، واگذار می‌کند. این ایالت‌ها هم پیمان NRC نامیده می‌شوند.

اداره غذا و دارو (FDA) : این آژانس در بخشی از دیپارتمان خدمات انسانی و بهداشتی، استانداردهایی را برای طراحی و ساخت دستگاه‌های اشعه ایکس و سایر محصولات الکتریکی پزشکی که پرتوتابی دارند، تهیه می‌کند. مرکز تجهیزات و بهداشت رادیولوژی، واحدی در FDA است که اصولاً مسئول نشریات مربوط به پرتو است.

دیپارتمان انرژی (DOE) : این آژانس مسئول توسعه، ساخت و آزمایش تسلیحات هسته‌ای و مدیریت پسمانداری شامل ساخت و نگهداری مخزن برای پسمانداری سطح بالای رادیواکتیویته غیرنظامی و پسمانداری سوخت هسته‌ای رآکتورهای تجاری است. استانداردهای DOE توسط خودش تدوین می‌شود اما در برخی موارد تابع دستورالعمل‌های EPA است.

دیپارتمان دفاعی (DOD) : این بخش مسئول جابه‌جایی و ذخیره‌سازی صحیح تسلیحات هسته‌ای و سایر استفاده‌های نظامی انرژی هسته‌ای (کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای) است.

دپارتمان مراسلات (DOT) : این آژانس با همکاری NRC کار بسته‌بندی و مراسلات مواد رادیواکتیو را مدیریت می‌کند.

اداره بهداشت حرفه‌ای و ایمنی (OSHA) : دستورالعمل‌هایی را برای محافظت کارگران از پرتو، وقتی تحت پوشش سایر آژانس‌ها قرار نمی‌گیرند، تهیه و اجرا می‌کند.

دولت محلی و ایالتی: آژانس‌های دولتی و محلی نیز مسئول حفاظت پرتویی می‌باشند. بخصوص برای دستگاه‌های اشعه ایکس و NORM (شامل سنگ معدن اورانیوم و توریوم). همچنین ایالت‌ها از طرف آژانس‌هایی نظیر EPA، OSHA و NRC مجوز انتظام‌بخشی به مواد رادیواکتیو را دارند. برای مثال، از سال ۲۰۰۲ تعداد ۲۹ موافقت نامه ایالتی با NRC ایجاد شده است که عمده نظارت، بررسی و صدور مجوز کار با مواد رادیواکتیو به ایالت‌ها واگذار شده است (البته، رآکتورهای هسته‌ای هنوز تحت نظارت NRC هستند). تقریباً در تمام موقعیت‌ها این‌که کدام آژانس مسئول نوشتن و اجرای آئین‌نامه‌های یک قانون است، تردید وجود دارد. و شکاف یا برهم نهی در شبکه قانون و مقررات وجود دارد و باید با مدیریت یا از طریق دادگاه‌ها حل شود.

روش‌های حفاظت از پرتو

سه عامل بسیار مؤثر در حفاظت از پرتوتابی خارجی عبارتند از: فاصله از منبع، مدت زمان پرتوتابی و حفاظ. کنترل آلودگی و مدیریت پسمان در مورد حفاظت از پرتوگیری داخلی و خارجی با اهمیت است. این روش‌ها مخصوصاً در اجرای اصل ALARA و اجرا آن توسط افراد مختلف، مهندسی و مدیریت کنترل پرتو با شدت‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. بالاخره، نظارت و پایش به منظور هشدار در مورد شکستن حریم‌های ایمنی و کنترل کیفیت بسیار مؤثر است.

فاصله

هر چه فرد از منبع تابش دورتر شود، پرتوی کمتری دریافت می‌کند. این قانون بخصوص برای منبع تابش نقطه‌ای نظیر نقطه تابش ایکس از هدف لامپ رادیولوژی مطابقت دارد. طبق قانون معروف عکس مجذور، تابش به یک شیء با مجذور فاصله از منبع، کاهش می‌یابد.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

که در آن R_1 و R_2 فاصله از منبع و I_1 و I_2 شدت پرتوتابی در آن فاصله‌هاست برای مثال اگر فردی در فاصله ۵ فوت از یک منبع A دز-ریت دریافت کند، در فاصله ۱۰ فوت، این عدد به یک چهارم A کاهش می‌یابد. این قانون تقریباً برای سایر منابع تابش نقطه‌ای اگر منبع تابش در مقایسه با فاصله چشمه از فرد کوچک باشد نیز صادق است. در مورد چشمه‌های

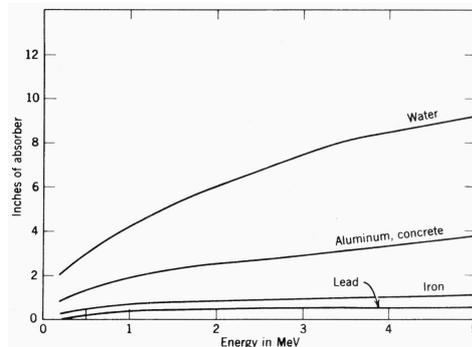
غیرنقطه‌ای با افزایش فاصله مقدار پرتوگیری بیش از ضریب عکس مجذور فاصله کاهش خواهد یافت.

زمان پرتوتابی

اگر قرار گرفتن در معرض پرتو ضروری و اجتناب ناپذیر باشد، باید انجام کار در حداقل مدت زمان پرتوگیری صورت گیرد. در موقعیت‌های شغلی یا مشابه آن، پرتوگیری تجمعی باید کمتر از حداکثر دُز مجاز فرد باشد. لذا انتقال فرد به یک بخش و تغییر وظایف او باید به نحوی باشد که دُز دریافتی او در محدوده ارائه شده در جدول (۶-۱) حفظ شود.

حفاظ

حفاظ یک ماده تضعیف کننده پرتو است که بین منبع تابش و محیط قرار می‌گیرد. یک حفاظ معمولاً ترکیبی از بتن، استیل، سرب و شیشه سربی است که نه تنها سبب جذب پرتوهای یونساز می‌شود بلکه می‌تواند از گرمای شدید نیز جلوگیری کند. انرژی و نوع پرتویی که باید تضعیف شود، فردی که باید محافظت شود و میزان استفاده از مکان تابش عواملی هستند که در انتخاب جنس، اندازه و ضخامت حفاظ دخالت دارند. برای طراحی و تعیین ضخامت یک حفاظ لایه نیمه جذب (HVL) مورد استفاده قرار می‌گیرد و ضخامتی است که شدت پرتوی عبوری را به نصف کاهش می‌دهد. شکل (۳-۱) را نگاه کنید. معمولاً برای حذف پرتوی بتا، شیشه یا پلاستیک بکار می‌رود. حفاظ پرتوی اولیه، ضخامتی از یک ماده است که سبب تضعیف پرتوی مفید به اندازه لازم می‌شود و حفاظ ثانویه پرتوهای پراکنده را تضعیف می‌کند. با این وجود پرتوها توسط دیوارها، کف و سقف اتاق نیز پراکنده و در نتیجه ممکن است پرتو در اطراف حفاظ، گوشه اتاق، بالا و پایین درها، و اطراف پنجره‌ها و دریچه‌های تهویه وجود داشته باشد.



شکل ۳-۱ - لایه‌های نیمه جذب انرژی‌های مختلف اشعه ایکس برای ضخامت‌های مختلف آهن، سرب، آلومینیوم، بتن و آب برحسب اینچ. [منبع: شرکت سرویس تابش اتمی RCA، سرویس‌های دولتی، [Camden, NJ, 1959]

گاهی اوقات شدت پرتوهای پراکنده ممکن است به بزرگی پرتوهای اولیه یا حتی بیشتر از آن باشد. حفاظ باید برای سلامت کسانی طراحی شود که مجبورند از بالا، پایین یا هرطرفی به چشمه دسترسی داشته باشند. بطور کلی بهتر است حفاظ در نزدیکی چشمه تابش قرارگیرد تا از سطح و وزن حفاظ کاسته شود. تعدادی از مشخصات پرتوهای آلفا، بتا، گاما، ایکس و نوترون قبلاً بیان شده است. بُرد پرتوهای آلفا و بتا در هوا در جداول ۷-۱ و ۸-۱ نشان داده شده است.

جدول ۷-۱ - برد پرتوی بتا در هوا

حداکثر برد اشعه بتا در هوا (cm)	انرژی (MeV)
0.002	0.01
0.015	0.03
0.064	0.07
0.08	0.08
0.11	0.1
0.21	0.15
1	0.4
1.8	0.6
2.8	0.8
3.7	1
6.1	1.5
8.4	2
13	3
16	4
19	5

منبع: تابش اتمی، سرویس RCA، سرویس دولتی Camden NJ ۱۹۵۹

در طراحی حفاظ برای پرتوهای بتا باید تولید اشعه ایکس ترمزی که پرتوی ثانویه است مورد ملاحظه قرارگیرد. حفاظ نوترون مخصوصاً در اطراف راکتور هسته‌ای و شتابدهنده‌ها، مساله مهمی است. عوامل دیگری که در طراحی حفاظ باید مد نظر قرارگیرد بارکار، ضریب استفاده و ضریب اشغال است. بار کار معمولاً برحسب میلی‌آمپرثانیه در هفته بیان می‌شود، و برابر است با جریان میلی‌آمپر عبوری از تیوب اشعه ایکس در تعداد ثانیه‌هایی که در طول هفته کار می‌کند. ضریب استفاده، بخشی از زمانی است که پرتوی ایکس یک دستگاه در جهت خاصی به دیوار، سقف یا کف اتاق تابیده می‌شود. ضریب اشغال مدت زمانی است که فرد در آن سوی دیوار، سقف یا کف اتاق، هنگام فعال بودن دستگاه مورد تابش قرار می‌گیرد. این فاکتور از مقدار ۱ که فرد در مکان مجاور اتاق اشعه زندگی یا کار می‌کند تا یک شانزدهم که در راهرو یا آسانسور ممکن است تابش‌گیری کند، متغیر است. محاسبه حفاظ به کمک جداول و گراف‌ها ساده می‌شود. با یک حساب سرانگشتی، ۲ اینچ سرب، ۴ اینچ آهن یا استیل، ۸ اینچ بتن یا ۲۴ اینچ آب سبب کاهش یک دهم دُز-ریت می‌شود. برای مثال، اگر فاصله آند تیوب اشعه ایکس از دیوار (منطقه کنترل حفاظت شده) ۱۴ فوت، ماکزیمم ولتاژ دستگاه اشعه ایکس درماتی ۲۵۰kV،

بارکار ۲۰۰۰۰ میلی‌آمپر-دقیقه در هفته و کسر بارکار در جهت دیوار (فاکتور استفاده) $\frac{1}{4}$ باشد، ضخامت حفاظ مورد نیاز اشعه اولیه برای دیوار اتاق کنترل ۷/۹mm سرب یا ۱۴/۶ اینچ بتن است. اگر اشعه بطور مایل تابیده شود ضخامت حفاظ مورد نیاز کمتر می‌شود. تحت همین شرایط اگر ولتاژ دستگاه 200 kV_p باشد ضخامت حفاظ مورد نیاز ۴/۵mm سرب و ۱۲/۸ اینچ بتن و برای دستگاه اشعه ایکس درمانی با 100 kV_p ، بارکار ۲۰۰۰ میلی‌آمپر دقیقه در هفته و ضریب استفاده $\frac{1}{4}$ ، حفاظ لازم ۱/۳۵mm سرب و ۴/۵ اینچ بتن است. شرح تفصیلی مطالب حفاظت پرتویی در فصل ۳ آورده شده است.

جدول ۸-۱- انرژی و برد پرتوهای آلفا در هوا

برد آلفا (cm)	انرژی آلفا (MeV)	رادیویزوتوپ
۲/۸	۳/۹۷	Th-232
۳/۳	۴/۹۷	Ra-226
۳/۹	۵/۴۱	Th-228
۴/۶	۵/۹۹	Po-218
۵/۶	۶/۷۷	Po-216
۵/۹	۷/۶۸	Po-214
۸/۶	۸/۷۸	Po-212

منبع: تابش اتمی، سرویس RCA، سرویس دولتی، ۱۹۵۹ Camden NJ.
توجه: با محاسبه سرانگشتی تا ۱۰٪ خطا، برد ذرات آلفا با انرژی MeV در هوا مساوی $R=0.56 \text{ cm} \times E$ برای انرژی-های کمتر از ۴MeV و برای انرژی‌های $4 \text{ MeV} < E < 8$ $R=(1.24 \text{ cm} \times E) - 2.62 \text{ cm}$

کنترل آلودگی

مواد منتشرکننده پرتوهای آلفا و بتا، در صورت تزریق یا استنشاق، به‌خاطر قدرت یونسازی زیاد و تابش دهی مدام تا واپاشی کامل موجب خطرات بارز و مشخصی می‌شوند. شدت صدمات تابع نوع مواد رادیواکتیو، نوع و انرژی تابش، نیمه عمر بیولوژیکی و فیزیکی و حساسیت بافت و ارگان است. منظور از حفاظت، نگهداری مواد رادیواکتیو خارج از بدن و در همان مکان اولیه است. این کار با استفاده از روش‌های صحیح و تمرین خوب، نظیر به‌کارگیری هود آزمایشگاهی، فیلتر هوا، سیستم تهویه، ممانعت از جارو کردن خشک، پوشیدن لباس‌های محافظ و ماسک، استفاده از وسایل صحیح مانیتورینگ و جلوگیری از خوردن و سیگار کشیدن هنگام کار با مواد رادیواکتیو است. ورود به مناطق با تابش‌دهی قابل توجه، شامل مناطق شغلی یا کار یا هرگونه دسترسی دیگر باید کنترل شود. این نواحی عبارتند از بیمارستان‌ها، کلینیک‌های دندانپزشکی، توانبخشی، دانشیومتری استخوان، اورتوپدی‌ها، دامپزشکی و مؤسسات آموزشی و تجاری، آزمایشگاه‌های

خصوصی و تحقیقاتی که روش‌های تشخیصی انجام می‌دهند یا از مواد و تجهیزات پزشکی استفاده می‌کنند و یا وسایل نقلیه و بنگاه‌های حمل و نقل و انبارها. مناطق تابش زیاد طبق دستورالعمل NRC و مقررات ایالتی به نام «ناحیه تابش»، «منطقه پرتو» یا «منطقه محدودشده» علامت گذاری می‌شوند. این نواحی و تاسیسات مشابه باید تحت نظارت افراد مجرب که در رشته بهداشت پرتوها آموزش دیده و ماهر شدند، قرار گیرد تا خطرات پرتو آرزایی و برنامه‌های حفاظتی لازم مدیریت و اجرا شود.

مدیریت پسمانداری

پسمان‌های مواد رادیواکتیو نباید سلامتی فردی، بهداشت عمومی یا محیط را تهدید کنند. اصول راهنما باید نسبت به پیشگیری (کاهش) و کنترل پسمان‌های گاز، مایع و جامد را در محل تولید و پس از تفکیک و جمع‌آوری علامت گذاری، بازیافت، ذخیره سازی یا دفع و هدایت‌کننده باشند. در اینجا اصول کلی مدیریت پسمان رادیواکتیو مورد اشاره قرار می‌گیرد. در مورد پسمان‌های حاصل از رآکتورهای هسته‌ای با جزئیات بیشتر بحث می‌شود. برای پسمان‌های رادیواکتیو دو طبقه بندی کلی وجود دارد، پسمان با رادیواکتیویته بالا (HLRW-HLW) و پسمان با رادیواکتیویته پایین (LLRW-LLW) که به طور عمده توسط دو قانون متفاوت فدرال و دو مجموعه دستورالعمل مختلف مدیریت می‌شوند. دفع پسمان رادیواکتیویته زیاد در حوزه مسئولیت DOE است. صدور مجوز تجهیزات دفع پسمان‌های سطح بالا همانطور که در فصل ۶۰ دستورالعمل 10CFR تحت عنوان «دفع پسمان رادیواکتیو سطح بالا در مخازن زمینی» آمده است، در حوزه مسئولیت NRC می‌باشد. مسئولیت دفع واقعی HLW، که عموماً شامل سوخت هسته‌ای مصرف شده است، به عهده DOE است. صدور مجوز دفع LLW نیز به عهده NRC است که دستورالعمل‌های آن در فصل ۶۱ 10CFR تحت عنوان «مجوز لازم برای دفع زمینی پسمان‌های رادیواکتیو» آورده شده است. تجهیزات دفع پسمان توسط گروه مناطق ایالتی به نام کمپکت‌ها، مدیریت می‌شود. پسمان‌های با اکتیویته پائین، شامل پارچه، لباس، فیلتر، رزین‌های آلوده و فلزات اکتیو شده در نیروگاه‌های هسته‌ای، آزمایشگاه‌ها، بیمارستان‌ها و تجهیزات تجاری و صنعتی است. مقررات NRC این پسمان‌ها را به سه کلاس تقسیم کرده است: پسمان‌های کلاس A موادی هستند که در مدت ۱۰۰ سال به میزان پرتودهی سالم (بدون خطر) (همانگونه که در NRC تعریف شده است)، می‌رسند. پسمان‌های کلاس B موادی با اکتیویته بیشترند و طی ۳۰۰ سال به مقدار بی‌خطر می‌رسند. پسمان‌های کلاس C موادی هستند که تا ۵۰۰ سال (به میزان سالم) کاهش پیدا نمی‌کنند.

پسمان‌های کلاس A، می‌توانند به شکل جامد یا جذب شده در ظروف، دفن شوند. پسمان‌های کلاس B باید به صورت جامد درآمده و در ظروف کاملاً بی‌عیب دفن شوند. پسمان‌های نوع C باید جامد شده در عمق حداقل ۱۵ متری (۵۰ فوت) دفن شوند. همچنین پسمان‌ها باید به صورتی فرآوری شوند که خطر پرتوگیری عموم مردم حداقل شود. برای مثال آلودگی آب‌های زیرزمینی باید حداقل شود زیرا ممکن است برای آبیاری کشتزارها و علوفه مصرفی دام‌ها استفاده یا برای آب شرب فرآوری شود. همچنین پسمان‌ها ممکن است توسط گیاهان و جانوران موجود در آب‌های سطحی که به مصرف مردم می‌رسند جذب شوند. همچنین اگر فردی در نزدیکی محل رهاسازی پسمان باشد ممکن است مستقیماً پرتوگیری کند. این فرآیندها در سالهای اخیر به طور گسترده به وسیله مدل‌های کامپیوتری انتقال / راه‌های محیطی در نوشتن دستورالعمل‌ها، مشخص کردن معیارهای رهاسازی پسمان‌ها و حل مسائل خاص به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل ویژگی‌های پسمان‌های جامد، مایع و گاز هر کدام باید قبل از رهاسازی یا دفع به طور خاص فرآوری شوند. مایعات برای جلوگیری از آلودگی، ابتدا فرآوری می‌شوند. این فرآیندها ممکن است شامل: فیلترکردن، کانی زدایی، جوشاندن مقاداری از آب (تبخیر) و ته‌نشینی جامد (سپس همانند پسمان‌های جامد رفتار می‌شود) و/ یا ذخیره سازی مایع برای دوره زمانی معین که مواد رادیواکتیو آن واپاشی کند، باشند. پس از این فرآیندها، از مایع نمونه‌گیری شده و اگر به استاندارد لازم رسیده باشند، می‌توانند برای مصرف کشاورزی یا رها سازی در محیط در مخازن ذخیره شوند. اگر براساس اندازه‌گیری نمونه‌ها، آب به شرایط رهاسازی نرسیده باشد، باید فرآوری بیشتری صورت گیرد. برخی مواد، مثل رسوب‌ها (جامدات باقی مانده پس از تبخیر آب) با موادی نظیر بتن مخلوط و به صورت جامد در می‌آیند. این عمل گاهی نیز با رزین‌های کانی زدا، انجام می‌شود. با این رسوبات پس از ترکیب با یک سختی ساز، نظیر یک پسمان جامد رفتار می‌شود.

پسمان‌های گازی فیلتر شده به‌منظور جای‌گیری کمتر، اغلب فشرده می‌شوند و برای مدتی اجازه داده می‌شود تا واپاشی کنند. بعد از طی زمان لازم، از گاز نمونه‌گیری می‌شود، اگر اکتیویته به حد دلخواه رسیده باشد، گازها در اتمسفر رها و یا گاهی در برخی موارد خاص استفاده مجدد می‌شوند. پسمان‌های مایع و گاز رادیواکتیو اگر مجوز لازم برای رها شدن در محیط را که بسیار سختگیرانه است اخذ نموده باشند، می‌توانند در محیط رها شوند. مانیتورینگ و اجرای دقیق استانداردهای رهاسازی کمک می‌کند مطمئن شویم افراد جامعه به دلیل رهاسازی پسمان‌ها در معرض خطر قرار نمی‌گیرند. پسمان‌های جامد، در محل جمع‌آوری و یا به مکان طراحی شده برای دفع آن‌ها منتقل می‌شوند. پسمان‌هایی که مناسب رهاسازی نیستند ممکن است طی فرآیندهایی به شکل پسمان‌های جامد درآمده تا بتوان به طور سالم در

مخازن زیر زمینی دفن کرد. شیشه سازی، فرآیند جامدسازی عمده‌ای برای پسمان‌های اکتیویته زیاد است. در این فرآیند مایعات رادیواکتیو سطح بالا و لجن‌ها با ذرات شیشه ترکیب و تا دمای بالا گرم می‌شوند تا شیشه گداخته درست شود. شیشه‌های گداخته به شکل گلوله، بلوک یا تخته‌های شیشه‌ای درمی‌آیند. با سرد شدن مخلوط به صورت شیشه پایدار، عناصر رادیواکتیو در آن گیر افتاده، و از نفوذ به محیط از طریق هوا و آب جلوگیری می‌شود. اگرچه بلورسازی فرایند مؤثری است، اما بسیار گرانقیمت است و زمانی انجام می‌شود که حجم پسمان‌ها به مقدار معقولی کاهش یابد. علاوه بر انجام صحیح کار با مواد رادیواکتیو، دفع مناسب پسمان‌ها در به حداقل رساندن دُز دریافتی جامعه کمک می‌کند. جایگاه‌های سطح پایین اکتیویته ایزوله شده برای ۵۰۰ سال دست نخورده می‌ماند و ۱۰۰ سال پس از مسدود شدن مانیتورینگ می‌شوند. هرچند اغلب مواد رادیواکتیو به سرعت واپاشی می‌کنند ولی برخی رادیونوکلوئیدها نیمه عمر طولانی دارند، البته این مواد معمولاً سهم کمی از مواد حجیم را تشکیل می‌دهند. در حال حاضر، پسمان رادیواکتیو سطح پایین در ۳ سایت فعال امریکا منهدم می‌شوند. بارنول (Barnwell) در کارولینای جنوبی که پسمان‌های سطح پایین را دریافت می‌کند. هانفورد در واشنگتن پسمان‌های شمالغرب و کوهستان راکی را می‌پذیرد. کلیو (clive) در یوتاه (utah) مجاز به پذیرش پسمان‌های نوع A با اکتیویته کم و حجیم است. برای کاهش هزینه‌های حداقل رسانی مقادیر LLW راه‌های مختلفی وجود دارد. در حالی که فشارهای بازار محرکی است در استفاده بخردانه از منابع، فرایند حداقل رسانی پسمان‌ها کمتر مورد حمایت قوانین و مقررات قرار می‌گیرد. قوانین فدرال مخصوصاً به صورت یک دستورالعمل برای به حداقل رسانی تولید LLW وجود ندارد. قوانین جلوگیری از آلودگی مثلاً ALARA حس مثبتی ایجاد کرده و از نظر اجتماعی مفید است. بازیافت و تقلیل چشمه‌های رادیواکتیو از روش‌هایی است که می‌تواند به آسانی مقدار LLW را کاهش دهد. ساده‌ترین روش، در صورت عدم نیاز، مخلوط نکردن پسمان‌های رادیواکتیو با مواد غیررادیواکتیو است. به‌علاوه کارخانه ایزوله سازی پسمان (به نام WIPP) واقع در جنوب شرقی نیومکزیکو، نخستین انبار زیرزمینی ایالات متحده برای دفن دائمی پسمان‌های با عدد اتمی بیشتر از اورانیوم است. این پسمان‌ها شامل عناصر مصنوعی سنگین‌تر از اورانیوم است (در جدول تناوبی پس از اورانیوم قرار دارند) که در جریان تولید سوخت هسته‌ای، آزمایشات هسته‌ای و بازسازی سوخت هسته‌ای تولید می‌شوند. پسمان‌ها عموماً شامل لباس‌های حفاظتی، ابزارها، شیشه آلات و وسایل آلوده به مواد رادیواکتیو می‌شوند.

بررسی و مانیتورینگ افراد و مکان‌ها: یک مؤسسه پرتوزا مسئول برنامه مانیتورینگ خود می‌باشد و باید یک واحد فیزیک بهداشت ذیصلاح تاسیس کند تا مسئولیت مانیتورینگ و اجرای

عملیات صحیح و سریع را در صورت نیاز بپذیرد. قوانین درون سازمانی بهداشت پرتو که ناظر بر روش‌های در حال اجراست، شامل کنترل کار دستگاه‌ها، مناطق ذخیره مواد رادیواکتیو، دفن پسمان، روش‌های اورژانس و مانیتورینگ افراد است. روش‌های عمومی مانیتورینگ در جدول (۹) خلاصه شده است. یک سیستم مانیتورینگ فردی میزان پرتوگیری شخص و مقدار زمینه را تعیین می‌کند. دُزیمترهای رایج با قابلیت تعیین مقدار پرتوگیری بتا، گاما و اشعه ایکس، شامل دُزیمترهای ترمولومینسانس TLD، فیلم بچ و دُزیمتر انگشتی و دُزیمترهای جیبی که برای نواحی دُز بالا مناسب است، تکمیل می‌شوند. برخی موارد خاص ممکن است مستلزم اندازه‌گیری رادیواکتیویته در بدن یا مدفوع باشد. برای مثال ممکن است در آنالیز ادرار از تابش تریتیوم، C-14، S-35 یا P-32 استفاده شود و یا فردی که با رادیوید کار می‌کند، به سنجش تیروئید آن نیاز باشد. پردازش و تفسیر فیلم‌بچ باید توسط آزمایشگاه‌های خاص یا آژانس‌های دولتی انجام شود. صحت کارکرد، مانیتورینگ‌های فردی باید با مقایسه با آشکارسازهای کالیبره شده در آزمایشگاه معتبر ملی، تأیید شوند. یک سیستم مانیتورینگ فردی باید برای کسی که ممکن است تحت تابش بیش از یک دهم دُز مؤثر مجاز جدول (۶) قرارگیرد، کارایی داشته باشد. برای یک برنامه مانیتورینگ مؤثر، تجهیزات آشکارسازی و اندازه‌گیری پرتو مورد نیاز است. این تجهیزات باید براساس میزان حساسیت و هدف مورد نظر انتخاب شوند. خلاصه‌ای از چند دستگاه آشکارسازپرتو شامل مشخصات، فواید و مضرات آن‌ها در جدول (۱۰) آورده شده است. نکته مهم این است که همه دستگاه‌ها باید بطور صحیح کالیبره باشند. دستگاه‌های بررسی‌گر برای تشخیص مکان‌هایی است که احتمال آلودگی دارند، بررسی‌گرهای Wipe (نمونه‌گیرهای کاغذ صافی) برای تشخیص محدوده آلودگی (تریتیوم احتمالاً فقط بوسیله wipe survey تشخیص داده می‌شود) است. برای مثال موادی نظیر کاغذ صافی یا اسفنج‌های پنبه‌ای برای تست یک نقطه آلوده مناسب است و با قرار دادن wipe در شمارشگر جرقه‌ای مایع، میزان آلودگی مشخص می‌شود.

مراقبت و پایش محیط: یک برنامه مانیتورینگ محیط داخل و خارج تاسیسات هسته‌ای شامل بررسی‌های قبل از انجام عملیاتی است که امکان آلودگی را فراهم می‌سازد. این کار اجازه ارزیابی پرتوتابی به محیط اطراف و ضرورت اعمال پیشگیرانه را فراهم می‌کند. برنامه باید از یک سو با قوانین بهداشتی و دیگر مقررات و از سوی دیگر با مدیریت تاسیسات همسویی داشته باشد. یک مرکز صنعتی مسئول مانیتورینگ نوع و مقدار تمام پسمان‌های رادیواکتیو و محیط داخلی خود است. پایش محیطی باید با همکاری مرکز صنعتی و مراجع قانونی انجام شود. حداکثر بارش رادیواکتیو از یک توده معمولاً در شعاع ۱ مایلی (۱/۶ کیلومتری) به سرعت رخ می‌دهد این

ناحیه باید حفاظت شود. مواد رادیواکتیو جامد، مایع و گاز می‌توانند در فواصل دور توسط هوا و آب جابه‌جا شده به زندگی گیاهان و جانوران و همچنین انسان‌ها آسیب شدید برسانند. بنابراین ضروری است که برنامه بررسی و مانیتورینگ داخل و پیرامون تاسیساتی که احتمال تابش‌دهی وجود دارد، تعریف شود. نیروگاه‌های هسته‌ای، کارخانه‌های فرآوری سوخت هسته‌ای، کارخانه جداسازی اورانیوم از سنگ معدن، رآکتورهای دانشگاهی، صنایع و آزمایشگاه‌های خاص از جمله این مؤسسات می‌باشند. مانیتورینگ باید با راهنمایی و کمک فیزیکدانان و متخصصان بهداشت پرتویی، زیست‌شناسی، هواشناسی، مهندسی محیط، زمین‌شناسی و سایر افراد آشنا با مشکلات و جغرافیای محلی طراحی شود. نمونه‌گیری برای تشخیص آلودگی باید شامل هوا، آب، شیر، غذا، گونه‌های جانوری، رسوب خاک و مردم باشد. تفسیر نمونه‌ها نیازمند نقشه‌های منطقه است که ویژگی‌های زمین‌شناختی و توپوگرافیک را به‌طور بارز نشان دهد. این اطلاعات وقتی با مدل‌های انتشار هوا که قبلاً آماده شده همسرعت شود امکان تخمین خطر مربوط به رها سازی مواد رادیواکتیو در یک منطقه وسیع و در شرایط آب و هوایی متفاوت ممکن می‌شود. نقشه‌ها باید شامل اطلاعات آب‌های سطحی و زیرزمینی، نوع خاک و گیاه، مراکز جمعیت، سیستم‌های انتقال، چشمه‌های تامین آب، مناطق گردشگری و سایر کاربری‌های زمین باشد. اطلاعات پیشینه هواشناسی شامل بادهای غالب و سرعت آن‌ها، دما و میزان بارش نیز مورد نیاز است. در یک کارخانه فرآوری سوخت هسته‌ای، امکان بالقوه رهاسازی I-131، K_r-85 و تریتیوم وجود دارد. با ذخیره‌سازی حداقل ۱۰۰ روز قبل از پردازش عناصر سوخت هسته‌ای، آزادسازی I-131 حداقل می‌شود. رهاسازی کریپتون بطور عمده توسط رآکتور هسته‌ای انجام می‌شود و تاکنون امکان جداسازی آن قبل از تجمع به‌طور مؤثر فراهم نشده است. امکان ترخیص تریتیوم تابحال فراهم نشده است و پسمان آن به صورت مایع یا گاز است. مراقبت‌های دقیق برای اطمینان از حداقل آزادسازی این رادیونوکلوئیدها در یک محدوده قابل قبول، لازم است. نمونه برداری از تاسیسات هسته‌ای بسته به شرایط آن، ترکیبی از موارد زیر است:

هوای اطراف تاسیسات و در چند فاصله، همانطور که در بالا اشاره شد

آب ورودی به تاسیسات، جریان ورودی و خروجی آب رودخانه، همچنین آب چاه‌های اطراف تاسیسات

خاک کاملاً نزدیک تاسیسات و از چند فاصله، که شامل لجن‌های کف رودخانه نیز می‌شود.

نمونه‌های بیولوژیکی در صورت وجود، ماهی، آهوی کوهی، گاو، جوندگان، گیاهان (مخصوصاً

آن‌هایی که مصرف غذایی دارند)، همچنین حلزون، اردک، پلانکتون‌ها و سایر گونه‌های زنده

شیر از کشاورزان حومه که دارای تاسیسات لبنی هستند

فضاها محیط‌های بسته، معابر و کانتینرها،

جدول ۹-۱- روش‌های مانیتورینگ پرتو

ابزار مورد استفاده	روش‌های آماده سازی	موارد مونیتورینگ
آشکارساز یدور سدیم با مولتی چانل آنالیزر برای تعدادی از تابش‌های گاما، آشکارساز ژرمانیوم برای هر نوع تابش گاما، آشکارساز ژرمانیوم صفحه‌ای برای آلفا توام با ایکس.	قرار دادن بخشی از بدن فرد در مقابل آشکارساز و شیلد تابش‌های مازاد	بدن، یا بخشی از بدن (تابش ایکس و گاما)
آشکارسازهای جرقه‌زن مایع برای آلفا یا بتا، اسپکتروسکوپی آلفا، کنتور گایگر برای بتا پرنرزی یا گاما، مولتی چانل برای گاما	قرار دادن هر جامدی در حلال، جداسازی شیمیایی اگر چند نوع عنصر رادیواکتیو موجود باشد، رسوب دادن لایه نازک یا مخلوط نمودن با آشکارساز جرقه‌زن مایع	ادرار، خون و مدفوع
دُزیمتر ترمولومینسانس، فیلم بیج و دُزیمتر الکترونیکی	مدیریت دُزیمتر برای تولید ترمولومینسانس ظهور فیلم، ندارد	مونیتورینگ فردی از تابش‌های خارجی (بتا و گاما)
کنتور گایگر	ندارد	آلودگی (منتشر کننده‌های بتا و گاما)
کنتور تناسبی	ندارد	آلودگی (منتشر کننده آلفا)

منبع: تطبیق یافته از ATSDR، پروفایل سم‌شناسی برای پرتوهای یونساز، دپارتمان بهداشت و خدمات انسانی، سرویس بهداشت عمومی، آژانس مواد سمی و ثبت بیماری، GA، ۱۹۹۹

جدول ۱۰-۱- ابزار آشکارسازی پرتوها

آشکارساز	نوع پرتو	محدوده حساسیت	استفاده	حداقل انرژی قابل اندازه گیری	وابستگی به جهت	مزیت	عدم مزیت
کنتور جرقه‌ای	X,β,γ نوترون	mR/h -۲۰ ۰/۰۲	بررسی	۲۰KeV برای X و برای β متغیر	برای γ, X کم	حساسیت بالا و پاسخ سریع	شکنده، نسبتا گران،
کنتور گایگر	X,β,γ	mR/h ۰/۲-۲۰ یا ۸۰۰۰۰-۸۰۰ counts/min	بررسی	۲۰KeV برای X و β برای ۱۵۰KeV	برای γ, X کم	پاسخ سریع	وابستگی شدید به انرژی، عدم پاسخ در پرتوهای سریع حساس به میدانهای میکروویو
اتافک یونساز	X,β,γ	R/h ۳-۵۰۰	بررسی	۲۰KeV برای X و برای β متغیر	برای γ, X کم	وابستگی کم به انرژی	حساسیت نسبتا کم، پاسخ آهسته
کنتور آلفا	آلفا	Alpha/min ۱۰۰۰۰-۱۰۰	بررسی	متغیر	زیاد	طراحی مخصوص آلفا	پاسخ آهسته، پنجره شکننده
فیلم	X,β,γ نوترون	۱۰mR به بالا	بررسی و مانیتورینگ	۲۰KeV برای X و ۲۰۰KeV برای β	متوسط	ارزان، تخمین دُز، ثبت دائمی	خوانش غلط ناشی از حرارت، فشار و بخار، تغییر پاسخ به نوع فیلم و بیج، وابستگی شدید به انرژیهای کم اشعه X
اتافک و دُزیمتر جیبی	X, γ	mR ۲۰۰ تا R ۲۰۰	بررسی و مانیتورینگ	۵۰ KeV	کم	نسبتا ارزان، تخمین دُز، کوچکی	تخیله الکتریکی اتفاقی
کنتور BF3	نوترون	Counts/min ۱۰۰۰۰۰-۰	بررسی	حرارتی	--	مخصوص نوترون	

منبع: انستیتو آموزشی حفاظت پرتو، گزارش شماره ۳۲ NCRP واشنگتن DC جولای ۱۹۶۶ جدول ۶ صفحه ۲۸ و ۲۹ ، نکته: تمام وسایل مانیتورینگ باید در انستیتو استاندارد بطور دوره‌ای کالیبره شوند

ایستگاه‌های نمونه برداری معمولاً روی سایت مورد پایش، در چند محل و در نزدیکی آن می‌باشد. ایستگاه‌هایی که در مجاورت سایت قرار دارند ترجیحاً بطور مرتب و ثابت مانیتورینگ می‌شوند. ایستگاه‌های دورتر که امکان نمونه‌برداری دوره‌ای دارند به عنوان ایستگاه مرجع با دیگر مراکز نظیر اداره هواشناسی، دپارتمان بهداشت، دانشگاه، گروه زمین شناسی امریکا، ایستگاه رادیویی و یک فرودگاه برای پشتیبانی اطلاعات همکاری می‌کند. نمونه‌های رودخانه‌ای شامل آب، لجن و گونه‌های زنده است. سفال‌ها و تخته سنگ‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات بیولوژیک مناسبند. یک ایستگاه مونیتورینگ می‌تواند دارای نمونه بردار پیوسته آب، نمونه بردار حجم هوا، صافی نیترات نقره، فیلم بچ، کاغذ چسب، ژل سیلیکا، باران سنج، اتاقلک یونساز و امکانات یا تجهیزات مشابه باشد زیرا معرف تجزیه و تحلیل آسان و صحیح هستند. مانیتورینگ هوای اطراف یک رآکتور آب جوش توسط توماس تشریح شده است. در این سیستم در شعاع ۱ مایلی بر روی یک شبکه با فاصله ۵۰۰ فوت، ۵۰ دُزیمتر ترمولومینوسنت پخش شده است. سه ایستگاه مانیتورینگ هوا از ذرات معلق هوا، رادیوید، ریزش‌های رادیواکتیو سنگین و آب باران نمونه برداری می‌کنند. فیلترهای هوا به طور مداوم توسط کنتور گایگر-مولر حساس به بتا و گاما اسکن و اطلاعات به مرکز کنترل گزارش می‌شود. به علاوه چهار مانیتورینگ هوا در حدود ۱۰ مایلی مناطق شهری، به طور پیوسته داده‌ها را به مرکز کنترل ارسال می‌کنند. نمونه‌های ترکیبی به‌طور هفتگی توسط ایستگاه‌های با فاصله ۴۰ مایلی از تاسیسات هسته‌ای جمع‌آوری می‌شود. مانیتورینگ هوا با نمونه برداری از ماهی، صدف، جلبک و سایر موجودات زنده بومی، همچنین شیر، آب، گیاه و خاک تکمیل می‌شود. آژانس‌های ایالتی و فدرال مسئول حفظ بهداشت عمومی هستند.

حدود راهنما برای استفاده‌های پزشکی منابع تابش

آزمایشات تشخیصی پزشکی و دندانپزشکی از منابع قابل توجه پرتوگیری انسان است. ۳ میلیون آزمایش تشخیصی با اشعه ایکس در سال ۱۹۸۹ برآورد شده است. به علاوه هر سال بیش از ۶ میلیون آزمایش پزشکی هسته‌ای انجام می‌شود. برخی از خطرات مربوط به استفاده پزشکی منابع پرتوهای یونساز در ذیل آورده شده است. آموزش و ایجاد انگیزه در بخشی از حرفه پزشکی و دندانپزشکی و تکنسین‌های رادیولوژی، بیش از هر چیز دیگری قادر به کاهش پرتوگیری پزشکی است. پیشرفت‌های زیادی از طریق آموزش، کنترل دُز و کنترل تصویر و صدور مجوز صورت گرفته و پرتوگیری شغلی و حجم کار نیز ثبت می‌گردد.

تجهیزات اشعه ایکس تشخیصی

شرایط معمول به کارگیری اشعه ایکس، ولتاژ ۴۰ تا ۱۰۰ kV_p، شدت جریان تا ۱۰۰۰ mA و زمان تابش کسر کوچکی از ثانیه است. دستگاه باید مجهز به یک ولتاژ و زمان سنج کالیبره

باشد. فیلم‌های تند یا سریع و روش ظهور ثبوت صحیح بکار گرفته شود. لایه سربی در پشت کاست برای رادیولوژی سینه و رادیوگرافی‌های ایستاده و هر ناحیه‌ای که اشعه اولیه در جهت اتاق انتظار یا سایر نواحی اشغال شده نفوذ می‌کند، ضروری است. دستگاه اشعه ایکس ممکن است در ابتدا صحیح و اصولی نصب شده باشد، ولی بعداً دارای اشکال شود. برای مثال ساختمان تغییر کند، شیلدینگ از حالت اولیه خارج یا فیلتر و دیافراگم خراب شود. به علاوه افزایش دستگاه‌های اشعه ایکس در یک ساختمان باعث افزایش پرتوهای پراکنده به سطح نامطلوب شود. برخی از انواع مسایل حفاظت پرتویی و کیفیت تصویر، در ذیل آورده شده است:

- کوتاهی نمودن در محدود سازی پرتوی ایکس به قسمت مورد نیاز بدن بیمار.
- کوتاهی در استفاده از روپوش سربی برای حفاظت از گردن و غدد جنسی بیمار مخصوصاً کودکان
- اپراتور در حین تابش نتواند بیمار را ببیند و با آن ارتباط برقرار کند
- اپراتور، بیمار یا فیلم را در حین تابش نگه دارد، سوئیچ اکسپوز به نحوی تعبیه شده باشد که قسمتی از بدن اپراتور خارج از ناحیه کنترل، مورد تابش قرار گیرد.
- پرتوی اولیه و ثانویه از پنجره سربی عبور و به ناحیه مجاور که افراد در آن حضور دارند، برسد
- حضور پرتوهای پراکنده در زیر درها، اطراف و بالای پاراوان سربی یا داخل اتاق کنترل
- فاصله نادرست تیوب اشعه ایکس تا سطح پوست
- عدم کارکرد صحیح سوئیچ زمان اکسپوز، kVp و شدت جریان
- نبود فیلتر یا وجود فیلتر نابه‌جا برای حذف پرتوهای کم انرژی و فوتون‌هایی که ارزش تشخیصی ندارند.
- فرآیند ظهور و ثبوت نامناسب فیلم و پردازش فیلم بدون توجه به زمان، دما و کیفیت شیمیایی دارو
- تابش‌گیری بیش از حد فیلم به منظور جبران فرآیند ظهور و ثبوت ضعیف که باعث کاهش کیفیت تصویر و افزایش دُز بیمار می‌شود.
- شرایط نامناسب تاریک خانه (نشت نورسفید و عدم کیفیت لامپ قرمز)

یونیت‌های دندانپزشکی معمولاً در ۵۰ تا ۱۰۰ kVp و با شدت جریان ۷ میلی‌آمپر کار می‌کنند. ولتاژ دستگاه باید کاملاً کالیبره باشد. فیلم تند و حساس و تکنیک صحیح ظهور و ثبوت فیلم مهم می‌باشند. یک دستگاه با ۹۰ kVp با زمان تابش ۰/۵ ثانیه مشابه دستگاهی با ۵۰ تا ۷۵ kVp

و زمان تابش ۱/۵ ثانیه است. یک فیلم تند در مقایسه با فیلم کند میزان تابش به پوست را برای دستگاهی با ولتاژهای کمتر از ۶۰ kVp تقریباً ۳ برابر و برای دستگاه‌های با ۸۰ kVp یا بالاتر، ۹ برابر کاهش می‌دهد.

انتخاب زمان تابش صحیح به ازای هر کیلوولتاژ، میلی‌آمپر و فاصله تیوب-پوست برای هر رادیوگرافی بسیار ضروری است. محدودیت‌های حفاظتی که در برخی مطب‌های دندانپزشکی رخ می‌دهد، شبیه مواردی است که قبلاً فهرست شد. دستگاه فلوروسکپی با دستگاه رادیولوژی معمولی متفاوت است زیرا به طور مدام به مدت چند ثانیه اکسپوز می‌کند. یک رادیوگرافی تصویر دقیقی از بدن بیمار را در حالی که بخش کمی از بدن مورد تابش قرار می‌گیرد نشان می‌دهد بنابراین فلوروسکپی زمانی مورد استفاده دارد که رادیوگرافی نتواند اطلاعات لازم را فراهم کند. استانداردهای اجرایی FDA برای دستگاه فلوروسکپی شامل حفاظ پرتوهای اولیه، محدود کننده میدان اشعه، سویچ پدال پایی، حداقل فاصله تیوب از سطح بدن بیمار و یک زمان سنج و محدود کننده دُز-ریت به 5R/min (یا 10R/min بوسیله سیستم کنترل اکسپوز خودکار). دستورالعمل EPA برای نماینده‌های ایالتی در جهت حذف آزمایشات بی‌حاصل، استفاده از روش‌های بهینه، به خدمت گرفتن دستگاه‌های اشعه ایکس مطلوب، تهیه شده است. این دستورالعمل‌ها برای موسسات غیردولتی نیز قابل اجرا و مفید است و با وجود قدیمی بودن، هنوز حاوی دستورات بسیار خوبی است و در اینجا بیان می‌شود.

۱. تجویز آزمایشات رادیوگرافی یا فلوروسکویی باید توسط پزشکان یا متخصصان اورتوپدی دارای پروانه کار صادر شود. آزمایشات تخصصی، توسط پزشکان متخصص که تحت نظر مستقیم سوپروایزر آموزش دیده و مهارت کافی پیدا نموده‌اند درخواست شود، این آزمایشات فقط توسط متخصصان با تجربه ارزیابی شود. دندانپزشکی و اورتوپدی از استثناهای روش‌های ویژه است.

۲. تجویز آزمایشات رادیولوژی به منظور کسب اطلاعات تشخیصی باید براساس ارزیابی بالینی و نشانه‌های بیماری انجام شود و هدف مرتبط با سابقه پزشکی بیمار را دنبال کند.

۳. اگر بیمار ارزیابی اولیه بالینی نشده، آزمایشات رایج غربالگری، نباید انجام شود مگر برای گروه خاصی از مردم و در صورتی که میزان بهره‌ت تشخیص پزشکی، خطرات پرتو و عوامل اقتصادی و اجتماعی آن در نظر گرفته شود. نمونه‌هایی از آزمایشات که به طور معمول نباید انجام شود مگر در موارد خاص عبارتند از:

- ا. آزمایشات رادیوگرافی ریه و پشت به عنوان آزمایش روتین و مورد نیاز استخدام
- ب. غربالگری سل با انجام رادیوگرافی ریه

ت. رادیوگرافی ریه بطور رایج برای پذیرش بیماران کمتر از ۲۰ سال یا رادیوگرافی لترال (نمای جانبی) ریه برای بیماران زیر ۴۰ سال مگر علائم بالینی بیماری ریه مشاهده شده باشد.

ث. رادیوگرافی ریه در مراقبت های رایج قبل از تولد

ج. ماموگرافی از خانم های زیر ۵۰ سال که بدون علامت بوده و سابقه سرطان پستان فامیلی متقن ندارند.

۴. تجویز آزمایشات رادیولوژی برای زنان حامله یا بیماری که احتمال حاملگی دارد، با

اطمینان از ملاحظات پزشکی در مورد سقط ناشی از تابش و اندازه گیری های لازم

۵. تعداد، توالی و انواع نماهای استاندارد یک آزمایش باید با محوریت ضروریات بالینی و

حداقل ممکن باشد. رادیولوژیست باید آزمایشات اشعه ایکس را به منظور رسیدن به

اهداف تشخیصی مورد نظر پزشک با حذف و جایگزین یا اضافه نمودن نماهای

درخواستی از نزدیک اجرا و مانیتورینگ کند. روش های تکنیکی برای انجام آزمایشات

اشعه ایکس پزشکی و دندانپزشکی باید در برگیرنده کلیه نماهای رادیوگرافیک

استاندارد، آماده سازی بیمار، استفاده از چارت تکنیک ها و آشکارسازهای ویژه تصویر

باشد.

۶. تجهیزات اشعه ایکس باید دارای استانداردهای FDA باشند و تجهیزات رادیولوژی

قدیمی ساخت قبل از اول آگوست ۱۹۷۴ حداقل دارای تأییدیه مقررات ایالتی کنترل

اشعه (40FR 29749) باشند. دستگاه های فلئوروسکوپی باید دارای مشدد تصویر

باشند، دستگاه های فلئوروسکوپی برای استفاده خاص باید دارای قابلیت الکترونیکی

نگهداری تصویر باشند و گرنه کاربرد بالینی آنها غیر عملی خواهد بود. تجهیزات

فتوفلئوگرافیک ایکس نباید برای رادیوگرافی ریه استفاده شود.

۷. تجهیزات اشعه ایکس باید دارای برنامه های اطمینان کیفی باشند تا رادیوگرافی های

تولیدی نیازهای تشخیصی را با کمترین دُز بیمار برآورده سازد. این برنامه ها باید

حاوی موضوعات و تجهیزات ویژه، کالیبره سازی تجهیزات و ضروریات نگهداری و

تعمیرات، کنترل کیفی پردازش تصویر و روش های اپراتوری برای کاهش تکرار

آزمایش باشد.

۸. اپراتوری دستگاه های اشعه ایکس پزشکی یا دندانپزشکی باید توسط افرادی انجام شود

که دارای مهارت و مدرک لازم برای تولید تصاویر با کیفیت و حداقل پرتوتابی باشند.

این مهارت باید با روش های ارزیابی ملی یا از طریق آموزش و تجربه عملی که هم ارز

یا بیش از برنامه های آموزشی سازمان های پروانه دهنده است، مورد تایید قرار گیرد.

۹. پرتوی ایکس تا حد امکان به ناحیه بالینی مفید و ابعاد گیرنده تصویر توسط کلیماتور محدود شود، برای جلوگیری از تابش‌گیری جنین و گوناد بیماری‌زایی که امکان تولید مثل دارد، (21CFR part 1000.50) از شیلد یا حفاظ استفاده شود به شرطی که در آزمایش اختلال ایجاد نکند.
۱۰. روش مورد استفاده از تجهیزات و مواد به‌گونه‌ای باشد که میزان تابش بدون کاهش اطلاعات تشخیصی به حداقل موجه شدنی برسد. در صورت امکان برای ارزیابی و کاهش پرتوتابی، اندازه‌گیری پرتو برای آزمایشات رادیوگرافی زیر انجام شود تا مقادیر دُز ورودی (ESAG) از مقادیر پیشنهادی زیر افزایش نیابد.
۱۱. رادیوگرافی‌های دندان باید توسط دندانپزشکان عمومی یا متخصص و بر اساس ارزیابی بالینی و سابقه بیمار، تجویز شود. تجویز رادیوگرافی تک دندان و تمام دهانی بدون ارزیابی بالینی و به منظور بررسی‌های دسته جمعی مجاز نمی‌باشد مگر در مواردی که توجیه قانونی داشته باشد.
۱۲. وسایل محدود ساز اشعه برای رادیوگرافی داخل دهانی استفاده شود تا پرتوی ایکس تقریباً به اندازه گیرنده تصویر (فیلم) محدود شود.

آزمایش (نما)	ESEG (میلی رونتگن) ^a
ریه (P/A)	۳۰
جمجمه (جانبی)	۳۰۰
شکم (A/P)	۷۵۰
مهره‌های گردن (A/P)	۲۵۰
مهره‌های سینه (A/P)	۹۰۰
مهره‌های پشتی (A/P)	۱۰۰۰
پیلوگرام (A/P)	۹۰۰
پاها (D/P)	۲۷۰
دندان (پری اپیکال)	۷۰۰

توجه: این مقادیر وقتی از دستگاه‌های نو، مشدد تصویر و فیلم‌های بهتر استفاده شود کاهش می‌یابد.
^a پرتودهی برای بیمار با مشخصات: ضخامت سر ۱۵، گردن ۱۳، قفسه سینه ۲۳، شکم ۲۳ و پاها ۸ سانتیمتر توسط برنامه ارزیابی ملی تعیین شده است.

کنترل‌های لازم، شاخص‌های فاکتورفنی، شرایط تایمر اکسپوز، دقت و تکرار پذیری، شاخص و محدودیت اندازه میدان و انواع فاکتورهای عملیاتی دیگر به منظور اجرای استانداردهای FDA

برای کلیه تجهیزات رادیوگرافی (مثل رادیوگرافی دندان، ماموگرافی، فلوروسکپی، فلوروسکپی دیجیتال و CT) تابع تکنولوژی مربوطه است، به علاوه، بسیاری از ایالت‌ها دستورالعمل‌های اجرایی را برای اطمینان از بهینه بودن تصاویر در عین رسیدن به حداقل دُز بیمار و کارکنان رادیولوژی تدوین نموده‌اند. در هر مورد، تنها راهبرد برای کسب اطمینان از سالم‌ترین و مفیدترین عملیات، اجرای برنامه اطمینان کیفی (QA) و حفاظت پرتوهاست که با تست و چک کردن همه تجهیزات و فرایندها طبق جدول زمانبندی قابل اجراست.

تجهیزات درمانی اشعه ایکس

دستگاه‌های پرتودرمانی اساساً با دستگاه‌های تشخیصی متفاوت است در آنها اشعه ایکس با انرژی‌های بالا تا 20 MeV توسط شتابدهنده‌های خطی تولید می‌شود. به علاوه دُز بیمار که برای درمان سرطان بکار می‌رود، معمولاً در حدود ده‌ها گری است. بنابراین حتی یک اشتباه کوچک در پرتودرمانی می‌تواند بسیار زیانبار و گاهی کشنده باشد. طراحی شیلدینگ دقیق و یک برنامه QA جدی در اینجا کلاً مهم‌تر از سایر موارد است و حضور پرسنل مجرب و ماهر بسیار اساسی است. علاوه بر مسایل یاد شده، گاهی بازرسان شاهد شیلد ناکافی برای پرتوهای اولیه و ثانویه، خرابی یا فقدان وسایل حفاظتی نظیر کلید قطع کن درب، کالیبراسیون ناکافی و خطرات الکتریکی هستند.

رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در درمان

از موارد دیگر پرتودرمانی استفاده از رادیوایزوتوپ‌های خاص است. برخی از رادیوایزوتوپ‌ها تزریق (-) 131 برای سرطان تیروئید) و برخی درون کپسول یا بسته‌های مهروموم شده قرار دارند، مثل چشمه‌های مکعبی برای تابش خارجی (Co-60)، دانه‌ای (Ir-192) و سوزن‌های Cs-137 و Ra-226 که قبلاً به طور وسیع استفاده می‌شده است. این مواد نیازمند همان ملاحظات دقیقی است که روش‌های الکترونیکی آنها (upload) دارند. به علاوه کادر پزشکی که با دانه‌ها و سوزن‌ها کار می‌کنند در نزدیکی چشمه خواهند بود و ممکن است هنگام تزریق به بیمار در طول درمان، پرتوگیری نمایند. به خاطر این نزدیکی، ضروری است همه کادر درمانی مرتبط، آموزش‌های مخصوص دیده تحت نظارت مستقیم قرار گیرند. اگر یک کپسول گم شود یا بشکند، دپارتمان-های بهداشتی ایالتی و منطقه‌ای باید فوراً مطلع شوند.

منابع پرتو ایکس و دیگر پرتوهای مورد استفاده در صنعت و تجارت

دستگاه‌های پرتوهای ایکس صنعتی و تجاری عمدتاً شامل موارد زیر هستند:

1. دستگاه‌های رادیوگرافی و فلوروسکپی برای نشان دادن معایب جوشکاری و ریخته‌گری.
2. دستگاه‌های فلوروسکپی برای نشان دادن مواد خارجی مثلاً در غذاهای بسته بندی شده.
3. پرتوهای یونساز برای پاستوریزه کردن غذا، استریل کردن کالاهای پزشکی و سایر اهداف

۴. آزمایشات فلوروسکپی به منظور عملیات ایمنی و ضدخراشکاری (دستگاه‌ها شناسایی اشیاء ممنوعه مثلاً در فرودگاه)

۵. چشمه‌های بسته رادیواکتیو برای اندازه‌گیری چگالی و ضخامت محصولات و تعیین سطح مایعات در تانک‌ها

مولدهای پرتو مورد استفاده در صنعت، آموزش و تحقیقات شامل شتابدهنده‌های خطی (الکترونی) و سایر شتابدهنده‌های ذره‌ای، ژنراتورهای نوترون و دستگاه‌های پرتوی ایکس مخصوص است. خطرات این دستگاه‌های ولتاژ بالا، مشابه تجهیزات پزشکی است. استانداردهای FDA برای سیستم‌های پرتو ایکس حفاظدار نظیر دستگاه‌های بازرسی بار مسافر عبارت است از: در ماکزیمم شرایط حد مجاز تابش در ۵ سانتیمتر 0.5 mR/hr ، محدودیت مواجهه به پرتوی اولیه، لزوم دو قفل برای هر درب که هر یک باعث قطع برق اصلی شود، کلید کنترل، دو شاخص مستقل اشعه ایکس، شاخص و برچسب هشداردهنده و دستورالعمل کاربر. لامپ‌های تلویزیونی، دستگاه پراش‌سنجی و هر وسیله‌ای که با ولتاژ بالا، اشعه ایکس تولید کند. حتی لامپ‌های تلویزیون خانگی نیز اشعه ایکس تولید می‌کند اما خطر ندارند زیرا اشعه ایکس نرم تولیدی توسط شیشه لامپ جذب می‌شود. هرچند اگر برای تولید تصاویر رنگی بهتر، از ولتاژهای بیش از حد مجاز استفاده شود یا طراحی حفاظ صحیح نباشد، این تیوب‌ها نیز می‌توانند مشکل‌ساز باشند. تحت بدترین شرایط، در فاصله ۵ سانتیمتری (حدود ۲ اینچ) میزان پرتو نباید از 0.5 mR/hr تجاوز کند. در هر حال مشاهده تلویزیون در فاصله حداقل ۶ فوت پیشنهاد می‌شود. برقراری روش‌های صحیح QA در سیستم‌های تشخیصی درمانی منجر به آشکارسازی همه خطرات بهداشتی و سایر مشکلات مرتبط با به‌کارگیری تجهیزات و روش‌های پرتوهای یونساز می‌شود. آشکارسازی بعضی معایب دستگاه یا اجرایی ممکن است نیازمند تستگرهای اختصاصی و همچنین استفاده صحیح از آنها نیازمند افراد آموزش دیده و مجرب باشد، اما نسبت سود به هزینه این آزمایشات بسیار زیاد است.

حفاظت پرتوهای غیر پزشکی

مدیریت پسمان رآکتور هسته‌ای

بعضی رادیوایزوتوپ‌ها موجود در پسمان رآکتورهای هسته‌ای، در جدول (۱۱) فهرست شده است. سوخت‌های مصرف شده رآکتور، پسمان سطح بالا محسوب می‌شوند. وقتی مجموعه سوخت در قلب رآکتور برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفت مقدار زیادی از محصولات شکافت داخل پوشش فلزی سوخت باقی می‌ماند. از آنجا که سوخت‌های مصرف شده نیروگاه‌های تجاری ایالات متحده، بازیافت نمی‌شوند لذا به روش‌های بهداشتی باید دفع شوند. هنگام

خروج سوخت مصرف شده از رآکتور، ابتدا به منظور واپاشی مواد رادیواکتیو برای مدتی در استخر سوخت‌های مصرفی نگهداری می‌شوند. به منظور محدود سازی گرما و تابش پرتوهای حاصل از شکافت هسته‌ای، پسمان‌های سوخت باید زیر آب استخرنگهداری شوند. استخرهای پسمان سوخت معمولاً در محل سایت هستند. ولی برای نگهداری پسمان چند نیروگاه بعضی استخرها خارج از محل سایت ساخته شده‌اند.

جدول ۱۱-۱- رادیوایزوتوپ‌های موجود در پسمان‌های هسته‌ای

نیمه عمر	پرتو	چشمه	مواد
۱۰ سال	بتا، گاما	محصول شکافت	کریپتون-۸۵ Kr-85
۲۸ سال	بتا	محصول شکافت	استرنسیم-۹۰ Sr-90
۸ روز	بتا، گاما	محصول شکافت	ید-۱۳۱ I-131
۳۰ سال	بتا، گاما	محصول شکافت	Ce-137
۵۷۷۰ سال	بتا	محصول شکافت	کربن-۱۴ C-14
۲۴۵ روز	بتا، گاما	محصول فعال‌سازی نوترونی	روی-۶۵ Zn-65
۵ سال	بتا، گاما	محصول فعال‌سازی نوترونی	کبالت-۶۰ Co-60
۴۵ روز	بتا، گاما	محصول فعال‌سازی نوترونی	آهن-۵۹ Fe-59
۱۲ سال	بتا	محصول فعال‌سازی نوترونی	ترتیوم H-3

پیشنهاد شده توسط ICRP و NCRP همچنین مقدار معینی است در انگلیس و استاندارد FDA امریکا.

پس از چند سال، اکتیویته ناشی از تجزیه محصولات شکافت، به میزان کافی کاهش یافته لذا امکان نگهداری پسمان‌ها با سیستم‌های خنک کننده هوا، در شرایط خشک و روی سطح زمین فراهم می‌شود. این تجهیزات باید قادر به خروج گرمای حاصل از پسمان سوخت و محدود سازی تابش پرتوها باشند. در حال حاضر تجهیزات ثابتی برای دفع پسمان‌های تجاری با اکتیویته بالا وجود ندارد. البته در سایت کوهستان یوکا، در نوادا، ایجاد تجهیزات ثابت دفع زمینی پسمان‌ها بطور جدی مورد مطالعه است.

همه پسمان‌هایی که اکتیویته سطح بالا ندارند، پسمان‌های رادیواکتیو سطح پایین نامیده می‌شوند. منبع اصلی آلودگی در نیروگاه هسته‌ای، عامل خنک کننده یعنی آب و تجهیزات مربوطه است. آب حاوی محصولات فعال‌سازی و مقدار بسیار اندکی از محصولات شکافت است. پسمان رادیواکتیو سطح پایین می‌تواند به شکل جامد، مایع یا گاز در نقاط نشستی تجهیزات، دریچه‌ها، منافذ و زهکش‌ها، در زهکش کف، در کارتریج‌های فیلتر و رزین‌های نمک زدایی یافت شود. محصولات فعال‌سازی که توسط سیستم خنک‌کننده رآکتور حمل می‌شوند، به وسیله فیلترها و نمک‌گیرها در سیستم‌های تصفیه جمع‌آوری می‌شوند. با پُر شدن فیلترها و رزین‌های نمک-

گیر، به عنوان پسمان رادیواکتیو دفع می‌شوند. یک حوله کاغذی یا پارچه‌ای که برای تمیز کردن روغن یا آب رادیواکتیو استفاده می‌شود، یک پسمان رادیواکتیو است و نباید مورد استفاده قرار گیرد.

برنامه ریزی و واکنش موارد اورژانس.

WHO نیز حدود راهنمای دُز متعاقب انتشار آلودگی حوادث پرتویی بزرگ را برای عموم مردم تدوین کرده است. بر مبنای این توصیه‌ها، وقتی کل بدن دُز تقریبی 500mSv در مدت کوتاهی جذب کند، پناه‌دهی، تخلیه و رفع آلودگی افراد ممکن است ضروری باشد که شامل تجویز قرص‌های ید پایدار می‌باشد. در دُز کل بدن ۵ تا 50mSv، اندازه‌گیری‌های حفاظتی (پناه‌دهی و کنترل خواربار) توصیه می‌شود. برای دُزهای کمتر از 5mSv هیچ فعالیتی توصیه نمی‌شود. جذب غذا و مایعات در واحد بکرل بر کیلوگرم یا بکرل بر لیتر اندازه‌گیری می‌شود. هدف از این برنامه-های حفاظتی اطمینان از عدم جذب دُز بیش از 5mSv افراد از طریق مواد غذایی در سال اول پس از حادثه است. این امر نیازمند مانیتورینگ سطوح آلودگی غذا و آب شرب بر پایه نوع و مقدار غذای مصرف شده و تخمین مجموع جذب آلودگی توسط مسئولین است.

پرتوهای غیر یونساز:

پرتوهای غیر یونساز عموماً به صوت و طیف الکترومغناطیس به جز قسمت پرنرژی آن اشاره می‌شود. این پرتوها در تمام اشکال خود با ماده از طریق انتقال، بازتاب و یا جذب، واکنش می‌کنند. جذب انرژی آن (معمولاً گرمایی) منجر به اثرات سوء می‌شود.

برای پرتوهای غیر یونساز، واحدهای فیزیکی تابش معمولاً وات بر سانتیمتر مربع (شدت تابش) یا وات بر واحد زاویه فضایی (شدت درخشندگی) است. برای امواج میکروویو و رادیویی، واحد دُز SAR طراحی شده که میزان جذب اختصاصی است و با واحد وات بر کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شود. SAR به طور مشخص به فرکانس موج و اندازه، شکل و ترکیب مواد موضوع مورد تابش وابسته است. البته بازتاب امواج غیر یونساز درون مواد مرکب (مثل بدن انسان) اندازه‌گیری دُز را پیچیده می‌کند.

بعضی کالاهای الکترونیکی در صورتی که به خوبی طراحی، ساخته، نصب یا استفاده نشوند، می‌توانند امواج خطرناک ساطع کنند. دپارتمان بهداشت و خدمات انسانی (DHHS) سازمان FDA، مسئولیت حفاظت عموم مردم از امواج غیر ضروری حاصل از انواع محصولات الکترونیکی شامل امواج صوتی، فرصوتی، فراصوتی و نورفرا بنفش را به عهده دارد. پاره‌ای از محصولات الکترونیکی به جز آنهایی که امواج الکترومغناطیس یونساز تولید می‌کنند، عبارتند از: دستگاه‌های شوینده و استریل‌کننده، دستگاه جوش کاری، سیستم‌های هشداردهنده، مخازن خلاء، رگولاتور ولتاژ،

سوئیچ های خلاء، یکسوسازها، لامپ های برنزه کننده، منابع نورسیار، امواج رادار و سایر منابع میدان های مغناطیسی قوی. FDA توصیه و استانداردهای اجرایی برای محصولات لیزری، لامپ-های بخار جیوه، اجاق های مایکروویو، دستگاه های فراصوت درمانی، لامپ های خورشیدی و سایر محصولات الکترونیکی را منتشر کرده است.

امواج الکترومغناطیسی غیر یونساز

امواج الکترومغناطیسی غیر یونساز شامل امواج مایکروویو و میدان های الکترومغناطیس قوی است که در اجاق های مایکروویو و دستگاه های دیاترمی موجود است همچنین شامل: رادار، پرتو فرسرخ، نور مرئی برای دیدن جزئیات و رنگها، امواج فرکانس رادیویی، نور فرابنفش که در استریل سازی، عفونت زدایی، تشخیص و درمان استفاده می شود و لیزر و میزر که در پزشکی، صنعت، امور نظامی و تحقیقات استفاده می شود. (لیزر مستقیماً یا پس از انعکاس می تواند باعث آسیب چشم، گناد و سیستم عصبی مرکزی شود). لیزرها می توانند فواصل بسیار طولانی را طی کنند و برای برش، سوراخ کردن و جوش دادن و همچنین در سیستم های ارتباطی، در سیستم های کامپیوتری، برای ایجاد خطوط و تعیین درجات در نقشه برداری، برای آشکارسازی میزان آلودگی و همچنین در روش های جراحی خاص مورد استفاده قرار می گیرند. جراحان برای استفاده از لیزر باید مجوز داشته باشند.

نور فرابنفش: پرتوهای فرابنفش (UV یا UVR) می تواند از منابع طبیعی (عمدتاً خورشید) یا مصنوعی منتشر شوند. منابع مصنوعی شامل لامپ های بخار جیوه و محصولات متنوعی است که خاصیت میکروب کشی دارند. این محصولات در بیمارستان ها، آزمایشگاه ها، مدارس و صنایع خاص استفاده می شود. برای درمان بیماری های پوستی و جلوگیری از کمبود ویتامین D لامپ-های مخصوصی به کار می رود. فرابنفش درمانی باعث برنزه یا آفتاب سوختگی می شود. استفاده-های نادرست درمانی، شغلی یا تفریحی، یا نداشتن عینک حفاظتی می تواند منجر به آسیب پوست یا چشم شود. شیشه های معمولی پنجره و اغلب مواد شفاف، پرتو فرابنفش را جذب ولی کوارتز و فلوریت اجازه عبور می دهند. FDA الزام نموده، لامپ های خورشیدی (حمام برنزه) ساطع کننده پرتوهای فرابنفش، عمدتاً فرابنفش A (320-400nm)، باید به زمان سنج کالیبره شده در هر لامپ مجهز باشند که به طور خودکار در پایان زمان تعیین شده، که بر مبنای شدت UV مشخص شده، خاموش شوند و همچنین کلید دستی، پایه مخصوص برای لامپ های خورشیدی که نتوانند در جالامپ چراغ های معمولی بکار روند و عینک محافظ برای افرادی که از لامپ ها استفاده کنند. از الزامات دیگر، الصاق نوشته هایی است که به کاربران توصیه کند برای

هرکار درمانی ابتدا با پزشک مشورت و دستورات استفاده از تجهیزات را به دقت رعایت کنند. در کنفرانس متخصصان دولتی بهداشت صنعتی آمریکا، توصیه شده تابش به پوست و چشم نباید از 1mW/cm^2 برای مدت بیش از ۱۰۰۰ ثانیه، تجاوز کند. نور فرابنفش UV-B (290-320nm) و UV-C ($<280\text{nm}$) خطرناکترند. نورخورشید که از جو عبور می‌کند، ترکیبی از UV-A و UV-B است. اگر حباب خارجی لامپ شکسته و قسمت داخلی کماکان در حال کار باشد امواج خطرناک UV با طول موج‌های کوتاه عبور می‌کنند، لامپ‌های بخار جیوه می‌توانند در فاصله ۳۰ فوتی باعث سوزش شدید چشم و سوختن پوست شود. شیوع التهاب چشم و اریتمای پوست در ورزشگاه‌های عمومی ناشی از لامپ‌های بخار جیوه بدون حفاظ، گزارش شده است. سرطان پوست، پیری زودرس پوست و آسیب‌های چشمی می‌تواند ناشی از تابش‌های مکرر فرابنفش باشد هر چند این اثرات ممکن است تا ۱۰ یا ۲۰ سال آشکار نشوند. یک کلید قطع جریان لازم است تا در صورت سوراخ یا شکستن حباب خارجی لامپ، حفاظت را انجام دهد. فسفرپوشی حباب خارجی در صورت استنشاق می‌تواند مضر باشد. استفاده از لامپ‌ها در ورزشگاه‌ها، مدارس، فروشگاه‌ها و مکان‌های صنعتی، بدون سوئیچ قطع کن، باعث خطرات احتمالی ناشی از تابش امواج کوتاه فرابنفش می‌شود. لامپ‌های سیاه یا لامپ‌های چوب دارای شیشه خاصی است که نور مرئی را جذب ولی پرتوهای UV با طول موج تا 250nm، عمدتاً طول موج 366nm جیوه را عبور می‌دهند و برای تولید فلئوئورسانس در شوره سر، رنگ‌های خاص در غلظت‌های کم و نمایش گرد و خاک رستوران‌ها و همچنین مقاصد تفریحی استفاده می‌شود.

لیزرها: اگر اتم‌های یک شی به ترازهای بالاتر انرژی برانگیخته شوند، وقتی الکترون‌ها خودبخود به تراز پایین‌تر برگردند، نور آزاد می‌کنند. در لیزر (تقویت نور از طریق تابش تحریک شده پرتو)، اتم‌های هدف تمایل دارند تا در حالت برانگیخته درنگ کنند تا زمانی که به طور همفاز و همزمان گذار مشابه انجام دهند. در نتیجه این امکان برای تعداد زیادی از فتون‌ها بوجود می‌آید که همه در انرژی (طول موج) و فاز مشابه خواهند بود. لذا شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی بسیار زیاد می‌شود. لیزرها کاربردهای بسیار متفاوتی در علوم، صنعت و پزشکی دارند. برای سال‌ها، لیزرها در اندازه‌گیری‌های دقیق علمی یا صنعتی و روش‌های تخصصی پزشکی استفاده گسترده داشتند. از زمان ورود اسکنرهای بارکد سوپرمارکت و نشانگرهای لیزری، لیزرها عملاً همه جا حضور یافتند. جراحی لیزر برای تصحیح نزدیک بینی، یک تجارت با سود چند میلیون دلار در سال شده است. اگرچه لیزرها رواج بسیار یافته، اما استفاده صحیح آن‌ها هنوز به حفاظت و پیشگیری نیاز دارد. نور می‌تواند الکترون‌های اتم یا مولکول را به سطوح انرژی یا

حالت‌های ارتعاشی بالاتر برانگیخته و انرژی اضافی را به صورت گرما آزاد کند. این امر مخصوصاً در مورد لیزرها به دلیل دانسیته انرژی و شدت میدان الکتریکی بسیار زیاد، با اهمیت است. خطرات بالقوه لیزر، به طول موج که اغلب با نانومتر (nm) اندازه‌گیری می‌شود و توان خروجی لیزر که با میلی وات (mW) محاسبه می‌شود، وابسته است. لیزرهای با طول موج نزدیک به نور مرئی، می‌توانند به قرنیه، عدسی و شبکیه چشم آسیب وارد کنند. لیزرهای با طول موج ۲۰۰ تا ۳۱۵ نانومتر روی قرنیه، ۳۱۵ تا ۴۰۰ نانومتر روی عدسی و ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر روی شبکیه اثر می‌گذارند و طول موج ۱۴۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر روی قرنیه و عدسی هردو مؤثرند. تابش لیزر UV، علاوه بر خطرات چشمی می‌تواند منجر به افزایش ریسک سرطان پوست یا پیری زودرس پوست شود. لیزرهای پرتوان می‌توانند باعث سوختگی پوست شوند. در بسیاری موارد، لیزرهایی که خارج از محدوده طول موج مرئی قرار دارند (مثل UV یا فرورسرخ) می‌توانند خطرناکتر باشند، زیرا پرتوی آنها نامرئی است. و بالاخره خطرات غیرپرتویی لیزر شامل شوک الکتریکی، تابش شیمیایی، مایعات برودتی، گازهای فشرده و گازها و بخارات سمی است.

لیزرها براساس خطرات بالقوه به طبقات زیر تقسیم می‌شوند:

کلاس ۱: این لیزرها توان بسیار پایین دارند (0.05mW) و پرتوهایی هستند که باعث سطوح پرتوتابی خطرناک نمی‌شوند لذا، شدت آنها کنترل نمی‌شود.

کلاس ۲: این لیزرها پرتوهای مرئی منتشر کرده و توان پایین دارند (1mW). اگر باریکه لیزر برای مدت بیشتر از 0.25 ثانیه نگاه شود، احتمال آسیب چشمی وجود دارد.

کلاس 2a: این لیزرها نیز نور مرئی منتشر می‌کنند اما اگر کمتر از 1000 ثانیه نگاه شوند، خطرناک نیستند.

کلاس ۳: این لیزرها توان خروجی تا 5mW دارند و اگر به طور لحظه‌ای مستقیماً نگاه شوند، خطرناک نیستند.

کلاس 3a: این لیزرها توان متوسط 5 تا 50 میلی وات دارند. نگاه مستقیم و بازتاب آینه‌ای آن‌ها خطرناک ولی بازتاب پراکندگی آن‌ها معمولاً خطرناک نیست.

کلاس ۴: این لیزرها توان بیش از 500mW دارند. نگاه مستقیم و بازتاب آینه‌ای و پراکندگی آن‌ها برای چشم و پوست می‌تواند خطرناک باشد. این لیزرها ممکن است باعث حریق نیز بشوند. لیزرها بسته به میزان خطرآفرینی اندازه‌گیری و کنترل می‌شوند. کنترل‌های مهندسی شامل حفاظ لیزر، محدودیت دسترسی و موانع فیزیکی است. کنترل‌های عملکردی شامل الزامات عملکرد استاندارد، علائم و برچسب‌های هشداردهنده، تجهیزات حفاظتی فردی نظیر عینک، پوشش صورت، روپوش و دستکش آزمایشگاهی است. معمولاً آموزش ایمنی در استفاده از لیزرهای کلاس ۳ و ۴ ضروری است. اطلاعات تفصیلی در مورد ایمنی لیزرها در انتشارات ANSI

با عنوان «استفاده صحیح لیزرها» (ANSI Z136.1-2000) یافت می‌شود. این مستند یک راهنمای پذیرفته شده در مورد ایمنی لیزر است. به‌علاوه مرکز بهداشت پرتو و دستگاهی ادراة FDA استانداردهای اجرایی و تقسیم‌بندی لیزرها را منتشر کرده است. این استانداردهای اجرایی، کاربران را به همراه پیشگیری‌هایی لازم براساس امکان دسترسی به لیزر تقسیم‌بندی می‌کنند. براین اساس لیزر برای مصارف دیدن و نمایش نور تا حد کمتر از کلاس ۱ محدود می‌شود. تعیین برچسب‌ها و کلیدهای داخلی هنگام تعمیر و نگهداری دستگاه بر اساس نوع لیزر است. بر مبنای این استانداردها با افزایش کلاس لیزر موارد زیر با اهمیت می‌شوند:

هشدار دهنده لیزر، دریچه ایمنی، تضعیف ساز پرتو، شاخص تابش پرتو (گاهی همراه با زمان تاخیر)، کلید کنترل از دور، کلید کنترل، کاربر مجرب و دستورکار نگهداری و تعمیرات. در لیزرهای پزشکی باید توان لیزر با دقت $\pm 20\%$ روی دستگاه نمایش داده شود. لیزرهای نقشه برداری، سطح سنجی و تراز سازی باید در کلاس کمتر از 2a و لیزرهای نمایشی، شامل صفحه-های نمایشی و تفریحی، کلاس لیزر کمتر از 3a باشد.

مایکروویو: امواج مایکروویو پُر قدرت می‌توانند باعث اثرات سوء بیولوژیک حرارتی و غیرحرارتی شوند که مقدار آن تابع جذب انرژی و سایر عوامل است. یکی از سازکارهای واکنش مایکروویو با بافت، تحریک چرخش و یا ارتعاش مولکول‌ها (مثل آب) است، که عموماً گرما تولید می‌کند. در اثرات غیرحرارتی، ساختمان مولکول مستقیماً تحت تاثیر قرار گرفته، باعث تغییرات سلولی می‌شود. در صنعت از مایکروویو برای تست آب‌بندی دستگاه‌ها، در منازل برای کنترل از راه دور و بازکردن درب پارکینگ، تاسیسات ثابت رادار و ماشین‌های پلیس، فرستنده‌ها، سیستم‌های قدرت و ارتباطات ماهواره‌ای، استفاده می‌شود. همچنین برای اصلاح چوب‌های چندلایه، لاستیک و رزین‌ها و همچنین ورآمدن نان و شیرینی و برای پختن چیپس سبب زمینی استفاده می‌شود.

اجاق‌های مایکروویو و سایر منابع انرژی الکترومغناطیسی (دستگاه‌های دیاترمی، برخی فرکانس-های رادیویی، لامپ‌های نئون و موتوهای بنزینی و سایر سیستم‌های احتراق) ممکن است با عملکرد صحیح پیسمیکر، تداخل کنند. استفاده کنندگان پیسمیکر قلب باید متوجه تداخل احتمالی منابع الکترومغناطیس خارجی باشند. پیسمیکرهای جدید ممکن است دارای حفاظ باشند. اجاق‌های مایکروویو و سایر دستگاه‌های مشابه دارای لامپ مگنترون هستند که انرژی الکتریکی را به امواج رادیویی فرکانس بالا یا طول موج کم (مایکروویو) تبدیل می‌کنند. کمیته فدرال ارتباطات (FCC) اجاق‌هایی که از امواج ۲۴۵۰ تا 915MHz استفاده می‌کنند، تأیید نموده است. مایکروویو از کاغذ، پلاستیک، شیشه و سایر مواد شفاف عبور و توسط فلزات بازتاب می‌شود.

اما در مواد غیرفلزی مثل آب، غذا و بافت انسانی (چشم، اندام‌های داخلی و سایرین) با تولید گرما جذب، عبور و منکسر می‌شوند. امواج مایکروویو می‌تواند قبل از احساس گرما یا درد، آسیب خود را وارد کنند ولی برای رسیدن به این مرحله به مقادیر زیادی تابش مایکروویو نیاز است. لذا فلزات، ظروف فلزی یا ظروفی که حاوی قطعات فلزی باشند، نباید در اجاق قرار گیرند زیرا با جرقه الکتریکی یا تشعشع باعث خرابی تیوب مگنترون می‌شوند. اجاق‌های مایکروویو با درب‌هایی که کاملاً بسته نمی‌شوند، یعنی می‌توانند با درب باز یا نیمه باز فعال باشند یا اجاق‌هایی که بدون سیستم کلید قطع داخلی کار می‌کنند، می‌توانند آسیب جدی به کاربر وارد کنند. اجاق‌های مایکروویو در منازل، رستوران‌ها و در دستگاه‌های خود فروشنده به عنوان گرم کن سریع غذاها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. لکه، روغن یا ذرات فلز روی درب اجاق می‌تواند باعث نشت مایکروویو شود لذا تمیز کردن آن‌ها الزامی است. درب باید کاملاً غیر قابل نفوذ باشد. یک دانسیتومتر یا توان سنج اگرچه کافی نیست اما برای مانیتورینگ نشت امواج ماکروویو مناسب است. نصب دو کلید ایمنی مستقل روی درب اجاق‌ها الزامی است تا در صورت باز بودن از تولید مایکروویو جلوگیری کند. برخی استانداردهای تابش مایکروویو در جدول (۱۲) نقل شده است.

جدول ۱۲-۱ استانداردهای مایکروویو

چشمه	حداکثر تابش (mW/cm ²)
آزمایشگاه‌های متعهد به بیمه (امریکا)	۱۰ ^a
انستیتوهای استاندارد (امریکا)	۱۰ ^a
نیروی هوایی و جنگ (امریکا)	۱۰ پیوسته
نیروی هوایی و جنگ (امریکا)	۱۰-۱۰۰، محدود
بریتانیا (دفتر تنظیمات)	۱۰ پیوسته
سرویس بهداشت عمومی FDA/PHS	۱ ^b
FDA/PHS	۵ ^c

^a برای ۸ ساعت کار در روز و ۴۰ ساعت کار در هفته در ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz، ولی کمتر از ۱ mW/cm² برای تابش طولانی مدت.

^b برای اجاق ماکروویو در هنگام خرید حداکثر نشت

^c بیش از ۱ mW/cm² قبل از خرید و بیشتر از ۵ mW/cm² در فاصله ۵ سانتیمتر در زمان بهره برداری نباشد
استاندارد FDA برای محصولات منتشر کننده امواج مایکروویو و فرکانس رادیویی، دپارتمان خدمات بهداشتی انسانی
CFR 1030.10 (1994) ، Rockville MD ، FDA

گرمای تولیدی امواج مایکروویو در دیاترمی پزشکی مورد استفاده درمانی دارد. گرما در عضلات تا عمق ۲ اینچ نفوذ کرده و با اتساع عروق خون باعث افزایش جریان خون و مواد غذایی در ناحیه

درمان می‌شود. این امر می‌تواند درد را کاهش و درمان را سرعت دهد. دیاترمی مایکروویو به‌طور آزمایشی برای تخریب تومورهای سرطانی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده نادرست از تجهیزات مایکروویو می‌تواند باعث آب مروارید و همچنین سوختگی شدید در پوست بیماران شود. دستگاه‌های دیاترمی امواج کوتاه و فراصوت نیز برای درمان استفاده می‌شوند.

میدان‌های الکترومغناطیس با فرکانس کم و فرکانس رادیویی: اثرات بیولوژیک میدان‌های الکترومغناطیس کم‌فرکانس (EMFs) که توسط خطوط فشار قوی انتقال برق (500-765kV)، وسایل خانگی و سیم‌های برق تولید می‌شود، به خوبی شناخته نشده است. در حالی که انرژی این میدان‌ها بسیار کمتر از پرتوهای یونساز است ولی با القای جریان الکتریکی در مواد هادی نظیر خون و پروتوپلاسم سلولی می‌توانند اثرات سوء بیولوژیک یا اثرات درمانی داشته باشند. اگرچه بعضی مطالعات نشان از ارتباط احتمالی بین EMFs و لوسمی و سایر اشکال سرطان دارد ولی شواهد، قانع‌کننده نیست. برخی محققان نیز متوجه ارتباط احتمالی بین تابش EMF و بیماری‌های سرطان سینه، سقط جنین، افسردگی، خودکشی‌ها، آلزایمر و سایر بیماری‌ها شده‌اند. اما نظرات علمی عموماً حاکی از این است که شواهد هنوز قانع‌کننده نمی‌باشند.

با گسترش حیرت‌انگیز تلفن‌های همراه، نگرانی‌ها متوجه اثرات احتمالی میدان‌های الکترومغناطیس فرکانس رادیویی بر سلامت جامعه شده است. تابش میدان‌های الکترومغناطیس نظیر مایکروویو و تابش‌های شدید می‌تواند به اثرات حرارتی یا سایر اثرات منجر شود. اغلب مطالعات هیچ ارتباط آشکاری بین تابش سطوح پایین امواج RF و افزایش ریسک سرطان نیافته‌اند، ولی بعضی مطالعات منجر به افزایش سوالات شده است.

به‌رحال برای رسیدن به پاسخ بعضی سوالات نظیر آستانه اثرات بیولوژیک تابش‌های EMF کم شدت، ارتباط احتمالی آن با سرطان و سایر اثرات بیولوژیک احتیاج به مطالعات بیشتری است. با این وجود برخی پیشگیری‌ها انجام شده است. برای مثال در ایالت نیویورک، اجازه سکونت در فاصله ۳۵۰ فوتی از خطوط فشارقوی 765kV، داده نمی‌شود. به‌علاوه، دکل‌های آنتن‌های تلفن همراه باید با استانداردهایی نصب شود که کارگران و عموم مردم را از اثرات سوء حرارتی شناخته شده تابش‌های مایکروویو حفظ کند.

تصویربرداری رزونانس مغناطیسی: یک دستگاه MRI تصاویر سه بعدی (مشابه تصاویر CT) از مغز، استخوان، قلب، نخاع، سینه، و سایر بافت‌های نرم تولید می‌کند. سازکار آن شامل اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بسیار قوی به بدن بیمار، تابش امواج RF به بدن و شاید مهمترین بخش آن اعمال میدان مغناطیسی قوی ثانویه پالسی است. هسته‌های اتم هیدروژن در مولکول-

های آب بدن، شبیه قطب نما در میدان یکنواخت و بسیار قوی جهت‌گیری می‌کنند. ولی در نتیجه اعمال پالس‌های RF و قطع و وصل میدان مغناطیسی شیبدار، هسته هیدروژن به جلو و عقب منحرف می‌شود. این حرکات منجر به تولید امواج RF شده که توسط کویل‌های گیرنده از بدن دریافت و برای تولید تصاویر سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطرات مستدل دستگاه‌های MRI عمده ناشی از میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی آهنربای اولیه است. این آهنربا به آسانی می‌توانند باعث پرتاب اشیائی مثل آچارهای فرومغناطیس و کپسول اکسیژن و جراحی بیمار شود. به این دلیل از ورود انواع اشیاء فلزی به نزدیکی دستگاه MRI جلوگیری می‌شود.

فراصوت: تابش یا انرژی مکانیکی با سرعت‌های نسبتاً پایین از موادی مثل هوا، آب، خاک یا جامد عبور می‌کند. این تابش‌ها عمده به صورت فروصوت است که از ارتعاش مکانیکی در فرکانس‌های کمتر از حد شنوایی انسان (۲۰ Hz و کمتر) تولید می‌شود. صدا در محدوده شنوایی انسان (۲۰ تا ۲۰ هزار هرتز یا ۲۰kHz) است. فراصوت که در محدوده ۲۰kHz تا ۱۵MHz است برای درمان و تشخیص پزشکی و تمیز کردن دندان‌ها و سطوح فلزات استفاده می‌شود. تصاویر پزشکی از بازتاب امواج فراصوت ضعیف در برخورد با بافت‌ها، بازسازی شده و در تشخیص پزشکی بطور وسیع بکار می‌رود. یک مبدل (ترانسدایوسر) فراصوت، انرژی الکتریکی را به امواج صوتی (مکانیکی) تبدیل می‌کند. امواج صوتی پس از ورود به بدن توسط برخی از بافت‌های سخت و نرم، استخوان‌ها و سایر اندام‌ها منعکس می‌شود. امواج فراصوت انعکاسی، تولید الگویی می‌کنند که می‌تواند به تصویر قابل مشاهده تبدیل و سپس مورد مطالعه، تفسیر و عکسبرداری قرار گیرد. از این اطلاعات می‌توان جریان خون شریانی، بیماری کلیه و سنگ صفرا و مشکلات پروستات و پانکراس، را بررسی نمود. در مامایی، مطالعه سن و موقعیت نوزاد و عیب‌های مادرزادی بسیار با ارزش است. اکثر تجهیزات تشخیصی با فرکانس ۰/۵ تا ۱۰ مگاهرتز کار می‌کنند. شدت فراصوت نوعاً از 3 Wcm^{-2} برای درمان فیزیکی تا 0.1 Wcm^{-2} یا کمتر در فراصوت تشخیصی برای مشاهده آناتومی بیمار، متغیر است. دستگاه‌های فراصوت با شدت بیشتر برای تخریب بافت‌ها یا سلول‌ها و در درمان سنگ‌های مثانه و کلیه استفاده می‌شود. استانداردهای اجرایی FDA برای دستگاه‌های فراصوت درمانی منتشر و اخذ اطلاعاتی نظیر موارد زیر الزامی شده است. برای مثال، متوسط یا ماکزیمم شدت یا توان دستگاه، فاصله زمانی بین پالس‌ها، زمان هر پالس، سطح پرتوتابی، غیریکنواختی پرتو و توزیع فضایی، به علاوه وجود توان سنج با دقت $\pm 20\%$ درصد و زمان سنج با دقت $\pm 10\%$ درصد. از فراصوت در دندانپزشکی برای برداشتن پلاک از سطح دندان‌ها، درمان لثه‌ها و در فیزیوتراپی برای گرم کردن بافت‌های عمقی و درمان هایپرترمیا و در صنعت برای یافتن عیب‌های ریخته‌گری و کاربردهای دیگر استفاده می‌شود.

زیست‌شناسی پرتوی

پس از کشف پرتوهای یونساز، کاربرد و خطرات آن به سرعت معلوم گردید، این ویژگی در کمتر کشفی اتفاق افتاده است. پس از کشف پرتوی ایکس در سال ۱۸۹۵ و پرتوزایی طبیعی در سال ۱۸۹۶ اثرات زیست‌شناسی پرتوهای یونساز به سرعت ظاهر شد. دوماه پس از کشف، پرتوی ایکس در درمان سرطان پستان به کار گرفته شد. در شش ماه نخست استفاده از پرتوی ایکس چندین مورد سرخی و التهاب پوست و ریزش مو، بین کاربران پرتوهای ایکس و بیماران گزارش شد. اولین سرطان پوست منتسب به پرتوی ایکس در سال ۱۹۰۲ گزارش گردید.

مطالعه تأثیر پرتوهای یونساز در بافتهای سالم و بیمار منجر به علم جدید زیست‌شناسی پرتوی گردید. یک قرن پژوهش در زمینه زیست‌شناسی پرتو سبب گردیده اثرات پرتوهای یونساز بر سیستمهای زنده، بیش از هر عامل فیزیکی و شیمیایی دیگر، شناسایی شود.

عوامل متعددی در پاسخ زیست‌شناسی پرتو مؤثرند. به‌طور کلی این عوامل شامل متغیرهای وابسته به چشمه پرتو و سیستم پرتوگیر می‌باشند. عوامل وابسته به پرتو، شامل دُز، نوع و انرژی پرتو، سرعت دُز و شرایط پرتوگیری است. حساسیت پرتویی و پیچیدگی سیستم زیست‌شناسی در نوع پاسخ به پرتو نیز تعیین کننده است.

دسته‌بندی اثرات زیست‌شناسی

اثرات زیست‌شناسی پرتوها به اثرات قطعی و تصادفی تقسیم می‌شوند. در اثرات تصادفی با افزایش دُز، احتمال اثر و نه وخامت اثر، افزایش می‌یابد. سرطان ناشی از پرتو و اثرات ژنتیکی ماهیت تصادفی دارند. برای مثال، احتمال بروز لوسمی توسط دُز ۱ Gy بیش از ۰/۰۱ است ولی در صورت بروز لوسمی افزایش دُز در وخامت اثر، نقشی ندارد. اعتقاد بر این است که اثرات تصادفی فاقد آستانه دُز هستند، زیرا به لحاظ تئوری آسیب به چند و یا حتی یک سلول می‌تواند منجر به اثرات تصادفی شوند. بنابراین، پرتوگیری خفیف نیز ممکن است هرچند به مقدار کم سبب افزایش ریسک شود. فرض اساسی این است که مخاطره با دُز افزایش می‌یابد و هیچ آستانه دُزی وجود ندارد که کمتر از آن، احتمال خطر صفر باشد، این اساس برنامه‌های حفاظت از پرتوست، و هدف، پرتوگیری هرچه کمتر موجه شدنی است (ALARA). اثرات تصادفی مهمترین خطر پرتوگیری با دُزهای کم پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای است.

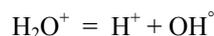
کشته شدن سلول مهمترین اثر زیست‌شناسی پرتوگیری‌های زیاد است که به تغییرات فاسد شدنی بافت منجر می‌شود. در این موارد، با افزایش دُز وخامت اثر بیشتر می‌شود. تفاوت اثرات

قطعی با اثرات تصادفی در این است که برای بروز اثر قطعی به یک حداقل دُز (دُز آستانه نامیده می‌شود) نیاز است و کمتر از این دُز، اثرات بیولوژیک ظاهر نمی‌شود. کاتاراکت، سرخی پوست، فیبروزیس و آسیب‌های خونی نمونه‌هایی از اثرات قطعی هستند که به پرتوگیری زیاد نیاز دارند. اثرات قطعی از در پرتوگیری بافت‌های سالم و سرطانی هنگام پرتودرمانی یا حوادث پرتوگیری، مشاهده می‌شوند. اثرات قطعی در روش‌های رادیولوژی تشخیصی اتفاق نمی‌افتد.

برهمکنش پرتو در بافت

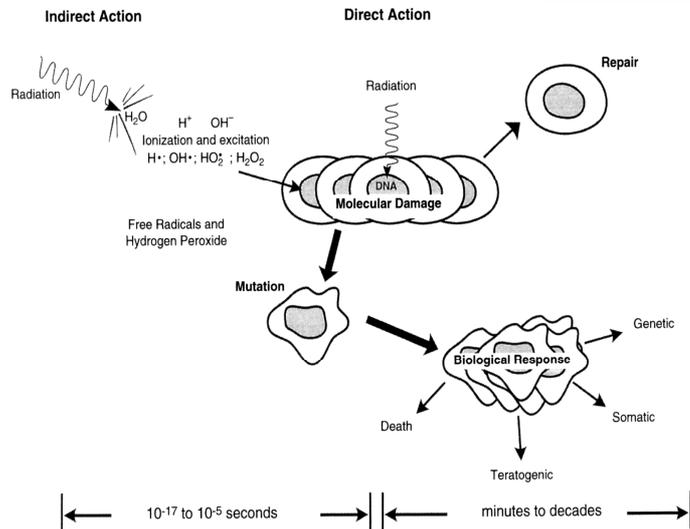
انتقال انرژی از پرتوهای یونساز با روش برانگیختگی، یونسازی و برخورد‌های حرارتی در کمتر از 10^{-10} ثانیه صورت می‌گیرد. صدمات ناشی از پرتو در یک اندام همیشه با تغییرات شیمیایی در سطح اتمی یا مولکولی آغاز می‌شوند. برای مثال، اثرات قابل مشاهده نظیر شکست کروموزمی، مرگ سلولی، سرطانزایی و بیماری‌های حاد تشعشعی همه دارای منشأ تغییرات شیمیایی ناشی از پرتو در مولکول‌های حیاتی هستند. تغییرات زیست‌شناسی ناشی از پرتو بعد از یک دوره تأخیر از دقیقه تا هفته‌ها و حتی سالها بسته به سیستم زیست‌شناسی و دُز اولیه، ظاهر می‌شوند. کسری از انرژی پرتو سبب تغییرات شیمیایی و بخش اعظم انرژی به‌صورت گرما، جذب ماده می‌شود. گرمای تولیدی در مقایسه با گرمای ناشی از سوخت و ساز ناچیز است. برای مثال، دُز فوق‌کشنده 1000 Gy سبب افزایش دمای 1°C در بافت می‌شود.

برخورد‌های پرتو که سبب تغییرات زیست‌شناسی می‌شوند به دو دسته برخورد مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در برخورد مستقیم، با عبور ذرات پرانرژی یا فوتون از مجاورت مولکول‌های بزرگی نظیر DNA، RNA یا پروتئین، مولکول‌ها یونیزه یا برانگیخته می‌شوند. اثرات غیرمستقیم ناشی از برخورد پرتو با سیتوپلاسم است که تولید رادیکال‌های آزاد می‌کند. چون 70% تا 80% جرم موجود زنده آب است، در پرتوگیری پزشکی، اکثر صدمات پرتو از برخورد غیرمستقیم پرتو با مولکول‌های آب ناشی می‌شوند. با جذب انرژی پرتو در مولکول‌های آب، جفت یون H_2O^+ و H_2O^- تولید می‌شود. به عبارت دیگر با یونیزه شدن H_2O رادیکال یونی H_2O^+ و از شکار الکترون آزاد توسط مولکول آب رادیکال یونی H_2O^- بوجود می‌آید. این یون‌ها بسیار ناپایدارند و به سرعت به رادیکال آزاد تجزیه می‌شوند.



اتم یا مولکول حاوی الکترون جفت نشده را رادیکال آزاد می‌نامند که با دایره‌ای کوچک در بالای علامت اختصاری عنصر، مشخص می‌شود. یون‌های H^+ و OH^- به دلیل عمر کوتاه، (تقریباً 10^{-10} ثانیه) نوعاً صدمات زیست‌شناسی قابل توجهی تولید نمی‌کنند و تمایل شدید به باز ترکیب به صورت مولکول آب دارند. در حالی که رادیکال‌های آزاد عوامل شیمیایی بسیار فعالند و باعث

واکنشهای شیمیایی متنوع می‌شوند. رادیکال‌های آزاد می‌توانند باهم ترکیب و مولکول غیرفعال نظیر آب ($H^{\bullet} + OH^{\bullet} = H_2O$) و یا مولکول پراکسید هیدروژن ($OH^{\bullet} + OH^{\bullet} = H_2O_2$) که برای سلول بسیار سمی است تولید کنند. رادیکال‌های آزاد می‌توانند به‌صورت عوامل احیا و اکسید عمل کرده با مولکول‌های بزرگ مستقیماً ترکیب شوند.



شکل ۱-۲ پاسخهای زیست‌شناسی و فیزیکی پرتوهای یونساز

در حضور اکسیژن اثرات تخریبی رادیکال آزاد تقویت می‌شوند. اکسیژن سبب پایداری رادیکال‌های آزاد شده، احتمال ترکیب آن‌ها و تولید آب را کاهش می‌دهد. از ترکیب اکسیژن با رادیکال هیدروژن، رادیکال بسیار فعال هیدروپرواکسید ($H^{\bullet} + O_2 = HO_2^{\bullet}$) تولید می‌شود. رادیکال آزاد علی‌رغم عمر کوتاه (کمتر از 10^{-5} ثانیه) با نفوذ در سلول در طول مسیر حرکت موجب صدمه به سلول می‌شود. رادیکال‌های آزاد ممکن است اعمال سلولی را مستقیماً یا از طریق مواد ژنتیک (DNA, RNA) غیرفعال سازند. اعتقاد بر این است که علت اصلی صدمات زیست‌شناسی پرتوهای با LET^۱ کم (نظیر پرتوی گاما) تولید رادیکال‌های آزاد است. در بسیاری موارد سازوکار ترمیم سبب بازگشت سلول به شرایط قبل از پرتوگیری می‌شود. برای مثال، در صورت شکست یک رشته DNA دو انتهای شکسته اتصال مجدد یافته، خسارت ترمیم می‌شود. درون و بیرون هسته سلول عواملی وجود دارند که موجب ترمیم صدمات DNA می‌گردند. در صورت آسیب یک رشته DNA، قسمت آسیب‌دیده توسط آنزیم جدا می‌شود و رشته سالم مولکول DNA الگوی لازم

¹ Linear Energy Transfer

برای چیدن صحیح بازها را در اختیار می‌گذارد. در صورت جدی بودن صدمه به دلیل پرتوگیری بسیار زیاد و یا قابل اجرا نبودن سازوکارهای ترمیم، سلول ترانسفر می‌شود. نتایج بالینی ترانسفرها تابع چندین متغیر است. برای مثال، اگر صدمه در مکانی از DNA رخ دهد که از تولید آلبومین سلول جلوگیری کند، نتیجه بالینی آن، حضور تعداد کمی سلول با قابلیت تولید آلبومین است. اگر صدمه در مکانی از DNA باشد که مسؤول کنترل تکثیر سلول است نتیجه بالینی آن تشکیل تومور یا سرطان است. سلول‌هایی که شدیداً پرتوگیری کنند اغلب در جریان میتوز می‌میرند، بنابراین، از انتشار سلول‌های آسیب دیده جلوگیری می‌شود. شکل ۱-۲ خلاصه‌ای از پاسخ‌های فیزیکی و زیست‌شناسی پرتوهای یونساز را نشان می‌دهد. آزمایش بر روی سلول در محیط کشت و حیوانات نشان داده است، اثرات زیست‌شناسی پرتوها نه تنها به عواملی نظیر دُز، سرعت دُز، شرایط محیطی در زمان پرتوگیری و حساسیت زیست‌شناسی سیستم بستگی دارد، بلکه به توزیع مکانی انرژی نیز وابسته است. کمیت انتقال خطی انرژی (LET) معرف متوسط انرژی جذبی در واحد طول مسیر پرتوست. هرچند تمام پرتوهای یونساز قادر به تولید اثرات زیست‌شناسی مشابه‌اند ولی مقدار اثر در واحد دُز، متفاوت است. دُزهای مساوی از پرتوهایی با LET متفاوت، اثرات زیست‌شناسی مشابه تولید نمی‌کنند. برای ارزیابی تأثیر انواع پرتوها با LET های متفاوت، آزمایشاتی انجام می‌شود که دُز لازم برای ایجاد یک اثر زیست‌شناسی با پرتوی مورد آزمایش و دُز مورد نیاز برای تولید همان اثر توسط پرتوی استاندارد (معمولاً پرتوی ایکس 250 kV_p)، مقایسه می‌شود. واژه تأثیر نسبی پرتوی آزمون به پرتوی مرجع، اثر زیست‌شناسی نسبی نامیده می‌شود (RBE).

$$RBE = \frac{\text{دُز لازم پرتوی ایکس } 250 \text{ kV}_p \text{ برای تولید یک اثر بیولوژیک}}{\text{دُز لازم پرتوی مورد آزمون برای تولید همان اثر بیولوژیک}}$$

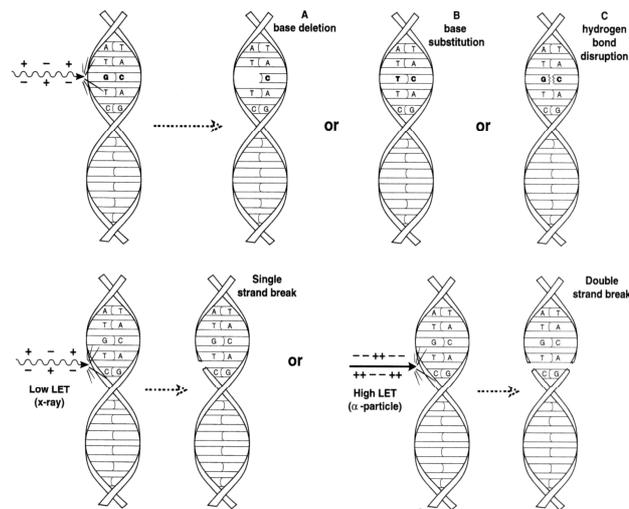
RBE اصولاً متناسب با LET است و با افزایش LET مقدار RBE نیز زیاد می‌شود. ولی بدلیل اثر فوق کشندگی در LET های بیشتر از $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ، با افزایش LET مقدار RBE کاهش می‌یابد. RBE شامل مقادیر کمتر از ۱ تا نزدیک ۲۰ است. برای هر پرتویی مقدار RBE تابع اثر زیست‌شناسی است. جهش ژنی، کاتاراکت یا اثرات حاد کشندگی، مثال‌هایی از اثرات زیست‌شناسی است، به‌علاوه مقدار RBE به دُز کل و سرعت دُز نیز وابسته است. در تعیین ضریب وزنی پرتو، RBE عامل مهمی است.

زیست‌شناسی پرتوی سلولی

اگرچه صدمات اصلی مسؤول مرگ سلول مشخص نگردیده‌اند ولی، پذیرفته شده است، هدف‌های حساس به پرتو در هسته سلول قرار دارند. سلول حاوی ماکرومولکول‌های فراوانی است که بعضی از آنها برای سلول حیاتی است. برای مثال، چندین آنزیم متنوع در سلول وجود دارد که از بین رفتن چند نسخه از آنها تأثیری در بقا و عمل سلول ندارند. درحالی‌که اگر یک مولکول کلیدی منحصر بفرد (مثلاً DNA) صدمه یا از بین برود، سلول می‌میرد. شواهد قابل توجهی وجود دارد که نشان می‌دهد آسیب DNA علت اصلی مرگ ناشی از پرتوی سلول است.

اثر پرتو بر DNA

جذب انرژی پرتوهای یونساز (مستقیم یا غیرمستقیم) سبب تغییرات شیمیایی مولکول‌های بزرگ می‌شود که تغییرات متنوع ساختمانی را به دنبال دارد. تغییرات ساختمانی شامل (الف) شکست پیوند هیدروژنی، (ب) شکست یا تجزیه مولکولی، و (پ) ارتباط درون و بیرون مولکولی است. پارگی در پیوندهای هیدروژنی که عامل ارتباط بازهای DNA است منجر به تغییرات بازگشت ناپذیر در ساختمان دوم و سوم ماکرومولکول‌ها که عمل نسخه برداری و انتقال ژن‌ها را بعهده دارند، می‌شود. شکست یا تجزیه مولکولی شامل DNA نیز می‌شود که منجر به از دست دادن یا تغییر بازها در یک رشته یا هر دو رشته. شکست یک رشته در محل قند و فسفات ممکن است مجدداً جوش خورده، مانع جدایی رشته‌ها از یکدیگر شود.



شکل ۲-۲، چند مثال از جهش‌های ژنی در DNA، A حذف باز، B جانشینی باز، C پارگی باند هیدروژن، D شکست تک رشته و دو رشته DNA،

حضور اکسیژن سبب تقویت آسیب می‌شود زیرا انتهای رشته شکسته، پراکسید شده از الحاق مجدد، جلوگیری می‌شود. اگر دو شکست در تک رشته‌ها در مجاورت هم قرار گیرند یا پرتوی با قدرت یونیزاسیون متراکم (مثلاً ذره آلفا) تولید شکست در هر دو رشته کند، شکست دو رشته‌ای اتفاق می‌افتد. شکست دو رشته‌ای DNA صدمه‌ای بسیار جدی است که می‌تواند سبب انحراف (aberration) کروموزومی شود. ناپایداری ژنی ناشی از ترمیم نادرست یا بقای شکست دو رشته‌ای می‌تواند از طریق فعال‌سازی آنکوژن‌ها و یا غیرفعال‌سازی ژن‌های مهار تومور، سرطان تولید کند. ترمیم شکست تک‌رشته‌ای ساده‌تر از دو رشته‌ای و ناشی از یونسازی پراکنده است که مشخصه پرتوهای Low LET است. شکل ۲-۲ بعضی از صدمات عمومی DNA را نشان می‌دهد. ارتباط عرضی مولکول (cross-linking) یکی دیگر از تغییرات ساختمانی است. عقیده بر این است که ارتباط عرضی، ناشی از شکل‌گیری جایگاه فعال در نقطه شکست زنجیره است. ارتباط عرضی می‌تواند بین دو مولکول DNA، بین یک پروتئین و DNA و بین دو باز یک هلیکس (مثلاً دیمراسیون تیمیدین ناشی از پرتوی فرابنفش) اتفاق افتد.

	Breakage	Recombination	Replication	Anaphasic Separation
A. One break in one chromosome		None		
B. Two breaks in one chromosome Rings				
C. One break in two chromosomes Translocation				
D. One break in two chromosomes Dicentric				

شکل ۲-۳ مثالهایی از انحرافات کروموزومی و بازترکیب آنها، A: شکست در یک کروموزوم، B: تشکیل حلقه، C: جابجایی، D: تولید دو سانترومر

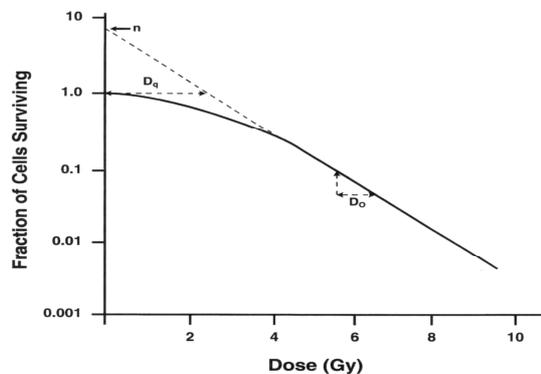
تغییر یا از دست دادن ژن، بدون در نظر گرفتن شدت یا توالی آن، نوعی جهش محسوب می‌شود. هرچند جهش‌ها می‌توانند اثرات جدی به‌بار آورند ولی تغییر در DNA به‌صورت پراکنده است و الزاماً منجر به تغییر ساختمان کروموزومی نمی‌شود. با این حال، شکست کروموزومی ناشی از پرتو نیز اتفاق می‌افتد و می‌تواند در جریان متافاز و آنافاز بطور میکروسکوپی مشاهده شود. شکست‌های کروموزومی ناشی از پرتو می‌توانند در هر یک از سلول‌های جسمی و جنسی ایجاد شوند و اگر قبل از سنتز DNA ترمیم نشوند ممکن است در جریان میتوز یا میوز به سلول جدید منتقل شوند. صدمات کروموزومی قبل از دوبله‌سازی DNA را *انحرافات کروموزومی* و بعد از دوبله‌سازی را *انحرافات کروماتییدی* می‌نامند. اگر یک کروماتید آسیب ببیند، برخلاف انحراف کروموزومی فقط یکی از سلول‌های دختر آسیب می‌بیند. ترمیم انحرافات کروموزومی تابع عواملی نظیر، مرحله فاز سلولی، نوع و محل زخم است. انتهای شکسته کروماتیدها دارای نیروی چسبندگی قوی است. و به روشهای مختلف منجر به باز ترکیب یک کروموزوم یا دو کروموزوم متفاوت می‌شوند که انحرافات نظیر حلقه و دوسانترومر را تولید می‌کنند. شکل ۲-۳ بعضی از انحرافات کروموزومی و جداسازی آنافاز و دوبله‌سازی آنها را نشان می‌دهد. وسعت صدمات ژنتیکی ناشی از انحرافات کروموزومی تابع عوامل مختلفی نظیر، نوع سلول، تعداد و نوع ژن حذف شده و اینکه آیا شکست کروموزومی در سلول ژنتیک یا جسمانی رخ داده است، می‌باشند. انحرافات کروموزومی بطور طبیعی نیز اتفاق می‌افتند. اساس دژیمتری زیست‌شناسی محاسبه تعداد انحرافات کروموزومی در لنفوسیت انسانی است که دژ دریافتی پس از حادثه پرتوگیری را می‌سنجد. برای تهیه کاریوتایپ، لنفوسیت‌های T نمونه خون بیمار کشت و برای تقسیم سلولی تحریک می‌شوند، سپس سلولها در متافاز مرتب و تعداد حلقه و دی‌سانترومرها شمارش می‌شوند. با این روش، دژ کل بدن بیش از ۰/۲۵ گری قابل اندازه‌گیری است. اگرچه انحرافات کروموزومی عموماً از جریان سیکل سلولی خارج می‌شوند ولی بازهم بعد از ۵۰ سال در بازماندگان بمباران هیروشیما و ناکازاکی قابل مشاهده‌اند.

حساسیت پرتوی سلول

هرچند پرتوهای یونساز سبب القای یک سری اثرات زیست‌شناسی می‌شوند، ولی معمولاً بررسی مرگ سلول ناشی از پرتو (اغلب از دست دادن قابلیت تکثیر تعریف می‌شود) در اندازه‌گیری اثرات زیست‌شناسی نسبی انواع پرتوها و شرایط مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. گاهی در استفاده از قابلیت تکثیر به عنوان شاخص اثر زیست‌شناسی محدودیت وجود دارد برای مثال فقط در سلول‌های تکثیرپذیر (سلول‌های پایه‌ای) کاربرد دارد و در سلول‌های تخصصی غیرقابل تقسیم (مثل، سلول‌های عضلانی و عصبی) غالباً مرگ سلول، فقدان اعمال متابولیک تعریف می‌شود.

منحنی بقای سلول

توقف احتمالی رشد سلولی که در محیط کشت، پرتوگیری کشنده، داشته است، بعنوان مدرکی برای تغییرات ظاهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش مستقیم بررسی توانایی تکثیر سلول، انتظار برای تقسیم تعداد کافی سلول‌ها و مشاهده کولونی‌هاست. شمارش کولونی‌هایی که از تعدادی معلوم، سلول پرتودیده تکثیرپذیر، به دست می‌آید راهی برای تعیین حساسیت نسبی سلول‌های مختلف به پرتو و تأثیر انواع پرتوها و شرایط محیطی متفاوت است. از دست دادن توان تشکیل کولونی به صورت تابعی از پرتوگیری، توسط منحنی بقای سلول تشریح می‌شود. محور x منحنی بقا با مقیاس خطی، معمولاً معرف دُز و محور y ، کسر سلول‌های باقی مانده در مقیاس لگاریتمی است. پاسخ به پرتو با سه کمیت، عدد n ، عدد شبه‌آستانه دُز D_q و دُز D_0 معرفی می‌شود (شکل ۴-۲). با ادامه قسمت خطی منحنی تا محل قطع محور y ، عدد تعمیم به دست می‌آید. این عدد معرف تعداد هدف‌های یک سلول (یعنی، جایگاه‌های بحرانی مولکول) است که ضربات پرتو به آنها سبب غیرفعال شدن سلول می‌شود و یا معرف تعداد ضربات لازم برای یک هدف به منظور غیرفعال شدن سلول است. عدد تعمیم سلول‌های پستانداران بین ۲ تا ۱۰ است. D_0 معرف حساسیت پرتویی سلول است. دُز D_0 ، شیب قسمت خطی منحنی و دُزی است که در قسمت خطی منحنی، سبب حذف ۳۷٪ سلول‌ها می‌شود. D_0 سلول‌های مقاوم به پرتو بیش از D_0 سلول‌های حساس به پرتو است. D_0 برای سلول‌های پستانداران تقریباً از ۱ تا ۲ گری است. در مورد پرتوهای با LET کم، منحنی بقا قبل از قسمت خطی، با یک شانه اولیه‌ای مشخص می‌شود. D_q معرف عرض شانه منحنی است که نشان‌دهنده صدمات زیر حدکشندگی است. صدمه زیر حدکشندگی مفهومی است که از تئوری هدف نتیجه می‌شود و تعداد سلول‌های پرتودیده سالم را که ضربات هدف (یا هدف‌ها) به حد کافی نبوده است، پیشگویی می‌کند.



(شکل ۴-۲ منحنی بقای سلول، D_q دُز شانه، D_0 دُز کاهش ۳۷٪ سلول‌ها، عدد تعداد جایگاه‌های بحرانی سلول)

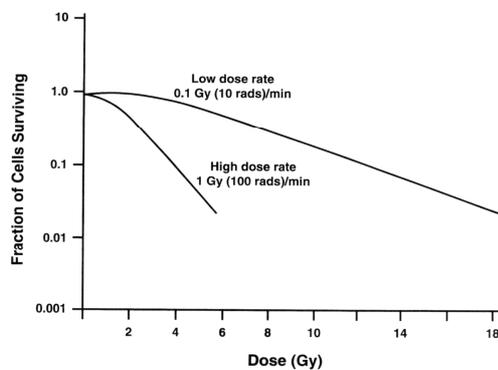
وجود شانه در منحنی بقا، دلیل روشنی برای پرتوهای با LET کم است که برای جلوگیری از تکثیر سلول، صدمه ناشی از برخورد پرتو به هدف کافی نبوده است.

عوامل موثر در حساسیت پرتوی سلول

حساسیت پرتوی سلول متأثر از عوامل مختلف است که سبب افزایش یا کاهش اثرات یا رابطه موقتی بین پرتوگیری و پاسخ می‌شود. این عوامل به دو دسته عامل شرایط و عامل ذاتی تقسیم می‌شوند. عامل شرایط، فیزیکی یا شیمیایی است که در زمان پرتوگیری یا قبل از آن حضور داشته‌اند. بعضی از شرایط مهم عبارتند از اکسیژن، سرعت دُز و LET که در رابطه پاسخ-دُز مؤثرند. حساسیت ذاتی به پرتو، مشخصه سلول و شامل عوامل زیست‌شناسی، نظیر سرعت میتوز، درجه تخصصی و فاز سلول است.

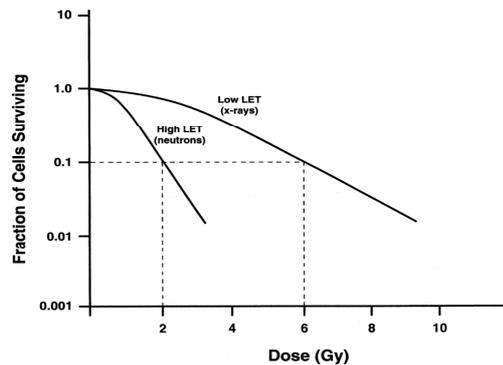
عامل شرایط

نشان داده شده است، سرعت دُز برای پرتوهای با LET کم در میزان صدمات یک سری اثرات زیست‌شناسی نظیر انحراف کروموزومی، جلوگیری از تکثیر و مرگ سلول، مؤثر است. بطور کلی، سرعت دُز بالا در تولید صدمات زیست‌شناسی مؤثرتر از سرعت دُز پایین است. دلیل اول این‌که قابلیت ترمیم در صدمات ناشی از پرتوهای با سرعت دُز بالا، محدود است. برای ترمیم صدمات زیر حدکشندگی که به کاهش صدمه و افزایش درصد بقا، منجر می‌شود، سلول‌ها در پرتوگیری با سرعت دُز پایین، نسبت به سرعت دُز بالا، فرصت بیشتری دارند. شکل ۵-۲ یک مثال از اثر سرعت دُز در بقای سلول را نشان می‌دهد. در پرتوگیری با سرعت دُز کم، شانه وسیع و D_0 زیاد، معرف تأثیر نسبی ضعیف‌تر نسبت به همان دُز با سرعت بالاتر است. در پرتوهای با LET زیاد، اثر سرعت دُز مشاهده نمی‌شود زیرا تراکم یونسازی بقدر کافی به هدف‌های بحرانی ضربه وارد می‌سازد که بر سازوکار ترمیم غلبه کند یا موجب صدمات ترمیم‌ناپذیر شود.



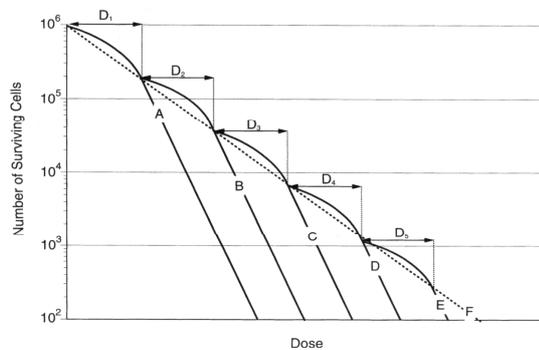
شکل ۵-۲ تأثیر سرعت دُز در منحنی بقای سلول

به هر حال، در یک سرعت دُز ثابت، صدمات سلولی ناشی از پرتوی با LET زیاد، بیش از پرتوگیری با LET کم است (شکل ۶-۲). برای دُز معین وقتی پرتوگیری در یک دوره زمانی به طور منقطع داده شود، صدمات کاهش می‌یابند. این روش معمولاً در پرتودرمانی سلول‌های سرطانی بکار می‌رود. بافت‌های سالم، در فاصله بین دُزها (نوعاً روز یا هفته‌ها) از سازوکار ترمیم استفاده نموده صدمات زیرحدکشندگی خود را ترمیم می‌کنند. شکل ۷-۲ تجربه ایده‌آلی را نشان می‌دهد که دُز ۱۰۰۰ گری به صورت یکجا و بار دیگر در ۵ مرحله ۲۰۰ گری با انقطاع کافی برای ترمیم صدمات زیر حدکشندگی، اعمال شده است.



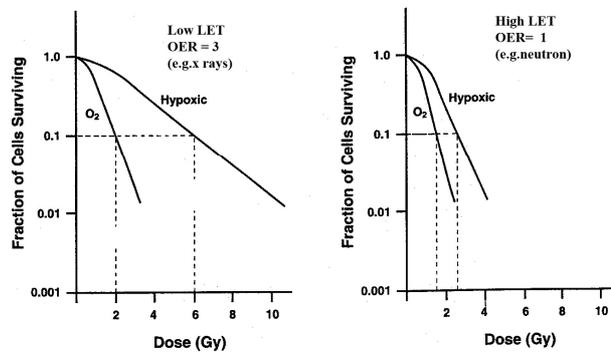
شکل ۶-۲ تأثیر دُز انقطاعی در منحنی بقای سلول

با کاهش سرعت دُز، در پرتوگیری با LET کم، شیب منحنی بقا کم می‌شود (شکل ۶-۲) و شانه‌های تکراری در پرتوگیری انقطاعی (شکل ۷-۲) دلیل واضحی برای ترمیم است. اکسیژن آزاد با جلوگیری از بازترکیب رادیکال‌های آزاد به صورت ترکیبات شیمیایی بی‌ضرر و مهار ترمیم صدمات ناشی از رادیکال‌های آزاد، سبب تقویت صدمات ناشی از پرتوهای با LET کم می‌شود.



شکل ۷-۲ تأثیر دُز انقطاعی در منحنی بقا

این اثر در شکل ۸-۲ نمایش داده شده است که یک گروه سلول در شرایط کمبود اکسیژن و گروه دیگر در شرایط معمولی پرتوگیری کرده‌اند. اثر نسبی پرتو در تولید صدمات سلولی در حضور مقادیر متفاوت اکسیژن، با نسبت^۱ (OER) بیان می‌شود.



شکل ۸-۲ تأثیر اکسیژن در منحنی بقا

نسبت OER به صورت دُز لازم برای تولید یک اثر زیست‌شناسی در غیاب اکسیژن نسبت به دُز لازم برای تولید همان اثر در حضور اکسیژن، تعریف می‌شود. افزایش غلظت اکسیژن در زمان پرتوگیری سبب افزایش مرگ سلول‌های هیپوکسیک تومور (یعنی، مقاوم به پرتو) می‌گردد. نسبت OER سلول پستانداران در محیط کشت برای پرتوهای با LET کم نوعاً بین ۲ تا ۳ است. صدمات پرتوهای با LET بالا از رادیکال‌های آزاد ناشی نمی‌شود، بنابراین، نسبت OER پرتوهای با LET بالا، یک است یعنی حضور و عدم حضور اکسیژن در صدمات بیولوژیک آن بی‌اثر است.

عامل ذاتی

در سال ۱۹۰۶ توسط دو دانشمند فرانسوی برگونیه و تریباندو یک دسته آزمایش به‌منظور ارزیابی حساسیت پرتویی سلول‌های جنین موش در مراحل مختلف نطفه‌زایی انجام شد. ویژگی‌های سلولی در حساسیت پرتویی، براساس نتایج این آزمایش‌ها به‌دست آمد. براساس قوانین برگونیه و تریباندو حساسیت پرتویی سلول‌هایی بیشتر است که (الف) دارای سرعت میتوز بالا، (ب) غیرتخصصی و (پ) میتوز ادامه‌دار باشند، با چند استثنا (مثلاً لنفوسیت‌ها).

مشخصه‌های مستدلی از حساسیت پرتویی سلول‌ها در شرایط *invivo* و *invitro* پشتوانه این قوانین است. برای مثال، سلول‌های پایه‌ای مغز استخوان که دارای سرعت میتوز بالا و غیرتخصصی‌اند نسبت به دیگر سلول‌های بدن به پرتو بسیار حساسترند. از طرفی سلول‌هایی نظیر

^۱ OER: Oxygen Enhancement Ratio

سلول‌های سیستم اعصاب مرکزی که پس از میتوز بدون تکثیر ثابت می‌مانند به پرتو مقاومند. این تقسیم‌بندی در سال ۱۹۶۸ توسط روبین و کسرت^۱ با معرفی پنج گروه سلول بر اساس حساسیت پرتویی، دقیق‌تر تعریف گردید (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲ تقسیم بندی حساسیت پرتویی سلول

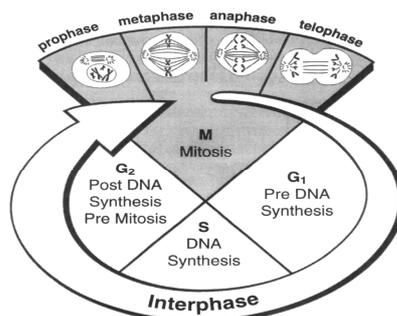
نوع سلول	مشخصات	مثالها	حساسیت پرتویی
VIM	تقسیم سریع، غیر تخصصی، بین تقسیمات تغییر نمی‌کند	اسپرمانتوگونیا نوع A، سلولهای کریبت دیواره گوارشی، سلولهای پایه اپیدرم، اریتروبلاستها.	بسیار حساس
DIM	فعالانه تقسیم می‌شود، تخصصی‌تر از VIM است، بین تقسیمات تغییر می‌کند.	اسپرمانتوگونیا بینابین، میلوسیت	نسبتاً حساس
MCT	تقسیم نامنظم دارد، تخصصی‌تر از گروه VIM یا DIM است.	سلولهای پوششی، فیبروبلاست	حساسیت متوسط
RPM	به‌طور طبیعی تقسیم نمی‌شود ولی قابلیت تقسیم حفظ می‌شود، تخصصی است.	سلولهای پارانشیمال کبد، لنفوسیت ^a	نسبتاً مقاوم
FPM	تقسیم نمی‌شود، تخصصی است.	بعضی سلولهای عصبی، سلولهای عضلانی، اریتروسیتها، اسپرمانتوزوآ	بیشترین مقاومت

a: لنفوسیتها، اگرچه در کلاس نسبتاً مقاوم قرار دارند ولی حقیقتاً به پرتو بسیار حساسند.

VIM (vegetative intermitotic cells) سلول با رویش بین میتوزی،
 DIM (differentiating intermitotic cells)، سلول که بین میتوز تخصصی می‌شوند
 MCT (multipotential connective tissue cells) سلول بافت پیوندی چند پتانسیلی،
 RPM (reverting postmitotic cells) سلول بازگشت به میتوز،
 FPM (fixed postmitotic cells) سلول بدون بازگشت به میتوز.

شکل ۹-۲ فازهای یک سلول تکثیرپذیر را نشان می‌دهد. بیشترین حساسیت پرتویی در فاز تقسیم سلولی است. بطور کلی تجربه نشان می‌دهد، در هنگام میتوز (متافاز) و سنتز RNA یعنی (G₂) بیشترین حساسیت پرتویی است که بتدریج در دوره آمادگی سنتز DNA یعنی (G₁) از حساسیت آن کاسته می‌شود و در سنتز (DNA) یعنی فاز (S) بیشترین مقاومت پرتویی بوجود می‌آید.

¹ Rubin & Casarett



شکل ۹-۲ فازهای یک سیکل سلول تکثیرپذیر

۳-۲ پاسخ اندام‌ها به پرتو

پاسخ یک اندام به پرتو، نه تنها تابع دُز، سرعت دُز و LET پرتوست بلکه به حساسیت پرتویی سلول نیز وابسته است. در این موارد، بجای تغییرات ساده بقای سلول، پاسخ برحسب تغییرات ظاهری و عملکرد اندام بررسی می‌شود. پاسخ اندام پس از پرتوگیری در یک دوره زمانی اتفاق می‌افتد که شروع آن رابطه عکس با دُز جذبی دارد. دُز بیشتر، سبب کاهش زمان بروز اثر فیزیولوژیک (دوره نهان) می‌شود. دُز آستانه‌ای وجود دارد که کمتر از آن دُز تغییرات مهمی در اندام ظاهر نخواهد شد. در بسیاری موارد، تغییرات آسیب‌شناسی ناشی از پرتو از آسیب‌های با منشاء طبیعی، غیرقابل تفکیک هستند.

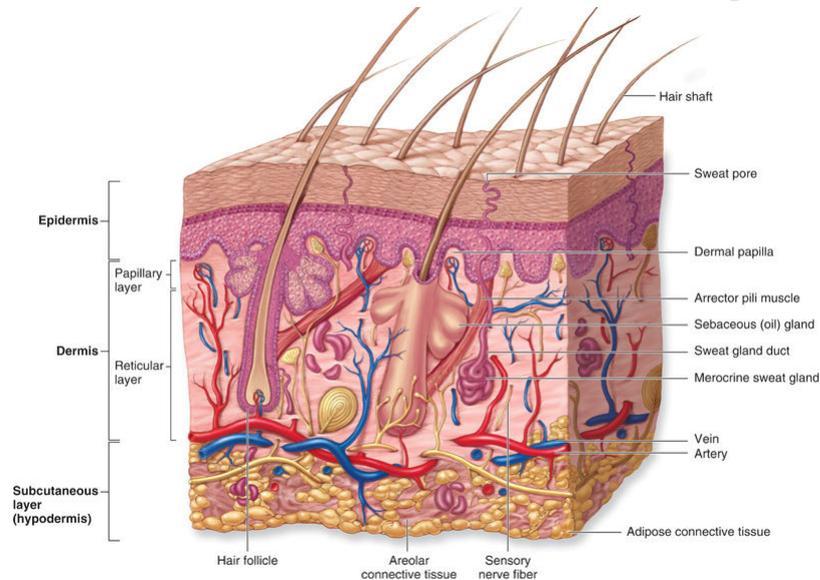
ترمیم و بازسازی

بوسیله بازسازی و ترمیم سلول، بافت آسیب دیده از پرتو بهبود می‌یابد. بازسازی اشاره به تعویض سلول‌های آسیب‌دیده با سلول‌های سالم از همان نوع دارد بنابراین، توان تقلیل یافته بافت، اصلاح می‌شود. نوع و شدت پاسخ، تابع دُز، حساسیت پرتویی و توان بازسازی سلول‌های تشکیل دهنده بافت دارد. اگر پرتوگیری زیاد باشد، توانایی سلول برای هر نوع بهبودی از بین رفته، بافت نکروز می‌شود.

پاسخ اندام‌ها (پوست)

اولین اثرات زیست‌شناسی پرتوهای یونساز، سرخی یا اریتمای پوست گزارش شده است. اثر پرتو بر پوست بطور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده است، میزان خسارت پوست فقط تابع کمیت، کیفیت و سرعت دُز پرتو نیست بلکه به تمرکز و سطح تابش‌گیری نیز وابسته است. در پرتوشناسی تشخیصی مشاهده این اثرات بسیار بعید است. حساس‌ترین بخش پوست بافت پوششی ژرمینال، غدد چربی و فولیکول‌های مو است. سلول‌های بافت پوششی ژرمینال بین لایه درم و اپیدرم قرار دارند که با میتوز سریع و بطور پیوسته به

سلول‌های شاخی اپیدرم تبدیل می‌شوند. تعویض کامل اپیدرم بطور طبیعی تقریباً در مدت ۲ هفته صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰-۲ بافت شناسی پوست

اثر پرتو بر پوست یک اثر قطعی و دارای آستانه دُز تقریبی یک گری است، بنابراین این اثرات در دُزهای کمتر از این حد، ظاهر نمی‌شوند.

ریزش موقتی مو تقریباً ۳ هفته پس از پرتوگیری ۳ تا ۶ گری رخ می‌دهد و تقریباً ۲ ماه بعد رویش مجدد آغاز و بین ۶ تا ۱۲ ماه کامل می‌شود. سرخی پوست بین ۱ تا ۲ روز پس از دُز حاد ۲ تا ۶ گری پرتوی ایکس، ظاهر و پس از چند روز برطرف می‌شود. دُزهای بیشتر، باعث سرخی شدید و پایدارتر می‌شوند. این نوع واکنش پوست بیشتر بخاطر اتساع ثانویه مویرگی است که آمین‌های اتساع دهنده (مثلاً هیستامین) تحت تأثیر پرتو ترشح می‌شوند. چند ماه پس از پرتوگیری اولیه، سرخی پوست دوباره ظاهر و پس از سه هفته حداکثر می‌شود در این هنگام پوست متورم، نازک و ظاهر سوخته پیدا می‌کند.

بهبودی معمولاً در مدت ۴ تا ۸ هفته پس از پرتوگیری، کامل می‌شود. تقریباً پس از ۱۵ گری پرتوگیری حاد یا ۳۰ گری پرتوگیری تدریجی در مدت چند هفته، ممکن است به دنبال سرخی پوست، پوسته شدن خشک به وجود آید. پس از دُز نسبتاً زیاد ۴۰ گری در مدت ۴ هفته یا ۲۰ گری به صورت حاد، پس از سرخی شدید، آماس پوست و پوسته شدن مرطوب اتفاق می‌افتد که با ادم، هیپوپلاسیای درم، التهاب سلول، صدمه عروق و ریزش دائمی مو، مشخص می‌شود. اگر

بخش ژرمینال بافت پوششی پوست و عروق، آسیب جدی ندیده باشد، ساخت مجدد اپیتلیوم پس از ۶ تا ۸ هفته آغاز و در مدت ۲ تا ۳ ماه، پوست به حالت طبیعی در می‌آید.

اندام‌های تناسلی

بطور کلی غدد جنسی به پرتو حساسند. بیضه‌ها حاوی سلول‌های حساس (مثلاً اسپرماتوگونیا) و مقاوم به پرتو (مثلاً اسپرماتوزوآی بالغ) هستند. اثرات اولیه پرتو بر سیستم تناسلی مرد پس از پرتوگیری حاد ۲٫۵ و ۵ گری به ترتیب نازایی موقت و دائمی است. نازایی موقت پس از دُزهای ۰٫۱۵ گری نیز گزارش شده است. این اثرات به پرتوشناسی تشخیصی مربوط نمی‌شوند زیرا در این روش‌ها دُز جذبی به ندرت از ۰٫۱ گری تجاوز می‌کند.

حساسیت پرتویی تخمک‌های درون تخمدان براساس اندازه آن‌ها (کوچک، متوسط و بزرگ) متفاوت است. فولیکول‌های متوسط به پرتو حساس و فولیکول‌های بزرگ و کوچک مقاوم به پرتو هستند. بنابراین، پس از پرتوگیری ۱٫۵ گری بخاطر مقاوم بودن فولیکول‌های بالغ، باروری به‌طور موقت حفظ می‌شود ولی پس از مدتی کاهش می‌یابد. اگر پرتوگیری در حدی نباشد که فولیکول‌های کوچک و مقاوم به پرتو آسیب ببینند، باروری دوباره طبیعی می‌شود.

برای ایجاد ناباروری دائمی نوعاً دُزهای بیش از ۶ گری لازم است. با این حال نازایی با دُزهای کم ۳٫۲ گری نیز گزارش شده است. اثر مهم دیگر القای جهش ژنتیکی و اثرات آن در نسل‌های بعدی است.

اثر بر چشم

عدسی چشم حاوی سلول‌های حساس به پرتوست که می‌تواند صدمه دیده یا نابود شوند. عدم سیستمی برای دفع سلول‌های آسیب دیده و تجمع آن‌ها در یک محل، موجب کاتارکت می‌شود. شدت کدورت یا احتمال آن متناسب با دُز است.

تأخیر بروز اثر با دُز جذبی رابطه عکس دارد و نوعاً بیش از یک سال است. احتمال بروز کاتارکت ناشی از پرتوهای با LET زیاد با ضریب ۲ یا بیشتر است. دُز حاد ۲ گری در بعضی و بیش از ۷ گری در همه افراد منجر به کاتارکت می‌شود. دُز تدریجی، احتمال بروز کاتارکت را کاهش می‌دهد. برای مثال، آستانه بروز کاتارکت وقتی پرتوگیری در مدت ۲ یا ۴ ماه باشد به ترتیب ۴ و ۵٫۵ گری است. بروز کاتارکت بین پرتوکاران قدیمی، پدیده‌ای متداول بوده است زیرا با دُزهای بالا و پرتوگیری‌های مکرر و بدون تجهیزات حفاظتی کافی کار می‌کرده‌اند. امروزه در رادیولوژی تشخیصی کاتارکت ناشی از پرتو به ندرت اتفاق می‌افتد، حتی با بیشترین پرتوگیری به چشم در پرتوشناسی تشخیصی (نوعاً فلورسکپی) امکان رسیدن به دُز آستانه در تمام مدت زندگی پرتوکاران وجود ندارد. ویژگی منحصر بفرد تشکیل کاتارکت ناشی از پرتو این است که برخلاف

کاتاراکت پیری، که نوعاً کدورت در قسمت جلوی عدسی رخ می‌دهد، در کاتاراکت ناشی از پرتو، کدورت از قسمت جلوی عدسی شروع و تا عقب ادامه می‌یابد.

سندروم پرتوگیری حاد

چنانچه قبلاً بحث شد، بدن متشکل از سلول‌هایی با مقاومت پرتویی متفاوت است و دُز حاد، صدمات سلولی بیشتری نسبت به همان میزان دُز که در مدت طولانی جذب شود، تولید می‌کند. اگر کل بدن تحت پرتوگیری زیاد قرار گیرد، پاسخ بالینی خاصی به عنوان سندروم پرتوگیری حاد بروز می‌کند. این سندروم‌ها، پاسخ‌های سیستمیک به پرتو است و با صدمات ناشی از پرتوگیری سطوح محدود نظیر ریزش مو یا زخم‌های پوست، کاملاً متفاوت است. سندروم‌ها با مراحل اولیه از یک ساعت تا چند هفته پس از پرتوگیری که مدت زمان پیشرفت صدمه در بافت‌ها و اندام‌هاست، ظاهر می‌شوند. مرحله اولیه با مقاومت پرتویی اندام‌ها، مرتبط است.

سندروم‌ها براساس دُز آستانه بروز به سندروم‌های خونی، گوارشی و عصبی دسته بندی می‌شوند. سندروم فقط وقتی اتفاق می‌افتد که پرتوگیری به صورت حاد، کل بدن (یا بخش بزرگی) و دُز ناشی از پرتوهای خارجی و پرنفوذ ایکس و گاما یا نوترون باشد (آلودگی داخلی یا خارجی به مواد پرتوزا معمولاً به خاطر سرعت دُز نسبتاً کم، به سندروم منجر نمی‌شود).

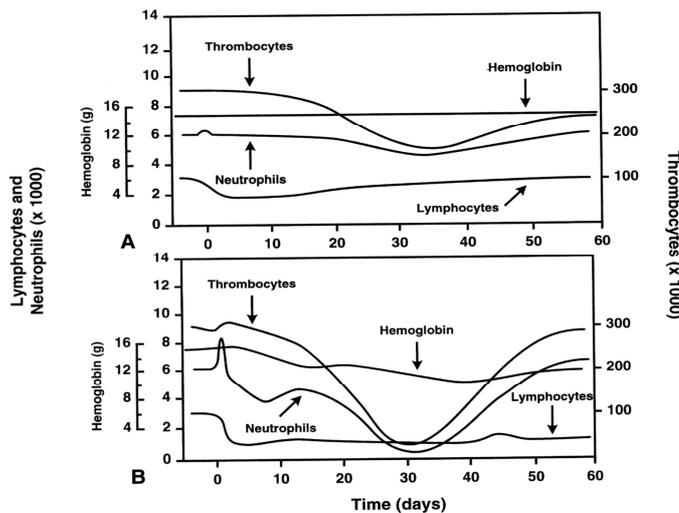
تظاهر علائم اولیه نوعاً ۶ ساعت پس از پرتوگیری شروع می‌شوند. اگر دُز کل بدن بیشتر از ۰/۵ تا ۱ گری شود تظاهر علائم اولیه شامل بی‌اشتهایی، تهوع، استفراغ و اسهال سریع‌تر و شدیدتر آغاز می‌شود. این تظاهرات در دوره نهان یا تأخیر برطرف می‌شوند و چنانچه دُز بیشتر باشد دوره نهان کوتاه‌تر و برعکس در دُزهای نسبتاً کم مثلاً کمتر از ۱ گری ممکن است تا ۴ هفته به تأخیر افتد. انتهای دوره نهان با شروع تظاهرات بالینی اندام‌های صدمه دیده همراه است که ۲ تا ۳ هفته طول می‌کشد و مرحله تظاهر بیماری نامیده می‌شود. اگر بیمار در مرحله تظاهر بیماری زنده بماند، بهبودی او تقریباً حتمی ولی ریسک سرطان بیمار و آنرمالی در فرزندان او بسیار بالاست.

سندروم خونی

مغز استخوان که حاوی سلول‌های پایه خونی است دارای بیشترین حساسیت پرتوی است. با این حال، بجز لنفوسیت‌ها، دیگر سلول‌های بالغ خون نسبتاً به پرتو مقاومند. پرتوگیری از پشت بدن به بیشترین آسیب منجر می‌شود زیرا، مغز استخوان فعال در مهره‌ها، ناحیه پشت دنده‌ها و لگن قرار دارد. سندروم خونی اولین تظاهر بالینی حاد است که از دُز حاد ۰/۵ تا ۱۰ گری ناشی می‌شود. با مراقبت‌های کامل پزشکی در دُزهای کمتر از ۲ گری تقریباً همیشه بهبودی حاصل می‌شود در حالی که، دُزهای بیش از ۸ گری غالباً منجر به مرگ می‌شوند، مگر درمان‌های مؤثری نظیر پیوند مغز استخوان با موفقیت انجام شوند.

بیماران با دُز جذبی بیش از ۱۲ گری حتی با درمان سلول‌های پایه با تعویض مؤثر آن‌ها، به‌خاطر آسیب مجاری روده معده‌ای و عروق، به‌ندرت زنده می‌مانند. دُز کشندهٔ نیمی از افراد در مدت ۶۰ روز (LD_{50/60}) با قطعیت معلوم نیست. بهترین تخمین ۳ تا ۴ گری است. علایم اولیه در چند ساعت پس از پرتوگیری شامل تهوع، استفراغ و اسهال است. علایم اولیه و دورهٔ نهان هر یک ممکن است تا ۳ هفته طول بکشد. هرچند تهوع و استفراغ ممکن است در دورهٔ نهان قطع شود ولی بیمار احساس خستگی و ضعف می‌کند. در این مدت، صدمه بر سلول‌های پایه سبب کاهش تعداد و کاهش توانایی آن‌ها در تولید سلول‌های خونی بالغ می‌گردد که پس از مدت معینی می‌میرند و باید توسط سلول‌های پایه جایگزین شوند.

شکل ۱۱-۲ پاسخ خونی ناشی از دُز جذبی ۱ و ۳ گری در مغز استخوان را نشان می‌دهد. افزایش اولیهٔ شمارش نوتروفیل‌ها احتمالاً ناشی از پاسخ فشاری نوتروفیل‌هاست که از مخازن خارج عروق، رها می‌شوند. در ساعت اول پس از پرتوگیری کاهش شمارش لنفوسیت‌ها اتفاق می‌افتد که شاخص خامی برای پرتوگیری است. آستانه دُز برای کاهش قابل شمارش لنفوسیت‌ها تقریباً ۰٫۲۵ گری است. تظاهر بالینی کاهش سلول‌های مغز استخوان ۳ تا ۴ هفته پس از پرتوگیری به‌صورت کاهش تعداد سلول‌های جریان خون دیده می‌شود. خونریزی ناشی از کاهش پلاکت، عفونت ناشی از کاهش سلول‌های سفید و آنمی از علل مرگ سندروم خونی است.



شکل ۱۱-۲ اثرات خونی ناشی از پرتوگیری مغز استخوان (شکل A) ۱ گری و (شکل B) ۳ گری

سندروم گوارشی

در دُزهای بالاتر، تظاهرات بالینی سندروم گوارشی مشاهده می‌شود؛ آثاری که سریع‌تر و شدیدتر از سندروم خونی است و با آن همپوشانی دارند. در دُزهای بیش از ۱۲ گری این سندروم مسؤول اصلی مرگ بیمار است. علائم اولیه آن شامل، تهوع، استفراغ شدید و اسهال شدید است. در چندساعت پس از پرتوگیری درد شکم ظاهر می‌شود. دوره نهان ۵ تا ۷ روز و مرحله تظاهر بالینی با بازگشت علائم اولیه و با شدت بیشتر آغاز می‌شود. عدم کارایی سیستم گوارش نتیجه صدمات جدی در مخاط گوارشی است. صدمات شدید سلول‌های پایه کریپت روده موجب کاهش قابلیت تکثیر آنها می‌شود در نتیجه اعمال روده ضعیف و توان جذب الکترولیت‌ها و غذا از بین می‌رود، در همین زمان راهی برای ورود فلورها (میکروب‌های معده‌ای) به جریان خون باز می‌شود. بطور کلی، آسیب‌شناسی گوارشی شامل زخم مخاطی و خونریزی، قطع جذب و ترشحات طبیعی، تغییر فلورهای روده‌ای و اختلال حرکات سیستم گوارشی است. اثرات سیستمیک شامل سوء تغذیه ناشی از عدم جذب غذا، استفراغ و ورم روده، آنمی ناشی از خونریزی معدی روده‌ای و عفونت ناشی از صدمه به آستر مخاطی روده است. اثرات شدید روده‌ای با اثرات شدید مغزاستخوان همراه است. مشهودترین اثر آن کاهش شدید گلبول‌های سفید جریان خون هنگام حمله باکتری‌ها از مجاری گوارشی به جریان خون است. در سلول‌های دیگر خون کاهش چشمگیر دیده نمی‌شود زیرا قبل از اینکه صدمات ناشی از پرتو در این خطوط سلولی، ظاهر شود، مرگ بیمار فرا می‌رسد. مرگ ناشی از سندروم گوارشی حتمی است. و اگر هیچ مراقبت پزشکی انجام نگیرد، مرگ ۳ تا ۱۰ روز پس از پرتوگیری اتفاق می‌افتد و با مراقبت‌های جدی پزشکی، بیمار پس از ۲ هفته می‌میرد.

سندروم عصبی

۲ تا ۳ روز پس از دُز فوق‌کشنده ۵۰ گری، مرگ اتفاق می‌افتد. مرگ در این مرحله ناشی از شوک قلبی عروقی با کاهش شدید سرم و الکترولیت‌ها در بافت‌های فاقد رگ است. علت مرگ قبل از هر تغییر قابل مشاهده دیگر، مسایل پیاپی ادم، افزایش فشار داخل جمجمه و نبود اکسیژن مغز است. مراحل سندروم عصبی بسیار فشرده است. دوره نهان ممکن است شامل احساس سوزش پوست در دقایق اول، به دنبال آن تهوع، استفراغ، گیجی، عدم کنترل عضلات (Ataxia) و عدم تعادل در ساعت اولیه باشد. دوره نهان بطور مختصر ۴ تا ۶ ساعت است. دوره‌ای که قدری بهبودی ملاحظه می‌شود و به دنبال آن مرحله تظاهرات شدید بیماری آغاز می‌شود. در این مرحله تظاهرات اولیه با شدت بیشتر بازگشت می‌کنند که با مشکل تنفسی و تغییرات شدید نورولوژی (شامل، لرزش و تشنج) همراهند و به اغما و مرگ منتهی می‌شود.

۵-۲ سرطانزایی پرتو

اکثر اثرات زیست‌شناسی که تا به حال بحث شد در زمان نسبتاً کوتاه پس از پرتوگیری ظاهر می‌شوند، ولی پرتوهای یونساز، قادرند صدماتی با تأخیر سال‌ها یا ده‌ها سال نیز تولید کنند. یکی از این مثال‌ها، توانایی پرتوهای یونساز در افزایش خطر سرطان، سال‌ها پس از پرتوگیری است. سرطان، بیماری نادری نیست، در حقیقت، سرطان دومین علت مرگ پس از بیماری قلب و عروق است. فراوانی و مرگ و میر ناشی از سرطان در جامعه آمریکا به ترتیب تقریباً ۳۹۸ و ۱۷۰ در هر صدهزار نفر است، نسبت نرخ مرگ و میر در مردان بیشتر از زنان است (۲۱۳ به ۱۴۱). اگرچه علت بروز سرطان به‌درستی معلوم نیست، ولی تغذیه، روش زندگی و شرایط محیط از مهمترین عوامل بروز سرطان محسوب می‌شوند. برای مثال، فراوانی سرطان با ضریب ۲ یا بیشتر بین جوامع مختلف دنیا تغییر می‌کند. اگرچه القای سرطان مهمترین اثر تأخیری پرتوهای یونساز است، ولی دُزهای کم (مثلاً، پرتوگیری شغلی و پرتوشناسی تشخیصی) عامل سرطانزای ضعیف محسوب می‌شود. در حقیقت، ظرفیت بدن در ترمیم بعضی صدمات پرتو به‌گونه‌ای است که عدم افزایش مخاطره در دُزهای کم، غیرممکن نیست.

زیست‌شناسی مولکولی و سرطان

سرطان، نتیجه افزایش بی‌رویه تکثیر سلول است. اعتقاد بر این است که سلول‌های یک تومور ناشی از یک سلول اجدادی معمولی است که کنترل بر تکثیر سلول را در چند نقطه از دست داده است. تبدیل سلول به حالت سرطانی به دلیل جهش در گروهی ژن است. جهش در این ژن‌ها، مرحله‌ای بحرانی در توسعه سرطان محسوب می‌شود. بعضی پروتئین‌های مؤثر در کنترل تقسیم سلولی نیز در ایجاد سرطان مشارکت دارند. ولی، دو گروه ژن فرونشان تومور و پروتوانکوژن که به ترتیب در مهار و ترغیب رشد سلولی فعالند، مهمترین نقش را در بروز سرطان ایفا می‌کنند. ژنهای مهاری تومور، نظیر ژن P53 (بدون جهش) در ساخت پروتئین‌های خاصی دخالت دارند. یکی از این پروتئین‌ها در ایجاد مکث سیکل سلولی و دادن فرصت ترمیم DNA قبل از تقسیم سلولی دخالت دارد و در صورت عدم ترمیم، سلول را به‌طرف مرگ برنامه ریزی شده به‌نام apoptosis هدایت می‌کند. عمل غیرطبیعی ژن p53 منجر به اختلال در سازوکار ترمیم DNA و توسعه تومور می‌شود. ژن p53 معیوب منجر به تکثیر غیرطبیعی سلول می‌شود و تقریباً نیمی از تومورهای انسانی حاوی ژن p53 جهش یافته‌اند. کد پروتو_انکوژن مخصوص پروتئین‌های محرک تقسیم سلولی است. فرم جهشدار این ژن سبب تقویت قوه محرکه پروتئین‌ها و در نتیجه تکثیر تصاعدی سلول‌ها می‌شود. مثلاً، پروتو_انکوژن جهش یافته (H-ras, N-Ras, K-Ras) تقریباً در ۲۵٪ تومورهای انسانی یافت می‌شود. پروتئین‌های گروه Ras، نقش اصلی را در تنظیم رشد سلولی به‌عهده دارند. اکثر جهش‌ها منجر به لغو فعالیت آنزیمی Ras می‌شود که باعث طولانی

شدن حالت فعال و بی‌نظمی در تحریک سیگنال‌های Ras می‌شود که رشد سلولی تحریک و یا مرگ apoptosis مهار می‌شود.

مراحل توسعه سرطان

به نظر می‌رسد وقوع سرطان تحت فرایندهای چند مرحله‌ای، اتفاق می‌افتد، بطوری‌که صدمه اولیه یک سلول منجر به مرحله اولیه نئوپلاسم و پس از یک سری اتفاقات متوالی اجازه تکثیر سلول داده می‌شود. با رشد بی‌رویه، مهاجرت بی‌قاعده و ژنتیک متنوع کولونی‌های یک سلول یا مشتقات آن، تمام نئوپلاسم‌ها و متازتازهایشان شناسایی می‌شوند. تصور می‌شود هیچ آستانه دزی برای القای سرطان وجود ندارد زیرا از نظر تئوری حتی یک واقعه یونساز نیز می‌تواند منجر به تغییرات مولکولی در DNA و ترانسفورم بدخیمی و در نهایت سرطان شود. البته، احتمال توسعه سرطان بسیار کمتر از آن چیزی است که از تعداد وقایع اولیه انتظار می‌رود، زیرا در میزبان، سازوکارهای دفاعی وجود دارند و امکان وقوع تمام مراحل متوالی مورد نیاز توسعه سرطان کم است. شکل‌گیری سرطان می‌تواند در سه مرحله اتفاق افتد: (الف) مرحله اولیه، (ب) پیشرفت و (پ) تصاعدی. در مرحله اولیه، یک جهش غیرقابل ترمیم در سلول جسمی (somatic) اتفاق می‌افتد. صدمات اولیه می‌توانند با پرتو یا هر عامل سرطانزای محیطی و شیمیایی دیگری بوجود آیند. در مرحله پیشرفت، سلول‌های اولیه نئوپلاسم برای تقسیم تحریک می‌شوند. یک عامل پیشرفت‌دهنده به تنهایی علت سرطان نمی‌شود ولی با وقوع حادثه سرطانزا، موجب تحریک یا تشدید سلول‌های حاوی صدمه اولیه می‌گردد.

در انسان بیش از ۶۰ عامل فیزیکی و شیمیایی سرطانزا نظیر، بنزن، فرمالدهید، کلرایدونیل و آرس‌ها شناسایی شده‌اند. بیش از ۲۰۰ عامل در گروه مشارکت کننده در توسعه سرطان دسته بندی می‌شوند. برخلاف اکثر عوامل سرطانزا، پرتوها ممکن است هم عامل اولیه وهم تشدید کننده باشند. بعضی هورمون‌ها به عنوان محرک رشد بافت، تشدید کننده سرطان هستند.

برای مثال، هومون محرک تیروئید و استروژن به ترتیب، تشدیدگر سرطان تیروئید و پستان می‌باشند. زمانی که سلول‌های ترانسفورم، تعدادی کولنی فنوتیپ که همه آنها نئوپلاسم نیستند، تولید کنند، مرحله تصاعدی یا مرحله آخر بوجود می‌آید. یک فنوتیپ می‌تواند از سازوکار دفاعی میزبان سر باز زده، اجازه دهد تومور توسعه یافته، متازتاز بوجود آید. پرتوها می‌توانند با مهار فرایندهای ایمنی، موجب تقویت مرحله تصاعدی گردند.

عوامل محیطی که در تقویت سرطان مشارکت دارند عبارتند از تنباکو، الکل، رژیم غذایی، رفتار جنسی، آلودگی هوا، عفونت‌های ویروسی و باکتریایی. هر عاملی که سبب اختلال سیستم ایمنی شود، نظیر ویروس ایدز (HIV) احتمال پیشرفت سلول‌های پیش‌نئوپلاسم به سرطان را افزایش می‌دهد. بعضی از عوامل شیمیایی به تنهایی ممکن است نه عامل تشدید و نه مقاوم باشند، ولی در حضور یک عامل اولیه سرطانزا، منجر به توسعه سرطان گردند. بسیاری از این عوامل در

سیگار موجود است که یک سرطانزای قوی محسوب می‌شود. پرتوهای غیریونساز محیطی نظیر امواج رادیویی موبایل و میدان‌های الکترومغناطیسی خطوط فشار قوی برق هرچند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، ولی هنوز مدرک قابل قبولی برای سرطانزایی آنها به دست نیامده است.

عوامل مؤثر در سرطان ناشی از پرتو

سرطان ناشی از پرتو که ممکن است در تمام بافت‌های بدن، ایجاد شود از سرطان ناشی از عوامل دیگر قابل تفکیک نیست. احتمال توسعه سرطان ناشی از پرتو تابع عواملی نظیر سرعت دُز، کمیت و کیفیت پرتوست. چنانچه در محیط کشت سلول مشاهده می‌شود، پرتوهای با LET بالا در تولید صدمات زیست‌شناسی نسبت به پرتوهای با LET پایین مؤثرترند. احتمال بروز لوسمی و سرطان‌های پستان، ریه، تیروئید و استخوان ناشی از پرتوهای LET بالا، بیشتر از پرتوهای LET پایین است. پرتوگیری انقطاعی دُزهای بزرگ، احتمال ترمیم را افزایش و در نتیجه سرطانزایی در بسیاری موارد از جمله لوسمی را کاهش می‌دهد. تأخیر زمان بروز و فراوانی سرطان ناشی از پرتو متأثر از سن فرد است. برای مثال، احتمال بروز سرطان پستان و تیروئید در جوانانی که هنگام پرتوگیری کمتر از ۲۰ سال دارند بیشتر ولی خطر سرطان معده و لوسمی در افراد مسن بیشتر است.

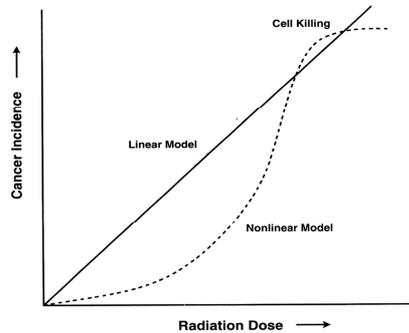
مدل‌های تخمین ریسک

دانشمندان برای پیشگویی احتمال بروز سرطان ناشی از پرتوهای کم دُز، مدل‌های پاسخ_دُز را در جوامع انسانی به دست آورده‌اند. این مدل‌ها منجر به منحنی‌های پاسخ_دُز خطی بدون آستانه و سیگموئیدی گردیده است. شکل ۱۲-۲ دو منحنی پاسخ_دُز (خطی و سیگموئیدی) را نشان می‌دهد. در رابطه خطی بی‌آستانه، ریسک سرطان ناشی از دُزهای کم بیشتر است. بنابراین به‌عنوان راهنما برای تخمین خطر سرطان پرتوگیری شغلی و پرتوشناسی تشخیصی در حفاظت پرتو، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل پاسخ_دُز خطی سیگموئیدی برای دُزهای کم، نسبت به مدل خطی ریسک کمتر و در دُزهای متوسط، ریسک بیشتر و کاهش فراوانی سرطان، در دُزهای بالا را پیش‌بینی می‌کند که ناشی از کشته شدن سلول و کاهش جمعیت سلول‌ها برای تبدیل به وضعیت نفوپلاسم است.

مدل‌های مخاطره

مدل‌های تصاعدی و افزودنی دو مدل ساده مخاطره سرطان پس از پرتوگیری است. در مدل تصاعدی با افزایش سن ریسک سرطان افزایش تصاعدی می‌یابد در حالی که در مدل افزودنی با افزایش سن یک میزان ثابت به ریسک سرطان اضافه می‌شود. بطور کلی، فراوانی طبیعی سرطان و ریسک ناشی از پرتو با افزایش سن زیاد می‌شود حتی ممکن است ریسک سرطان ناشی از

پرتوگیری با دُز معین در سنین مختلف متفاوت باشد به عبارت دیگر هیچیک از این دو مدل ساده، شرح کاملی از مخاطره سرطان ناشی از پرتو در سنین مختلف نیست.



شکل ۱۲-۲ مدل خطی و غیرخطی پاسخ دُز برای القای سرطان ناشی از پرتوهای با LET کم

تخمین مخاطره BEIR

کمیته تحقیقات ملی / علوم اکادمی ملی در زمینه اثرات زیست‌شناسی پرتوهای یونساز، گزارشی با عنوان *اثرات زیست‌شناسی پرتوهای یونساز کم دُز* که عموماً گزارش BEIR V^۱ شناخته می‌شود در سال ۱۹۹۰ منتشر کرده است. BEIR V ریسک سرطان برای دُز و آهنگ دُز بالا را ۸٪ در سیورت تخمین زده است.

تخمین مخاطره در دُز و آهنگ دُز مورد استفاده پرتوگیری‌های تشخیصی و شغلی با ضریب ۲ کاهش می‌یابد. بنابراین، بهترین تخمین مرگ ناشی از پرتوهای کم دُز در هر سیورت ۴٪ است. تخمین ریسک (ICRP) کمیته بین‌المللی حفاظت پرتو که از ارزیابی مرگ ناشی از پرتو به‌دست آمده، بطور کلی با گزارش BEIR V موافقت دارد. ICRP مرگ ناشی از پرتو در دُزهای کم را ۴٪ در سیورت برای جمعیت کارگران مسن و ۵٪ برای کل جامعه (شامل، گروه‌های حساس‌تر به پرتو نظیر جوانان) تخمین زده است.

براساس گزارش BEIR V مدل پاسخ دُز خطی برای تمام سرطان‌ها بجز لوسمی و سرطان استخوان بهترین مدل است و برای این سرطان‌ها مدل سیگموئید پیشنهاد شده است. مطابق مدل خطی، مرگ ناشی از سرطان به‌ازای ۱۰ میلی‌سیورت برای ده هزار نفر تقریباً ۴ است که علاوه بر ۲۲۰۰ نفری (یعنی ۲۲٪) است که به‌طور طبیعی در کل جامعه انتظار می‌رود. این عدد نشان‌دهنده افزایش تقریباً ۰٫۲٪ به مرگ و میر طبیعی ناشی از سرطان به‌ازای هر ۱۰ میلی‌سیورت است.

^۱ Biological Effect of Ionization Radiation

مروری بر تخمین مخاطره سرطان‌های خاص

لوسمی: در آمریکا، لوسمی با فراوانی تقریباً ۱ در ده هزار نفر، بیماری نسبتاً نادری است. ولی در صورت آمادگی ژنتیکی مخاطره به‌شدت افزایش می‌یابد. برای مثال، شانس ابتلای فرزند بیمار لوسمی نسبت به کودک همسان خود ۳ به ۱ است. اگرچه موارد لوسمی در جامعه نادر است، ولی از شایعترین سرطان‌های ناشی از پرتو و تقریباً یک ششم مرگ‌های ناشی از سرطان پرتوست. لوسمی می‌تواند به‌صورت مزمن یا حاد و لنفوسیتیک یا میلوئیدی باشد. در فرد پرتودیده، بجز لوسمی لنفوسیتیک مزمن، افزایش مخاطره در تمام گونه‌های دیگر لوسمی مشاهده می‌شود. افزایش فراوانی لوسمی، اول بار بین بازماندگان بمب اتمی ۲ تا ۳ سال پس از انفجار دیده شد و ۱۲ سال پس از انفجار به حداکثر مقدار رسید. فراوانی لوسمی تابع سن هنگام پرتوگیری است.

کمیتۀ BEIR V یک مدل مخاطره نسبی و پاسخ دُز غیرخطی برای لوسمی پیشنهاد و افزایش ریسک کاهش عمر ۱۰ در ده هزار نفر با پرتوگیری ۰/۱ گری را پیش‌بینی می‌کند.

سرطان تیروئید: سرطان تیروئید نیز به پرتوگیری مربوط می‌شود و تقریباً در برگیرنده ۶ تا ۱۲٪ از مرگ‌های سرطان ناشی از پرتوست. مطالعات نشان داده، مخاطره سرطان تیروئید در زنان تقریباً ۳ تا ۵ مرتبه بیش از مردان است که می‌تواند ناشی از هورمون‌سازی تیروئید باشد. احتمال بروز سرطان تیروئید در یهودیان و بومیان شمال آفریقا بیش از دیگران است. نرخ مرگ سرطان تیروئید ناشی از پرتو تقریباً ۰/۵٪ است. دوره تأخیر ندول‌های خوش‌خیم ۵ تا ۳۵ سال و تیروئید بدخیم ۱۰ تا ۳۵ سال است. داده‌های پاسخ دُز سرطان تیروئید، با الگوی خطی مطابقت دارند. مطالعات مقایسه‌ای بین منابع پرتوگیری، نشان داده است پرتوگیری داخلی مواد پرتوزا نظیر ید-۱۳۱ در تولید سرطان، تأثیر کمتری نسبت به دُز مشابه از طریق خارج بدن دارد. پرتوگیری تیروئید، ممکن است پاسخ‌های دیگری نظیر هیپوتیروئیدیسم (کم‌کاری تیروئید) و التهاب تیروئید، تولید کند. آستانه دُز تخمینی برای افراد بزرگسال از ۲ گری برای پرتوگیری خارج بدن تا ۵۰ گری برای پرتوگیری داخل بدن است. آستانه دُز کودکان کمتر است. علائم التهاب تیروئید و یا زخم جلوی گردن (تورات) تقریباً در ۱۰٪ افراد با دُز داخلی ۲۰۰ تا ۳۰۰ گری به‌غدد تیروئید (ماده ید پرتوزا) دیده می‌شود و دُزهای بیشتر ممکن است منجر به حذف تیروئید شود.

در اثر حادثه چرنوبیل مقدار زیادی یدپرتوزا در محیط رها و در نتیجه بین کودکانی که در نواحی با آلودگی زیاد زندگی می‌کردند، منجر به افزایش سرطان تیروئید گردید.

سرطان پستان: به‌دلیل فراوانی سرطان ناشی از پرتو و نرخ بالای مرگ آن، سرطان پستان برای زنان پرتوگرفته با دُزهای کم، بسیار با اهمیت است. در آمریکا از هر ۸ زن بیش از یک نفر در معرض ابتلای سرطان پستان قرار دارند و تقریباً از هر ۳۰ زن بیش از یک نفر در معرض خطر

مرگ ناشی از سرطان پستان است. بعضی از علل بروز این سرطان عبارتند از: سن بالا هنگام اولین حاملگی، سابقه فامیلی سرطان پستان، نژاد و میزان استروژن در خون. احتمال بروز سرطان پستان در زنان بدون فرزند یا یک فرزند بیشتر از مادران دو فرزند یا بیشتر است. به علاوه، ریسک زنانی که زودتر حامله شده و مدت طولانی تری شیر داده‌اند، کمتر است. سابقه فامیلی می‌تواند مخاطره سرطان پستان را ۲ تا ۴ برابر افزایش دهد. همچنین تغییرات نژادی و جغرافیایی در مخاطره سرطان پستان، قابل توجه است. بر اساس نتایج چندین تحقیق، استروژن به عنوان یک تقویت کننده، عامل مهمی در فراوانی سرطان و تسریع زمان بروز سرطان‌های طبیعی و ناشی از پرتوی پستان است. مخاطره سرطان پستان ناشی از پرتوهای Low-LET وابسته به سن است. در گروه سنی ۱۵ سال مخاطره ناشی از پرتوگیری ۰/۱ گری، تقریباً ۵۰ برابر زنان مسن‌تر از ۵۵ سال است. طبق گزارش BEIR V تخمین مخاطره برای زنان گروه ۲۵، ۳۵ و ۴۵ سال به ترتیب ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۸ است. داده‌ها با مدل پاسخ_دُز خطی مطابقت دارند، با دُز تقریبی ۰/۸ گری فراوانی سرطان طبیعی دو برابر می‌شود.

نتایج مطالعات پرتوگیری مزمن حاکی است دُز انقطاعی سبب کاهش مخاطره سرطان پستان ناشی از پرتوگیری Low-LET می‌گردد. دوره مخفی از ۱۰ تا ۴۰ سال است و زنان جوان دوره تأخیر بیشتری دارند. به نظر می‌رسد، برعکس لوسمی، مخاطره سرطان پستان در طول زندگی پرتوگیری هر فرد وجود دارد و زمان خاصی برای بروز آن نمی‌توان قائل شد. دستگاه‌های پیشرفته ممگرافی سبب کاهش عمده‌ای در دُز پستان گردیده‌اند. نشان داده شده، مخاطره مرگ ناشی از سرطان پستان در زنانی که در مطالعات غربالگری ممگرافی شرکت نموده‌اند، کاهش یافته است. انجمن سرطان پستان و کالج رادیولوژی آمریکا، آزمایش ممگرافی سالانه را برای زنانی که وارد ۴۰ سال شده‌اند، پیشنهاد کرده است.

اثرات ژنتیکی پرتوها

در سال ۱۹۲۷ برای اولین بار از مشاهدات تجربی اثرات ژنتیکی پرتو برمگس میوه، مدارک قطعی توانایی پرتوهای یونساز در ایجاد اثرات ژنتیکی به دست آمد. از آن تاریخ به بعد تحقیقات وسیع آزمایشگاهی منجر به نتایجی به این شرح گردید:

- (الف) پرتوها عامل بلقوه جهش هستند،
- (ب) برای موجود زنده، اکثر جهش‌ها مضر هستند،
- (پ) پرتوها سبب جهش‌های منحصر بفرد نمی‌گردند،
- (ت) به لحاظ نظری، صدمات ژنتیکی ناشی از پرتو می‌توانند حتی با یک جهش به وجود آیند و به طور خطی وابسته به دُز باشند (یعنی، مدل خطی بدون آستانه). اگرچه در ابتدا به نظر می‌رسید

اثرات ژنتیکی مشخص‌ترین اثر تأخیری پرتوهای یونسازند ولی در مقایسه با فراوانی طبیعی معایب ژنتیکی، ریسک در دُزهای شغلی و پزشکی، کوچک و در مقایسه با سرطانزایی پرتو در درجه دوم اهمیت قرار دارد.

اثرات ژنتیکی پرتو در انسان

بزرگترین جمعیت مورد مطالعه، بازماندگان بمب‌های اتمی و اولاد آن‌هاست. عدم مشاهده افزایش جهش ناشی از پرتو در این جامعه باعث گردیده، پیش‌بینی جهش در مقایسه با موارد طبیعی ناچیز باشد. مطالعه غربالگری بر روی خون ۲۷۰۰۰ فرزند بازمانده بمب اتمی نشان داد فقط ۲ جهش ممکن است ناشی از پرتوگیری اولیای آن‌ها باشد.

مطالعات قبلی بر روی این فرزندان به منظور تعیین افزایش ژن کشنده وابسته به جنس ناشی از پرتو که منجر به افزایش سقط‌جنین ذکور و تغییر نسبت تولد دختر به پسر می‌گردد، منفی بوده است.

تخمین مخاطره ژنتیکی

دُز مؤثر ژنتیکی (GSD) شاخصی برای نشان دادن معایب ژنتیکی ناشی از پرتوگیری سلول‌های جنسی جامعه است. بدیهی است با افزایش آمار رادیوگرافی‌ها دُز مؤثر ژنتیکی جامعه زیاد می‌شود. حساسیت جامعه به صدمات ژنتیکی ناشی از پرتو با دُز دوبرابر ساز قابل اندازه‌گیری است و بنابه تعریف، دُز مورد نیاز برای دوبرابر نمودن فراوانی جهش‌های خودبخودی است. فراوانی جهش‌های طبیعی تقریباً $10^{-4} \times (7 \text{ تا } 15)$ در هر سلول جنسی برای آنرمالی کرموزومی است. دُز دوبرابرساز برای انسان حداقل یک گری در هر نسل، تخمین زده می‌شود.

کمیت BEIR V تخمین زده است پرتوگیری ۱۰ mGy نسل حاضر، به دلیل افزایش جهش‌های غالب اتوزوم و با درجه کمتر جهش غالب وابسته به جنس، سبب افزایش ۶ تا ۶۵ عیب ژنتیکی در هر یک میلیون تولد می‌شود. اگر جمعیتی دائماً دُز اضافه ۱۰ mGy جذب نماید، بین القای معایب ژنتیکی جدید و حذف آن‌ها تعادل برقرار می‌شود.

تغییرات دُز زمینه در ریسک ژنتیکی جامعه، سهم مهمی ندارد. در مقایسه با فراوانی طبیعی تقریباً ۱ به ۲۰ یا ۵٪، حتی دُز ۱۰۰ mGy فقط حدود ۲۰۰ عیب ژنتیکی اضافی در هر میلیون فرزند متولد شده از نسل اول تولید می‌کند، بنابراین، دُز ۱۰۰ mGy باعث افزایش کمتر از ۰/۴٪ عیب ژنتیکی می‌شود.

پرتوگیری شغلی و پرتوشناسی تشخیصی اگرچه نوعاً دُز گوناوم را افزایش می‌دهند ولی تأثیر مهمی در ریسک ژنتیکی نسل بعد ندارد. پس از دریافت دُزهای درمانی برای کاهش صدمات ژنتیکی به اولاد، به تعویق انداختن حاملگی مؤثر است ولی این کار در تصویربرداری تشخیصی معمول نیست.

اثر پرتو بر جنین

رشداندام‌ها، فرایندی دینامیک است، که با تکثیر، مهاجرت و تخصصی شدن سلول‌ها شکل می‌گیرد. بنابراین، همانطور که بر اساس قوانین برگونیه و تربیاندو انتظار می‌رود، رشد جنین به پرتوهای یونساز بسیار حساس است، پاسخ به پرتوهای یونساز تابع عوامل (الف) دُز کل (ب) آهنگ دُز (پ) کیفیت پرتو (ج) مرحله تکامل در زمان پرتوگیری است. اجتماع این عوامل نوع و شدت صدمات پس از پرتوگیری را تعیین می‌کنند. از جمله این صدمات، مرگ جنین، آنرمالی‌های مادرزادی، رشد معیوب، کاهش هوش، معایب ژنتیکی و افزایش خطر سرطان است.

اثر پرتو و حاملگی

دوره حاملگی به سه مرحله تقسیم می‌شود: مرحله کوتاه قبل از لانه‌گزینی، (preimplantation) مرحله طولانی‌تر اندام‌زایی (major organogenesis) و بالاخره، مرحله (fetal growth) رشد جنین، در این مرحله، تخصصی شدن کامل گردیده، رشد کلی اتفاق می‌افتد.

قبل از لانه‌گزینی

در انسان مرحله قبل از لانه‌گزینی از لقاح اسپرم و تخمک شروع و تا ۱۴ روز که تخم از دیواره رحم عبور می‌کند، ادامه می‌یابد. در این مدت دو پیش‌هسته سلول‌های اسپرم و تخمک ترکیب و تقسیمات متوالی در سلول لقاح یافته انجام می‌شود تا ابتدا مورولا (توده متراکم انگوری) و سپس بلاستولا (تولید حفره‌ها) تشکیل شوند.

مرحله قبل از لانه‌گزینی از حساسیت پرتویی بسیار بالایی برخوردار است و می‌تواند به سقط جنین منجر شود. در این مرحله تولید آنرمالی‌های مادرزادی بسیار نادر است. اصطلاحاً جنین پاسخ همه یا هیچ می‌دهد که اگر سقط جنین رخ ندهد صدمات سلولی ترمیم یا تعویض و در نتیجه آنرمالی ایجاد نمی‌شود حتی اگر پرتو سبب مرگ چندین سلول شود. چندین عامل از جمله توانایی ترمیم، فقدان سلول‌های تخصصی و حالت نسبتاً هیپوکسیک (فقدان اکسیژن) جنین بر مقاومت در بروز آنرمالی‌های ناشی از پرتو مؤثرند. در انسان، ۱۲ ساعت پس از لقاح، وقتی دو پیش‌هسته لقاح یافته به سلول واحد تبدیل می‌شوند و در ساعت‌های ۳۰ و ۶۰ وقتی تقسیمات اول رخ می‌دهد، اوج حساسیت به پرتوست.

انحراف کروموزومی ناشی از پرتو در مرحله تک سلولی منجر به ازدست دادن یک کروموزوم در تقسیم‌های سلولی می‌شود. اکثر کروموزم‌های حذف شده در مرحله اولیه کشنده‌اند. از دست دادن یک کروموزوم جنسی در جنین دختر ممکن است منجر به سندروم ترنر (turner) شود. در مرحله قبل از لانه‌گزینی ممکن است مادر از حاملگی خود بی‌اطلاع باشد، بنابراین بیشترین احتمال سقط جنین وجود دارد. نتایج آزمایش بر روی حیوانات نشان داده است در دُزهای کم ۵۰

تا ۱۰۰ میلی‌گری در مرحله قبل از لانه‌گزینی، سقط جنین طبیعی افزایش می‌یابد. پس از این دوره، دُز جذبی لازم برای سقط جنین متجاوز از ۲۵۰ mGy است.

مرحله اندام‌زایی

غالباً تغییر شکل جنین در مرحله اندام‌زایی (۲ تا ۸ هفته پس از لقا) رخ می‌دهد. تغییر اولیه سلول‌ها به صورت اندام خاص در روزهای معینی از حاملگی صورت می‌گیرد. برای مثال، نوروبلاست (سلولهای اولیه سیستم مرکزی مغز و اعصاب CNS) در روز هجدهم حاملگی، قسمت جلوی مغز و چشم در روز بیستم و سلول‌های جسمانی اولیه در روز ۲۱ ظاهر می‌شوند. در دوره اندام‌زایی اندام‌های مختلف از مخاطره یکسان برخوردار نیستند. بطور کلی، بیشترین احتمال تغییر شکل ناشی از پرتو در یک اندام (که دوره بحرانی نامیده می‌شود) وقتی است که پرتوگیری در دوره پیک تمایز اندام باشد. البته این قاعده کلی نیست زیرا صدمه بر بافت‌های مجاور نیز ممکن است اثر منفی بر توسعه اندام بگذارد. بعضی آنرمالی‌ها دارای چند دوره بحرانی‌اند. برای مثال، تشکیل کاتاراکت در موش سه دوره بحرانی دارد.

تنها اندامی که (در انسان یا موش آزمایشگاهی) ارتباط بین عیب مادرزادی و دُزهای کمتر از ۲۵۰ mGy را نشان می‌دهد CNS است. رویانی که در مرحله اولیه اندام‌زایی پرتوگیری کند بیشترین تأخیر رشد عقلی را احتمالاً به‌خاطر قلت سلول، در رحم نشان می‌دهد، پرتوگیری رحم با دُزهای بیش از ۱۰۰ mGy نوترون و گامای ناشی از بمب اتمی هیروشیما، افزایش قابل توجه در فراوانی میکروسفالی ایجاد کردند. همچنین نشان داده شده است، دُزهای کم اشعه ایکس اثرات رفتاری و عقب افتادگی ذهنی ایجاد می‌کنند. برای صدمات ناشی از پرتو CNS هدف محسوب می‌شود. یک ویژگی مهم نقص مادرزادی در انسان اثرات مرتبط و پیوسته CNS با رشد جنین است. تمام موارد پرتوگیری رحم انسان که منجر به معایب مهم مادرزادی می‌شوند با آنرمالیهای CNS یا عقب افتادگی و یا هردو همراهند. پاسخ هراندام به تغییر شکل ناشی از پرتو منحصر بفرد است. عواملی نظیر، سن بارداری، مقدار پرتو، کیفیت و آهنگ دُز، فشار اکسیژن، نوع سلول در حال تخصصی شدن و سلول‌های اطراف بافت در نتیجه کار مؤثرند.

مرحله رشد جنین

مرحله رشد جنین در انسان از انتهای دوره اندام‌زایی (روز ۴۵) تا پایان دوره بارداری ادامه دارد. در این دوره فراوانی سقط جنین و آنرمالی‌های مادرزادی ناشی از پرتو ناچیزند. اصولاً آنرمالی‌های سیستم عصبی و اندام‌های حسی ناشی از پرتو که در این مرحله دیده می‌شوند با رشد نسبی و توسعه جنین همزمانند. اکثر صدمات القایی در مرحله رشد جنین ممکن است بعدها به‌صورت تغییرات رفتاری یا کاهش ضریب هوش تظاهر کنند. اثرات غالباً شامل، میکروسفالی، عقب افتادگی ذهنی و کم‌هوشی است. آنرمالی‌های چشم، اسکلتی و تناسلی کمتر مشاهده می‌شوند؛

فرزندانی که بین هفته ۸ تا ۲۵ دوران جنینی در هیروشیما و ناکازاکی، پرتوگیری کرده‌اند از IQ و موفقیت تحصیلی کمتری برخوردارند. این اثرات در کسانی که قبل از هفته ۸ و یا بعد از هفته ۲۵ پرتوگیری کرده‌اند، مشاهده نشده‌اند. کاهش IQ تابع دُز است. در آستانه دُز ۲۵۰ mGy بیشترین حساسیت در عقب افتادگی ذهنی بین هفته ۸ تا ۱۵ دیده می‌شود در این مدت ریسک تقریباً ۰/۴ درصد در هرگری دُز جنین است. میکروسفالی در بچه‌هایی که در دوران جنینی مورد تابش بمب‌اتمی بوده‌اند گزارش شده است. فراوانی میکروسفالی در کسانی که قبل از هفته ۱۸ بارداری پرتوگرفته‌اند متناسب با دُز زیاد می‌شود. فراوانی میکروسفالی (تقریباً بطور طبیعی ۳٪ است) در پرتوگیری‌های سه‌ماهه اول یا دوم، برخلاف پرتوگیری در سه‌ماهه سوم، افزایش می‌یابد. فراوانی میکروسفالی در جنین‌هایی که دُز ۱۰۰ تا ۴۹۰ میلی‌گری در سه‌ماهه اول و دوم جذب کرده‌اند، به ترتیب ۱۹٪ و ۶٪ است. اثرات مشابهی از پرتوگیری پزشکی مادران باردار گزارش شده‌اند. از ۲۸ فرزندی که در دوران جنینی پرتوگیری اشعه X درمانی یا رادیم داشته‌اند ۲۰ نفر دارای عقب افتادگی ذهنی و بین آن‌ها ۱۶ نفر میکروسفال بوده‌اند. ناهنجاری‌های دیگر شامل آنرمالی‌های فرعی، هیدروسفالی، ضایعه مهره کمری، کوری، کاتاراکت و میکروفتالمی است. اگرچه هر پرتوگیری نیازمند ارزیابی اختصاصی است ولی فرضیه مهم علمی این است که بروز اکثر عیب‌های مادرزادی نیازمند آستانه دُز است. دُزهای کمتر از ۱۰۰ mGy عموماً مخاطره ناچیزی در مقایسه با آنرمالی‌های مادرزادی طبیعی (۴٪ تا ۶٪) دارند. سقط جنین اجباری در دُزهای کمتر از این مقدار تأیید نمی‌شود. پرتوگیری دُز ۳/۵ تا ۵ گری در مدت دو روز نوعاً ظرف یک‌ماه سبب مرگ جنین می‌گردد. در اکثر موارد پرتوگیری جنین از روش‌های تشخیصی به‌ندرت متجاوز از ۵۰ mGy می‌شود که معلوم شده است، افزایش مهمی در مخاطره عیب‌های مادرزادی یا عقب افتادگی ذهنی ایجاد نمی‌کنند.

فراوانی سرطان ناشی از پرتوگیری جنین

Doll & Wakeford با بررسی مستندات علمی نتیجه‌گرفته‌اند، پرتوگیری جنین (بخصوص در سه‌ماهه سوم) سبب افزایش ریسک سرطان کودکی می‌گردد این افزایش با دُز ۱۰ mGy نیز ایجاد می‌شود که مقدار آن تقریباً ۶٪ در گری است. مخاطره کلی مرگ ناشی از سرطان در طول ده سال زندگی تقریباً ۱ به ۱۲۰۰ است. اگر پرتونگاری ریه سبب دُز جنین ۰/۶ μGy شود، احتمال توسعه سرطان کودکی ناشی از آن کمتر از ۱ در ۲۷ میلیون است. حدپرتوگیری شغلی به جنین در دوران حاملگی ۵ mSv است، بنابراین آهنگ دُز نباید بیش از ۰/۵ mSv در ماه باشد.

حفاظت پرتوی

تمام کسانی که پرتوهای پزشکی را مورد استفاده قرار می‌دهند، باید تعادلی بین کاربرد بالینی و دُز جذبی بیمار، کارکنان و عموم مردم برقرار کنند. موفقیت در امر حفاظت از پرتو بستگی به آموزش کارکنان در موضوعات اصول بهداشت پرتو، خطرات مربوط به پرتوگیری، آلودگی و ... دارد. در این فصل کاربرد اصول حفاظت پرتویی (فیزیک بهداشت) در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد.

منابع پرتوهای یونساز

طبق گزارش شماره ۹۳ انجمن ملی حفاظت پرتو و اندازه‌گیری (NCRP) دُز معادل مؤثر سالانه پرتوهای یونساز (بجز دخانیات) در امریکا تقریباً 3.6 mSv است. تقریباً 0.8% این پرتوگیری یعنی 3 mSv ناشی از منابع طبیعی و 20% آن، یعنی 0.6 mSv از منابع مصنوعی، به‌خصوص پرتوهای X تشخیصی و منابع طبیعی افزایشی است، این مقدار متوسط مربوط به جامعه امریکا است و ایران نیز مانند هر جامعه‌ای موظف به اندازه‌گیری دُز مؤثر منابع طبیعی و مصنوعی می‌باشد. اگرچه در استانهای مختلف متخصصان فیزیک پزشکی اقدام به اندازه‌گیری نموده‌اند ولی به عنوان یک طرح ملی برای کل جامعه ایرانی دُز مؤثر منابع طبیعی و مصنوعی برآورد نشده است.

منابع طبیعی پرتو

منابع طبیعی پرتو شامل: پرتوهای کیهانی، رادیونوکلئیدهای ناشی از پرتوهای کیهانی، رادیونوکلئیدهای ازلی و محصولات رادیواکتیو آن‌هاست.

پرتوهای کیهانی شامل پرتوهای ورودی به جو زمین و پرتوهای ثانویه ناشی از برخورد آن‌ها با جو است. پرتوهای اولیه اغلب شامل پرتوهای ذره‌ای بسیار پرانرژی (انرژی 10 BeV) است. تقریباً 80% تمام پرتوهای کیهانی پروتون‌های پرانرژی است که با جو زمین برخورد و تولید پرتوهای ذره‌ای ثانویه (مثلاً، الکترون‌ها، میون‌ها) و پرتو گاما می‌کنند. بطور متوسط دُز معادل پرتوهای کیهانی $270 \mu\text{Sv}$ در سال یا 9% پرتوهای طبیعی زمینه است. قابل ذکر است، طیف مقادیر پرتوگیری فردی، بسیار وسیع است. اکثریت جمعیت امریکا نزدیک سطح دریا زندگی می‌کنند که متوسط دُز سالانه پرتوهای کیهانی $240 \mu\text{Sv}$ است و جمعیت کمتری نیز بیش از پنج برابر این مقدار را دریافت می‌کنند [مثلاً لیدویل، کولورادو در 3200 متری 1.25 mSv/y].

¹- millisivert

به‌ازای هر ۱۵۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا پرتوگیری تقریباً دو برابر می‌شود زیرا ضخامت جو که تضعیف‌کننده پرتوی کیهانی است کاهش می‌یابد. همچنین پرتوگیری در قطب کره زمین بیش‌از استوا است زیرا ذرات باردار در برخورد با میدان مغناطیسی زمین به‌طرف قطب شمال یا جنوب منحرف می‌شوند. ساختمان‌ها، موانعی در مقابل پرتوهای کیهانی‌اند، بطوری‌که پرتوگیری درون ساختمان تقریباً ۲۰٪ کمتر از خارج آن است.

سفرهای هوایی سبب افزایش پرتوگیری کیهانی می‌شوند. برای مثال، متوسط دُز سالانه خدمه پرواز و مسافران با پروازهای مکرر تقریباً ۱ mSv افزایش می‌یابد. دُز معادل مؤثر یک پرواز پنج ساعته بین قاره‌ای با هواپیمای جت مسافربری ۲۵ μSv است. هواپیماهای بلند پرواز فراصوت نظیر بریتیش کنکورد در طول پرواز از نمایشگر دُز استفاده می‌کنند و خلبان با افزایش دُز، ارتفاع پرواز را کاهش می‌دهد. فضاپیماها نیز با پرتوهای کیهانی زیادی برخورد می‌کنند، دُز دریافتی فضاپیمای آپولو در مأموریت به کره ماه بطور متوسط ۲٫۷۵ mSv بوده است.

پرتوهای ذره‌ای کیهانی در برخورد با هسته‌های پایدار جو، تولید رادیونوکلئید می‌کنند (مثلاً ${}^{14}_6C$ با وجود تنوع تولید رادیونوکلئیدهای ناشی از تابش‌های کیهانی، سهم آن‌ها در دُز زمینه، مقدار ناچیز ۴ μSv/y یعنی کمتر از ۱٪ است. بیشترین سهم دُز مؤثر این رادیونوکلئیدها، مربوط به ${}^{14}C$ است.

مواد پرتوزای زمین که قدمت آن‌ها به زمان شکل‌گیری زمین برمی‌گردد، رادیونوکلئیدهای نخستین نامیده می‌شوند. نیمه‌عمر رادیونوکلئیدهای نخستین با عمر زمین برابری می‌کنند (تقریباً ۴٫۵ بیلیون سال) و محصولات واپاشی آن‌ها بزرگترین منبع پرتوزای زمین است. دُز ناشی از رادیونوکلئیدهای نخستین مربوط به پرتوگیری خارج بدن، استنشاقی و رادیونوکلئیدهای داخل بدن است. رادیونوکلئیدهای نخستین با نیمه‌عمر حدود 10^8 سال به‌حد غیرقابل سنجش واپاشی کرده‌اند. اکثر رادیونوکلئیدهای با عدداتمی بیشتر از عدداتمی سرب از طریق زنجیره‌های واپاشی به ایزوتوپ‌های پایدار تبدیل می‌شوند. رادیونوکلئیدهای این زنجیره‌ها دارای نیمه‌عمرهای ثانیه تا هزاران سالند و بالاخره رادیونوکلئیدهایی نظیر ${}^{40}K$ (با نیمه‌عمر $10^9 \times 1,29$ سال) مستقیماً به نوکلئیدهای پایدار تبدیل می‌شوند. زنجیره ${}^{238}U$ (سال $T_{1/2} = 4,51 \times 10^9$) سری اورانیوم نامیده می‌شود و زنجیره ${}^{232}Th$ (سال $T_{1/2} = 1,41 \times 10^{10}$) سری توریم که چندین دوجین رادیونوکلئید تولید می‌کنند و به‌همراه ${}^{40}K$ عامل اصلی دُز پرتوگیری خارجی زمین یعنی ۲۸۰ μSv/y هستند. دُز جذبی تابع غلظت رادیونوکلئید محل زندگی فرد، ممکن است کمتر یا بیشتر از این مقدار باشد. در آمریکا این محدوده از ۰/۱۵ تا ۲۵ mSv/y متغیر است. غلظت رادیونوکلئید در بعضی مناطق جهان زیاد است. برای مثال، در سواحلی از برزیل غلظت زنجیره توریم ($Th\ 232$) زیاد است. میزان پرتودهی شن‌های سیاه این

منطقه تا 0.5 mGy/hr می‌رسد که تقریباً 400 برابر متوسط تابش زمینه بجز رادون در آمریکا است. رادون 222 یکی از محصولات پرتوزای کوتاه عمر و از مهمترین منابع پرتوگیری استنشاقی گازهای پرتوزای طبیعی است. رادون گازی بی‌اثر است که در زنجیره اورانیوم ^{238}U از واپاشی ^{226}Ra تولید می‌شود. رادون با واپاشی آلفا به پلونیوم (Po-218) تبدیل و با تابش چندین آلفا و بتا بالاخره به سرب پایدار (Pb-206) ختم می‌شود. با استنشاق رادون دخترهای کوتاه عمر آن سبب دُز جذبی در نایچه‌های ریه می‌شوند. غلظت رادون در محیط‌های مختلف بسیار متفاوت و دارای تغییرات فصلی و حتی روزانه است. اصولاً متناسب با مقدار اورانیوم طبیعی، گاز رادون از خاک بیرون می‌آید. رادون داخل ساختمان بیش از خارج آن است. استفاده از عایق و روش‌های حفظ گرما با ممانعت از تهویه هوا منجر به افزایش غلظت رادون در ساختمان می‌شوند. در آمریکا دُز معادل مؤثر رادون mSv/y یا 68% مقدار زمینه می‌شود. غلظت گاز رادون داخل ساختمان بطور متوسط 1.5 pCi/L است ولی ممکن است تا 75 pCi/L نیز برسد. متوسط غلظت گاز رادون زیر زمین منازل شهر یزد $3/7 \text{ pCi/L}$ منازل شهر رامسر $15/1 \text{ pCi/L}$ و اردبیل $6/4 \text{ pCi/L}$ البته شهر رامسر به دلیل آب‌های معدنی سطحی و غنی از مواد رادیواکتیو یکی از مناطق با تشعشع زمینه معروف جهان است. آژانس حفاظت محیط آمریکا (EPA) و (NCRP) به ترتیب کاهش رادون به مقادیر 4 و 8 pCi/L را توصیه می‌کنند البته این حدود در کشورهای مختلف متفاوت است (مثلاً در انگلستان و کانادا 20 pCi/L است). هرچند گاز رادون حدود دو سوم تابش زمینه را دربر می‌گیرد ولی به راحتی قابل اندازه‌گیری و در صورت نیاز قابل کاهش است. برای کاهش گاز رادون منازل کافی از تهویه مناسب هوا استفاده شود. دومین منبع تابش زمینه، آلودگی مواد غذایی و آب به رادیونوکلئیدهای نخستین (و محصولات آن‌هاست) که مهمترین آن K-40 است. عضلات اسکلتی دارای بیشترین غلظت پتاسیم است. خوردن ^{40}K و به مقدار کمتر دیگر رادیونوکلئیدهای نخستین، بطور متوسط موجب دُز معادل مؤثر 0.4 mSv/y یا 13% دُز زمینه می‌گردند.

جدول ۱-۳: متوسط دُز مؤثر سالانه ناشی از منابع طبیعی زمینه در آمریکا

چشمه	دُز معادل مؤثر سالانه mSv	% کل
رادیونوکلئیدهای استنشاقی (رادون)	۲	۶۸
رادیونوکلئیدهای بلعی (k-40)	۰.۴	۱۳
پرتوگیری خارجی، رادیونوکلئیدهای زمین	۰.۲۸	۹
پرتوهای کیهانی	۰.۲۷	۹
رادیونوکلئیدهای تولیدی از پرتوهای کیهانی	< 0.1	< 1
کل	۳	۱۰۰

گزارش شماره ۹۴ NCRP، سال ۱۹۸۸، پرتوگیری مردم آمریکا و کانادا از منابع طبیعی زمینه

منابع طبیعی توسعه یافته

این گروه شامل یک دسته چشمه‌هایی است که عموماً محصولات مصرفی‌اند. بیشترین سهم این گروه مربوط به محصولات تنباکوست که تقریباً دُز معادل سالانه مجاری تنفسی افرادسیگاری Sv ۰/۱۶ است. با احتساب ضریب وزنی ۰/۰۸ بافت ریه، دُز مؤثر آن Sv ۰/۰۱۳ در سال و با متوسط‌گیری روی جمعیت امریکا (سیگاری و غیرسیگاری) متوسط دُز معادل مؤثر سالانه Sv ۲/۸ می‌گردد. با توجه به تفاوت جمعیت سیگاری در کشورهای مختلف دُز مؤثر آن قابل تعمیم برای جوامع مختلف نیست. لذا در تخمین متوسط دُز مؤثر سالانه، منظور نمی‌شود. گاز رادون محلول در آب مصرفی خانه، این چشمه پرتوزا اصولاً مربوط به آب چاه و دیگر منابع زیرزمینی است. NCRP دُز معادل مؤثر سالانه ناشی از این منبع را در امریکا (۰/۰۱) mSv تا (۰/۰۶) تخمین زده است.

بسیاری از مصالح ساختمانی حاوی رادیویزوتوپ‌های اورانیوم، توریم و پتاسیم است. رادیونوکلئیدهای نخستین و محصولات آن‌ها با غلظت زیاد در مصالح ساختمانی آجر، سیمان و گرانیت موجود است بنابراین پرتوگیری این ساختمان‌ها بیشتر از ساختمان‌های چوبی است. دُز معادل مؤثر سالانه این منبع ۰/۰۳ mSv تخمین زده می‌شود. منابع پرتوگیری دیگری از این نوع ولی با درجه اهمیت کمتر نظیر آشکارساز دود (امرسیوم ۲۴۱) نیز وجود دارند.

منابع مصنوعی

بیشترین پرتوگیری منابع پرتوزای مصنوعی ناشی از روش‌های تشخیصی درمانی است. بیشترین پرتوگیری، مربوط به پرتوی X تشخیص پزشکی است و پزشکی‌هسته‌ای سهم کمتری دارد. متوسط دُز مؤثر روش‌های پرتوگیری پزشکی ۰/۵۴ mSv است که بیش از ۹۵٪ منابع پرتوگیری مصنوعی می‌باشد. اطلاعات پرتوگیری پزشکی از گزارش شماره ۱۰۰ NCRP، ۱۹۸۹ به‌دست آمده است. از آن زمان تا کنون، تغییرات مهمی در فن‌آوری تصویر پزشکی رخ داده است در واقع دُز رادیوگرافی‌ها کاهش، ولی دُز فلورسکپی‌ها و CT افزایش یافته‌اند.

ریزش مواد پرتوزای آزمایش‌های هسته‌ای (۴۵۰ انفجار بین سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۸۰) شامل مقدار زیادی ^{14}C و انواع رادیونوکلئیدها شامل تریتیوم (^3H)، منگنز (^{54}Mn)، سزیم (^{136}Cs) و ^{137}Cs ، باریوم (^{140}Ba)، سزیم (^{144}Ce)، پلوتونیوم و محصولات آن‌هاست. امروزه دُز مؤثر سالانه ناشی از ریزش مواد پرتوزا کمتر از ۰/۰۱ mSv می‌شوند.

سهم دُز معادل مؤثر سالانه ناشی از نیروگاه‌های هسته‌ای در تمام فازهای سیکل سوخت شامل: پردازش اورانیوم در کارخانه و معدن، اعمال رآکتور و دفع پسماندهای پرتوزاست کمتر از Sv ۰/۵ است. قابل توجه است نیروگاه‌های هسته‌ای، ریزش مواد پرتوزای ناشی از انفجارات اتمی در تابش دهی جامعه، سهم ناچیزی دارند.

پرتوگیری شغلی

بطور متوسط پرتوگیری شغلی در معادن اورانیوم از جمله بیشترین‌هاست، موارد دیگر پرتوگیرهای شغلی عبارتند از: نیروگاه‌های هسته‌ای، مراکز تشخیصی درمانی، فضاوردی و فعالیت‌های متفرقه نظیر پژوهش، معادن غیراورانیوم و استفاده از کودهای فسفوری است (جدول ۳-۲). متوسط دُز معادل مؤثر سالانه رادیولوژیست‌ها و تکنسین‌های رادیولوژی تقریباً ۱ mSv است. این مقدار متوسط تاحدی کمتر از مقدار قابل انتظار است زیرا شامل افراد با پرتوگیری بسیار ناچیز (مثلاً سرپرست مراکز رادیولوژی) نیز می‌شود. استفاده از روپوش سربی، پرتوگیری اکثر نقاط بدن را به شدت کاهش می‌دهد در واقع، فقط بخشی از بدن پرتوگیری می‌کند (یعنی، سر و دست و پا). قابل ذکر است، متوسط دُز معادل مؤثر خدمه پرواز به دلیل عدم استفاده از محافظ سربی ۱/۷ mSv/y است و معمولاً بیش از شاغلین مراکز پزشکی هسته‌ای و رادیولوژی است.

جدول ۳-۲ متوسط دُز معادل مؤثر سالانه شغلی در امریکا

طبقه شغل	mSv
کارگران معدن اورانیوم ^a	۱۲
کاربران نیروگاه هسته‌ای ^b	۶
خدمه پرواز	۱٫۷
فن‌آوران پزشکی هسته‌ای و پرتوشناسی تشخیصی	۱
رادیولوژیست‌ها	۰٫۷

پرتوگیری جامعه امریکا از پرتوگیرهای شغلی، گزارش شماره ۱۰۱ NCRP، سال ۱۹۸۹، Bethesda, MD

^a شامل ۱ mSv (۱ rem) از پرتوهای آلفا با LET بالا

^b شامل ۰٫۵ mSv (۵۰ rem) از پرتوهای آلفا با LET بالا

دُز مؤثر جمعی

برآورد متوسط دُز معادل مؤثر و تعداد نفرات تابش دیده، روش دیگری برای ارزیابی اثرات سوء پرتوگیری جامعه است. از حاصل ضرب این دو عامل دُز معادل مؤثر جمعی با یکای نفر-سیورت به دست می‌آید. جدول (۳-۳) دُز معادل مؤثر جمعی ناشی از پرتوگیری زمینه و منابع تابش تکنولوژیک جامعه امریکا را نشان می‌دهد. در جدول (۳-۴) دُز معادل مؤثر جمعی چند گروه شغلی ارائه شده است. هر چند بعضی معدنچیان اورانیوم متحمل بیشترین دُز جذبی‌اند ولی به دلیل جمعیت ناچیز از کمترین دُز معادل جمعی برخوردارند. پرتوگیری شغلی سبب افزایش ۶۳٪ به دُز زمینه می‌شود. به دلیل بهبود شرایط حفاظت پرتویی بطور کلی، دُز معادل مؤثر

جمعی پزشکی و دیگر گروه‌های شغلی به دلیل کاهش دُز فردی یا کاهش جمعیت شاغلین (مثلاً کارگران سوخت هسته‌ای) در حال کاهش است.

جدول ۳-۳ دُز معادل مؤثر جمعی سالانه تمامی چشمه‌ها در امریکا

منبع	نفر_سیورت در سال	درصدکل
رادون	۴۶۰۰۰۰	۵۵
پرتوهای زمینه بجز رادون	۲۳۰۰۰۰	۲۸
پرتو پزشکی	۱۲۳۰۰۰	۱۵
منابع طبیعی افزایشی (محصولات مصرفی، آب منازل و غیره)	۲۰۰۰۰	<۱
شغلی	۲۰۰۰	<<۱
منابع محیطی متفرقه	۱۶۰	<<<۱
نیروگاه هسته‌ای	۱۳۰	<<<۱
کل	۸۳۵۰۰۰	۱۰۰

گزارش شماره ۹۳ NCRP، انجمن ملی حفاظت و اندازه‌گیری پرتو، سال ۱۹۸۷، پرتوگیری جامعه امریکا، Bethesda, MD.

جدول ۳-۴ خلاصه‌ای از دُز معادل مؤثر جمعی برای طبقات شغلی امریکا

طبقه شغلی	نفر - Sv
کاربران نیروگاه هسته‌ای	۵۵۰
کارکنان پزشکی	۴۲۰
صنعت (بجز چرخه سوخت هسته‌ای)	۳۹۰
خدمه پرواز	۱۷۰
معدنچیان اورانیوم	۱۱۰

گزارش شماره ۱۰۱ NCRP، انجمن ملی حفاظت و اندازه‌گیری پرتو، Bethesda, MD. ۱۹۸۹، پرتوگیری شاغلین مراکز پرتوگیری امریکا

دُز مؤثر ژنتیکی (Genetically Significant Dose) GSD

دُز معادل مؤثر ژنتیکی (GSD) برای اندازه‌گیری خطر ژنتیکی یا تأثیرپذیری جامعه از یک منبع پرتوزا است. بنا به تعریف GSD دُزی برحسب سیورت است که چنانچه تمام افراد جامعه آن را دریافت کنند، آسیب ژنتیکی آن مساوی با صدمات ژنتیکی ناشی از دُز جذبی افرادی است که واقعاً پرتوگیری کرده‌اند. برای تعیین GSD دُز غدد جنسی فرد پرتوگرفته در ضریب وزنی تعداد حاملگی احتمالی آن (تابع سن و جنس است) ضرب می‌شود. بیشترین سهم دُز مؤثر ژنتیکی

مربوط به پرتوهای زمینه، یعنی پرتوهای کیهانی، پرتوهای زمینی و رادیونوکلئیدهای بدن است. سهم گاز رادون در GSD مقدار ناچیزی است، زیرا تقریباً تمام دُز در بافت پوششی نایچه‌ها جذب می‌شود.

پرتوگیری پزشکی مهمترین منبع تکنولوژیک سهمیم در GSD است (۰.۱۵٪)، که تقریباً ثلث آن به پرتوگیری مردان و بقیه به پرتوگیری زنان مربوط می‌شود. چون تخمدان در لگن قرار دارد و در پرتونگاریهای شکم و لگن تخمدان در معرض پرتوهای اولیه است.

جدول ۵-۳ دُز مؤثر ژنتیکی (GSD) سالانه جامعه آمریکا

چشمه	mSv
رادیونوکلئید در بدن	۰.۳۶
زمینی	۰.۲۸
کیهانی	۰.۲۷
رادون	۰.۱
پرتوی X تشخیصی	۰.۲
پزشکی هسته‌ای	۰.۰۲
کل	۱.۳

گزارش شماره ۹۳ NCRP پرتوگیری جامعه آمریکا، Bethesda, MD.

۲-۳ دُزیمتر فردی

به‌منظور رعایت بهداشت پرتو و اجرای مقررات، نیاز به اندازه‌گیری پرتوگیری فردی است. این اندازه‌گیری ممکن است هرچند دقیقه یا چند ماه بطور متناوب لازم باشد. چهار نوع دُزیمتر فردی مهم در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای با مزایا و معایب خاص خود مورد استفاده قرار می‌گیرند و عبارتند از:

الف: فیلم بچ، (ب) دُزیمتر فسفر ذخیره‌ای (مثلاً، دُزیمتر ترمولومینسانس TLD) و (پ) دُزیمتر جیبی (ج) دُزیمتر دیودی.

اگر یک نوع دُزیمتر فردی تمام نیازهای دُزیمتری در تصویرسازی پزشکی را فراهم می‌ساخت بسیار خوب و ایده‌آل بود. یک دُزیمتر ایده‌آل باید از ویژگی‌های، پاسخ سریع، قابلیت تشخیص انواع پرتوهای یونساز، اندازه‌گیری دقیق دُز پرتوهای یونساز با انرژیهای keV تا MeV و مستقل از زاویه تابش برخوردار باشد. بعلاوه باید کوچک، سبک، کاربری آسان، محکم، ارزان و مستقل از تغییرات شرایط محیط (مثلاً گرما، رطوبت، فشار و منابع پرتوهای غیریونساز) باشد. متأسفانه

یک چنین دُزیمتری وجود خارجی ندارد؛ با این حال، با انتخاب مناسب‌ترین دُزیمتر برای هر کاربردی، اکثر این ویژگی‌ها به درجات مختلف تأمین می‌شوند.

فیلم بچ

فیلم بچ عمومی‌ترین دُزیمتر مورد استفاده در پزشکی و صنعت است. این دُزیمتر شامل یک فیلم کوچک (شبییه فیلم پرتونگاری دندان) درون لفافه کاغذی است که داخل حفاظ پلاستیکی مخصوصی به نام بچ قرار گرفته و روی لباس نصب می‌شود. امولسیون این فیلم مشابه فیلم پرتونگاری در اثر پرتوی X پس از ظهور و ثبوت سیاه می‌شود. با افزایش دُز جذبی، امولسیون فیلم سیاه‌تر می‌شود میزان سیاهی با دستگاه دانسیتومتر قابل اندازه‌گیری است.

امولسیون فیلم حاوی دانه‌های برمید نقره است که عدد اتمی مؤثر آن بیش از عدد اتمی بافت است، در نتیجه، دُز فیلم معادل دُز بافت نمی‌شود. با انتخاب چندین فیلتر فلزی بر روی فیلم (معمولاً سرب، قلع و آلومنیوم) و استفاده از نسبت دانسیته نوری فیلم زیر فیلترها، محدوده انرژی پرتو مشخص و امکان تبدیل دُز فیلم به دُز بافت فراهم می‌شود. فیلم بچ دارای منطقه‌ای بدون فیلتر فلزی یا پوشش پلاستیکی است که مستقیماً مورد تابش قرار می‌گیرد. این قسمت (پنجره باز) برای آشکارسازی پرتوهای بتای پرانرژی و متوسط است (شکل ۱-۳).

اکثر فیلم بچ‌ها قادر به اندازه‌گیری دُزهای ۰/۱ mGy تا ۱۵ Gy تابش‌های فوتونی و ۰/۵۰ mGy تا ۱۰ Gy پرتوهای بتا هستند. معمولاً فیلم داخل بچ هر دو ماه برای پردازش به مؤسسه طرف قرارداد ارسال و گزارش پرتوگیری، دو ماه بعد به همراه فیلم‌های جدید دریافت می‌شود. فیلم ظاهر شده، معمولاً نزد مؤسسه دُزیمتری، نگهداری و امکان ثبت دائمی پرتوگیری فراهم می‌شود.



شکل ۱-۳ A: دزیمتر فیلم بچ با یک عدد فیلم دندانپزشکی در پوشش ضد نور. بچ دارای پنج بخش است: (الف) پنجره باز که پرتوهای بتا و گاما با انرژی‌های مختلف قادر به نفوذ و سیاه کردن هستند (ب) قسمت پلاستیکی نازک 50 mg/cm^2 که پرتوی بتا پرانرژی قادر به نفوذ است (پ) قسمت پلاستیک ضخیم 300 mg/cm^2 که پرتوهای گامای کم انرژی نفوذ نمی‌کنند. (ت) بخش فیلتر آلومنیوم با ضخامت ۱ mm (ث) بخش فیلتر 0.3 mm Pb و 0.7 mm Sn

گزارش دُزیمتری شامل دُز سطحی یعنی دُز پوست و دُز عمقی مربوط به پرتوهای نفوذی است. فیلم بچ‌ها سبک، ارزان، کوچک و دارای کاربری آسانند. ولی امولسیون فیلم متأثر از گرما و رطوبت است. فیلم بچ معمولاً روی نقطه‌ای از بدن نصب می‌شود که دارای بیشترین پرتوگیری یا حساسیت پرتویست. اکثر رادیولوژیست‌ها یا تکنسین‌های رادیولوژی و پزشکی هسته‌ای فیلم‌بچ را روی کمر بند یا لبه جیب پیراهن خود نصب می‌کنند. معمولاً هنگام پرتونمایی، فیلم‌بچ در نزدیکی یقه و روی روپوش سربی نصب می‌شود تا دُز تیروئید و عدسی چشم اندازه‌گیری شود، زیرا بخش اعظم بدن با روپوش سربی محافظت می‌شود. پرتوکاران حامله معمولاً برای اندازه‌گیری دُز جنین فیلم بچ دیگری زیر روپوش سربی نصب می‌کنند.

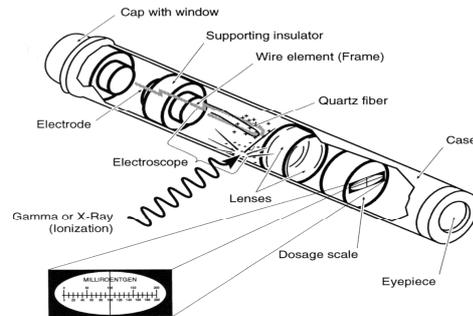
دُزیمترهای ترمولومینسانس

بعضی دُزیمترها حاوی فسفرهای ذخیره‌ای‌اند، یعنی الکترون‌های برانگیخته از پرتوهای یونساز، در حالت تحریک باقی می‌مانند. و اگر توسط حرارت، از دام برانگیختگی رها شوند با انتشار نور به تراز پایین‌تر سقوط می‌کنند. دُزیمترهای ترمولومینسانس (TLD) دُزیمترهای فردی بسیار دقیق هستند؛ البته در مقایسه با فیلم‌بچ گرانتر و در پرتونمایی تشخیصی کمتر رواج دارند. بلور لیتیم فلوراید (LiF) معمول‌ترین بلور TLD برای دُزیمتری فردی است. محدوده پاسخ این دُزیمتر 0.1 mSv تا 10^3 Sv است و قابلیت استفاده مکرر دارد. مزیت دیگر آن نزدیکی عدد اتمی مؤثر آن با بافت‌های بدن است؛ بنابراین، در محدوده بزرگی از انرژی دُز آن مشابه دُز بافت است. در TLD ثابت‌دایمی دُز نداریم زیرا برای خواندن دُز نیاز به گرم کردن بلور و خروج انرژی جذبی است. یک انگشتر حاوی بلور TLD بیشترین دُز جذبی را در جریان آماده‌سازی و تجویز پرتودارو ثبت می‌کند. برای دُزیمتری در فواصل زمانی طولانی (مثلاً یک فصل) باز هم TLD دُزیمتر انتخابی است.

دُزیمترهای جیبی

مهمترین عیب دُزیمترهای TLD و فیلم بچ، عدم امکان قرائت همزمان است در حالی‌که در دُزیمترهای جیبی، مقدار دُز بطور همزمان قرائت می‌شود. نوع آنالوگ دُزیمتر جیبی (اتاقک یونساز جیبی) دارای یک رشته نازک کوارتز که روی فریم متصل به الکتروود مثبت، در اتاقک هوا معلق است. در اثر نیروی دافعه کولنی رشته نازک کوارتز از فریم دور می‌شود و جابه‌جایی آن توسط سیستم عدسی نوری که برحسب رنگن مدرج شده، قابل مشاهده است. در اثر برخورد پرتو، هوای داخل آشکارساز یونیزه می‌شود، بنابراین مقداری از بار مثبت هوای اتاقک، خنثی و نیروی دافعه کولنی آن کاهش و رشته کوارتز به فریم نزدیک می‌شود. این

جابجایی به شکل حرکت خط نازکی روی صفحه مدرج قابل مشاهده است (شکل ۲-۳). اتاقک‌های یونی جیبی نوعاً برای آشکارسازی فوتون‌های با انرژی بیش از ۲۰ keV به کار می‌روند. عمومی‌ترین مدل آن‌ها، از صفر تا ۲۰۰ mR یا صفر تا ۵ R مدرج شده‌اند. این دُزیمترها، کوچک (اندازه خودکار) و دارای کاربری آسانند اما در اثر ضربه خطا در اندازه‌گیری بوجود می‌آید. دارای قابلیت استفاده مکرر ولی فاقد ثبت دائمی دُز هستند.



شکل ۲-۳ مقطعی از اتاقک یونی جیبی آنالوگ

پرتوگیری به صورت مقدار بار الکتریکی ناشی از پرتوهای یونساز در واحد جرم هوا و برحسب کولمب بر کیلوگرم (C/kg) تعریف می‌شود. یکای قدیمی آن رنتگن که $R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ است. دُز پرتوگیری در هوا قابل محاسبه است و به موجب آن هر رنتگن 0.876 rad دُز جذبی در هوا تولید می‌کند.



شکل ۳-۳- دُزیمتر جیبی آنالوگ به همراه شارژر ساخت شرکت ویکتورین

دُزیمترهای دیجیتالی یا رقمی که از دیودهای حساس به پرتوهای ایکس و بتا ساخته شده‌اند، کاربرد وسیع یافته‌اند. این دُزیمترها قادر به اندازه‌گیری دُز پرتوهای فتونی و بتا به‌طور مجزا می‌باشند. همچنین تغییرات زمانی دُز یا سرعت دُز را نیز نمایش و با الارم مقادیر بیش از حد مجاز را هشدار می‌دهند بنابراین به عنوان دُزیمتر پرتوکار و مانیتورینگ محیط بکار می‌روند. (۳-۴).



شکل ۳-۴، دزیمتر دیودی پرتوی گاما و فلومتر بتا، این ابزار قادر به نمایش دُز-ریت گاما نیز می‌باشد.

جدول ۳-۶ خلاصه‌ای از روش‌های مانیتورینگ فردی

روش	مورد اندازه‌گیری	محدوده مفید	ثابت دائم	مورد استفاده
فیلم بچ	پرتوی β, γ, x	$(\gamma \text{ و } x) 0.1 \text{ mSv}$ تا 15 Sv $(\beta) 0.5 \text{ mSv}$ تا 10 Sv	بله	مانیتور فردی، کاربرد در مراکز پرتو تشخیصی
دُزیمتر TLD	پرتوی β, γ, x	0.1 mSv تا 1000 kSv	خیر	باید معمول شود ولی گران است، برای دُزیمتری بیمار و پرسنل
دُزیمتر جیبی	پرتوی γ, x	آنالوگ: 0.2 تا 0.5 و 5 تا 50 رننگن، دیجیتال: 10 تا 100 رم	خیر	مانیتورینگ خاص (آنژیوگرافی)، قرائت مستقیم و زمان واقعی

TLD, Thermoluminescent dosimeter

مسایل دُزیمتری

مسایل عمومی دُزیمترها عبارتند از: جاماندن احتمالی دُزیمتر در محیط پرتو؛ آلودگی دُزیمتر به مواد پرتوزا؛ گم شدن و خرابی دُزیمتر؛ عدم استفاده از دُزیمتر هنگام کار با منابع پرتوزا؛ قرار گرفتن بدن بین دُزیمتر و منبع پرتوزا و تضعیف پرتو که سبب اندازه‌گیری دُز کمتر از واقعی می‌شود. قرارگیری افراد در شرایط هندسی متغیر نسبت به منابع پرتو، سبب می‌شود مقادیر اندازه‌گیری، متوسط پرتوگیری فرد محسوب شود. برای مثال، اگر فیلم بچ به‌طور صحیح نصب شود و تابش از جهت‌های مختلف باشد و یا فردی که از فیلم بچ استفاده می‌کند نسبت به

چشمه جهت‌های اتفاقی بگیرد، متوسط پرتوگیری در مرحله‌ای از زمان تقریب خوبی ($\pm 10\%$) تا ($\pm 20\%$) از پرتوگیری واقعی خواهد بود.

آشکارسازی پرتو

انواع آشکارسازهای پرتو در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که مشخصات آن‌ها برای هر کاربردی بهینه است. کنتورگایگر و اتاقلک‌یونساز برای حفاظت از پرتو بهترین آشکارساز است. به‌منظور ارزیابی خروجی دستگاه‌های رادیولوژی نیاز به اتاقلک‌های یونساز خاصی است که بتوانند پرتوگیری، سرعت پرتوگیری و زمان پرتوگیری را اندازه‌گیری کنند. تمام آشکارسازهای پرتابل باید حداقل سالی یکبار کالیبره شوند.

در اثر برخورد پرتوی پرتو با ماده، تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاصی در آن پدید می‌آید. این تغییرات موقتی یا دائمی، اساس آشکارسازی پرتوهای پرتوهای را تشکیل می‌دهد. البته، این تغییرات عموماً ناچیز و نامحسوس است. بنابراین، روش‌های بسیار پیچیده‌ای برای آشکارسازی ابداع شده است. در این‌جا به شرح انواع آشکارسازهای می‌پردازیم.

آشکارسازی ساده

آیا پرتو وجود دارد؟ معمولاً در مواردی نظیر آلودگی فردی یا محیطی، این سؤال مطرح می‌شود.

کمیت پرتو

چه مقدار پرتو یا رادیواکتیویته وجود دارد؟ به‌طور مطلق یا نسبی باید به این سؤال اساسی پاسخ داد. همچنین در مواردی لازم است سرعت رادیواکتیویته یا سرعت شمارش به‌صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری شود.

انرژی پرتو

در روش‌های آنالیز مواد، فیزیک هسته‌ای و شناسایی نواحی آلوده به مواد رادیواکتیو اطلاع از میزان انرژی پرتو برای شناسایی عنصر مورد نیاز است.

ماهیت پرتو

قاعدتاً یک آشکارساز نمی‌تواند به تمام این سؤالات پاسخ دهد. مثلاً آشکارساز گایگر مولر می‌تواند هر پرتویی را که با آن برخورد می‌کند و نه انرژی آنرا، اندازه بگیرد. آشکارسازهای جرقه‌ای می‌توانند هم انرژی و هم برخورد پرتو را تشخیص دهند. اتاقلک یونساز نمی‌تواند به‌عنوان شمارشگر یا تعیین‌کننده انرژی پرتو به‌کار رود؛ ولی در بسیاری از شرایط، نظیر اندازه‌گیری مقدار پرتودهی، مفید خواهد بود.

کارایی ذاتی یا حساسیت

حساسیت (E_i) یک آشکارساز، توانایی آن در ثبت هرچه بیشتر پرتوها است و به صورت نسبت تعداد پرتوهای آشکارشده (α, β, γ) به تعداد پرتوهای ورودی به حجم حساس آشکارساز، تعریف می‌شود. حساسیت ۵۰ درصد به این معنی است که فقط نیمی از پرتوهای ورودی به حجم حساس آشکارساز، ثبت می‌شوند و نیمه دیگر با حجم حساس برهمکنش نمی‌کند. در پزشکی هسته‌ای کارایی بالای آشکارساز که سبب کاهش زمان تصویرگیری یا کاهش دُز بیمار می‌شود، مفید است. حساسیت یک آشکارساز اصولاً به ضریب تضعیف خطی، μ (linear) و حجم حساس آشکارساز بستگی دارد.

زمان مرده یا زمان بازیافت

زمان مرده یا زمان بازیافت، معرف توانایی و دقت عمل یک آشکارساز در مواجهه با سرعت شمارش مقادیر زیاد رادیواکتیویته است. در بسیاری از آشکارسازها فرصت کوتاه و محدودی بین برخورد پرتو به آشکارساز و پاسخ آشکارساز و ثبت اتفاق وجود دارد. این فرصت، زمان مرده یا زمان بازیافت آشکارساز نامیده می‌شود. اگر پرتوی دوم در حالی برسد که پردازش پرتوی اول تمام نشده باشد، پرتوی دوم و دیگر پرتوهای رسیده در زمان غیرحساس آشکارساز، شمارش نمی‌شوند. به طور ایده‌آل، آشکارساز باید، تا حد ممکن است زمان مرده کمتری داشته باشد تا بدون از دست دادن مقدار قابل توجهی شمارش، قادر به ثبت سرعت‌های شمارش بالا باشد. به هر حال، برای سرعت شمارش‌هایی که در پزشکی هسته‌ای برای دُزهای روزمره، پیش می‌آید، آشکارساز با زمان مرده $10 \mu\text{sec}$ قابل قبول است. ولی در تصویربرداری دینامیک قلب که نیاز به سرعت شمارش بالاست، زمان مرده ۲ تا ۳ میکروثانیه مناسب است.

قدرت تفکیک انرژی^۱

توانایی یک آشکارساز در تفکیک دو پرتو با انرژی‌های نزدیک بهم را قدرت تفکیک انرژی می‌نامند. اگر قدرت تفکیک یک آشکارساز، 20 keV باشد، این آشکارساز، قادر به تفکیک دو پرتوی γ با اختلاف انرژی کمتر از 20 keV نمی‌باشد. قدرت تفکیک انرژی یک آشکارساز به عنوان میزان خطای یک آشکارساز در تعیین انرژی پرتوی γ یا x نیز محسوب می‌شود.

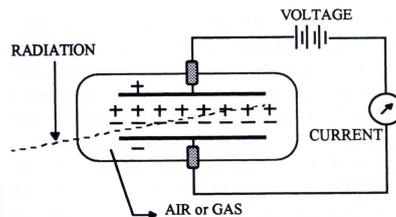
آشکارسازهای گازی

مهمترین ویژگی پرتوهای پرانرژی، یونسازی در ماده است. به طور کلی به جز در گازها و چند جامد نیمه هادی، امکان اندازه‌گیری یون‌های تولیدی در مواد وجود ندارد. اساس سه نوع آشکارساز گازی (اتاقک یونساز، شمارشگر تناسبی و شمارشگر گایگر مولر) اندازه‌گیری یون‌های تولیدی پرتو در حجم کوچکی از گاز است.

^۱Energy Resolution

سازوکار آشکارسازهای گازی

برای تشریح سازوکار آشکارسازهای گازی، بیاید بینیم وقتی یک پرتو یا ذره شتابدار، در حجم گازی حاوی دو الکتروود با اختلاف پتانسیل V ، یونسازی می‌کند، چه اتفاقی رخ می‌دهد. اگر ولتاژ بین دو الکتروود صفر باشد، جفت یون تولیدی، باز ترکیب شده، به اتم یا مولکول خنثی تبدیل می‌شود. در نتیجه جریان الکتریکی نخواهیم داشت؛ ولی تحت تأثیر میدان الکتریکی، ناشی از اختلاف پتانسیل الکتروودها، تعدادی جفت یون به طرف الکتروودها رفته، جریان الکتریکی لحظه‌ای تولید می‌شود.



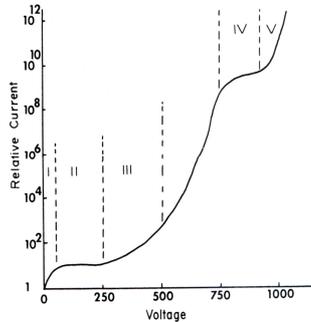
شکل ۳-۵- نمای ساده‌ای از سازوکار اتاقک یونساز

شدت جریان تولیدی به عواملی نظیر ولتاژ آند-کاتد (V)، فاصله بین دو الکتروود، نوع گاز، حجم، فشار، دمای گاز، شکل و موقعیت الکتروودها بستگی دارد. با این حال ولتاژ بین دو الکتروود، مهمترین عامل است. شدت جریان ناشی از یک پرتو در آشکارسازگازی به صورت تابعی از ولتاژ در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. در این رابطه، پنج ناحیه جداگانه وجود دارد که نیاز به توضیح دارد. البته در صورت عدم یونسازی پرتو با وجود ولتاژ، جریان الکتریکی نخواهیم داشت. ناحیه ۱- باز ترکیب: ولتاژ به حدی ناچیز است که جفت یون‌های تولیدی باز ترکیب شده، اتم‌ها و مولکول‌های خنثی بوجود می‌آید. با افزایش ولتاژ، به تدریج جفت یون‌ها جذب الکتروودها شده، جریان الکتریکی تولید می‌شود.

ناحیه ۲- کفه یونسازی: در این ناحیه ولتاژ به قدر کافی زیاد است که تمام جفت یون‌های حاصل از برخورد پرتو با گاز داخل اتاقک، جذب الکتروودها می‌شوند. به دلیل جمع‌آوری تمام جفت یون‌ها، با افزایش ولتاژ شدت جریان تغییر محسوسی نمی‌کند. البته شدت جریان تولیدی یک پرتو یا ذره منفرد کمتر از آن است که آشکار شود، بنابراین برهمکنش تعداد زیادی از پرتوها قابل ثبت و آشکارسازی است.

ناحیه ۳- ناحیه تناسبی: باز هم ولتاژ افزایش داده می‌شود. این ولتاژ نه تنها برای جذب تمام جفت یون‌های اولیه به الکتروودها کافی است بلکه انرژی کافی به جفت یون‌های اولیه نیز می‌دهد تا هنگام عبور از میان مولکول‌های گاز، جفت یون‌های ثانویه تولید کنند. تولید تعداد جفت

یون‌های ثانویه به ولتاژ اعمال شده، بستگی دارد. در نتیجه، با افزایش ولتاژ، جریان ناشی از پرتو افزایش می‌یابد. اکنون شدت جریان برای آشکارسازی پرتو یا ذره منفرد که با حجم گاز برخورد کند، به قدر کافی زیاد هست. جریان تولیدی با انرژی پرتو متناسب است ولی با افزایش بیشتر ولتاژ (ناحیه علامت گذاری نشده بین ۳ و ۴) این نسبت غیرخطی می‌شود.



شکل ۳-۶ نواحی مختلف اتاقک یونساز، تغییرات شدت جریان خروجی آشکارساز نسبت به ولتاژ اعمال شده

ناحیه ۴ - کفه GM : ولتاژ به حدی افزایش یافته است که جفت یون‌های اولیه ناشی از پرتو یا ذره شتاب‌دار، انرژی بسیار زیادی برای تولید جفت یون‌های ثانویه و حالت برانگیختگی کسب می‌کنند؛ در نتیجه مولکول‌های گاز، بیشتر یونیزه و برانگیخته می‌شوند. بازگشت مولکول‌ها از حالت برانگیخته تولید نور فرابنفش می‌کنند که موجب یونسازی بیشتر می‌شود؛ در نتیجه حجم گاز به حالت تخلیه موقت رسیده، شدت جریان تولیدی کم و بیش مستقل از ولتاژ و انرژی پرتو می‌گردد.

ناحیه ۵ - ولتاژ به حدی زیاد است که برای تخلیه الکتریکی به پرتو نیازی نیست. تحت این میدان الکتریکی قوی، الکترون‌ها از لایه‌های اتمی بیرون کشیده شده، اتم‌ها و مولکول‌ها یونیزه می‌شوند و تخلیه الکتریکی بی‌نیاز از پرتو به وجود می‌آید. در این ناحیه امکان آشکارسازی پرتو وجود ندارد.

آشکارساز اتاقک یونساز

اتاقک یونساز یکی از قدیمی‌ترین آشکارسازهای گازی برای اندازه‌گیری مقدار پرتو است. ولتاژ اعمال شده به این آشکارساز در ناحیه ۲ شکل ۳-۶ واقع است. در این ناحیه تغییرات جزئی در ولتاژ اعمال شده تأثیر قابل توجهی در شدت جریان ایجاد نمی‌کند. بنابراین اتاقک یونساز بسیار پایدار و معتبر است. این آشکارسازها در ابعاد و اشکال مختلف ساخته می‌شوند. حساسیت ضعیف برای پرتوی X یا γ و عدم تفکیک انرژی، مهمترین عیب آن است. به علت شدت جریان ضعیف ناشی از یک پرتو یا ذره، یک شمارنده محسوب نمی‌شود.

در صورت نیاز به اندازه‌گیری دقیق پرتوگیری، اتاقک یونساز گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اتاقک‌ها تقریباً از شرایط تعریف شده رنتگن برخوردارند و کاربردهای متنوعی نظیر اندازه‌گیری خروجی دستگاه اشعه ایکس تشخیصی و درمانی، اندازه‌گیری میدان تابش براکی‌تراپی و رادیونوکلوئیدتراپی دارند.

اندازه‌گیری اتاقک یونساز تابع تغییرات دما، فشار هوا، انرژی فوتون و سرعت پرتوگیری است. یک اتاقک یونساز در سرعت پرتوگیری 10 R/hr ، فقط ۵٪ خطا دارد ولی آشکارسازهای تخصصی می‌توانند سرعت پرتوگیری بسیار بالاتر را نیز اندازه بگیرند. اکثر اتاقک‌های یونساز به تغییرات سریع سرعت پرتوگیری، پاسخ آهسته می‌دهند. این ابزار قبل از اندازه‌گیری دقیق، باید به شرایط پایدار و ثابت برسند. اتاقک‌های یونساز نوعاً قادر به اندازه‌گیری سرعت پرتوگیری 1 mR/hr تا 500 R/hr برای فوتون‌های با انرژی بیش از 20 keV هستند. بعضی اتاقک‌های یونساز دارای پوششی بر روی آشکارسازند که می‌تواند دُز پرتوی بتا را حذف کند. پاسخ آهسته و حساسیت کم این آشکارسازها مانع استفاده آن‌ها در بررسی آلودگی‌های کم یا یافتن چشمه پرتوزای ضعیف می‌گردد. اتاقک یونساز در پزشکی هسته‌ای به‌عنوان دُز کالیبراتور برای اندازه‌گیری رادیواکتیویته در حد میلی کوری تا کوری و برای دُزیمتری فردی پرتوکار به صورت دُزیمتری جیبی و بالاخره با حجم بزرگ اتاقک برای مانیتورینگ محیطی بکار می‌رود.

دُز کالیبراتور

معمولاً دُز کالیبراتور اتاقک‌های یونساز استوانه‌ای شکل حاوی گاز نادرآرگون با فشار زیاد (تقریباً 20 اتمسفر) است. فشار زیاد چگالی را افزایش می‌دهد و موجب افزایش حساسیت اتاقک یونساز می‌شود. حفره استوانه‌ای در طول محور وجود دارد که لوله آزمایش حاوی نمونه رادیواکتیو برای شمارش، درون آن قرار می‌گیرد. این شکل هندسی، سبب افزایش حساسیت آشکارساز می‌شود. دیوارهای خارجی اتاقک کاملاً حفاظ‌گذاری شده، به طوری که تابش‌های خارج از اتاقک سبب حداقل تداخل می‌شوند. اصول و عمل یک دُز کالیبراتور بسیار ساده است. جریان الکتریکی ناشی از منبع رادیواکتیو در اتاقک یونساز، با مقدار رادیواکتیویته چشمه تناسب مستقیم دارد. با این حال، رادیونوکلوئیدهای مختلف با مقدار اکتیویته یکسان جریان الکتریکی متفاوتی تولید می‌کنند. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در فراوانی انتشار و انرژی پرتوی γ است. بنابراین، قبل از این که از اتاقک یونساز به‌عنوان یک دُز کالیبراتور استفاده شود، برای هر رادیونوکلوئیدی، باید کالیبره شود. با تعیین ضرایب کالیبراسیون و از ضرب جریان ناشی از رادیواکتیویته نامعلوم به ضریب کالیبراتور، مقدار رادیواکتیویته نامعلوم یک رادیونوکلوئید به سادگی تعیین می‌شود.

آشکارساز یا شمارشگر تناسبی

این آشکارسازها در ناحیه (۳) شکل (۶-۳) کار می‌کنند که یون‌های اولیه به دلیل تولید یون-های ثانویه تقویت (تقریباً یک میلیون بار) شده‌اند. بنابراین شدت جریان الکتریکی کافی تولید می‌شود. شدت جریان با انرژی پرتو متناسب است. از این رو آشکارساز تناسبی برخلاف اتاقک یونساز برای شمارش تک پرتو و تعیین انرژی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. کار با شمارشگر تناسبی به مهارت کافی نیاز دارد. پایداری به زمان و تغییرات ولتاژ آن به خوبی اتاقک یونساز نیست. شمارشگرهای تناسبی کاربرد عمومی ندارد

آشکارساز یا شمارشگر گایگر-مولر

ولتاژ آشکارسازهای GM در ناحیه (۴) شکل (۶-۳) قرار دارند. در این حالت با ورود پرتو، گاز آشکارساز تخلیه الکتریکی شده، شدت جریانی کم و بیش مستقل از انرژی پرتو و ولتاژ اعمالی تولید می‌شود. چگونه می‌توان فرآیند تخلیه بار الکتریکی ناشی از پرتو را متوقف کرد تا آشکارساز برای پرتوی بعدی آماده شود؟

این کار به طور شیمیایی با افزودن قدری هالوژن یا ترکیبات آلی آن به عنوان ناخالصی به گاز انجام می‌شود. این ناخالصی که فرونشان^۱ شیمیایی نامیده می‌شوند نور فرابنفش تولیدی هنگام تخلیه بار و انرژی جفت یون‌های ثانویه را جذب می‌کنند. مولکول‌های فرونشان با جذب انرژی و تجزیه خود، تخلیه بار الکتریکی را متوقف می‌سازند، ولی در مدت کوتاهی، بیشتر مولکول‌های فرونشان بازترکیب شده به صورت اولیه باز می‌گردند. بنابراین تعداد کمی از مولکول‌های فرونشان تجزیه می‌شوند. فرونشانی تخلیه بار بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه طول می‌کشد. در این مدت شمارشگر گایگر به پرتوی دیگری پاسخ نمی‌دهد؛ بنابراین، این مدت تقریباً زمان مرده آشکارساز است. حداکثر سرعت شمارش شمارشگرها معمولاً هزار شمارش در ثانیه است. آشکارساز گایگر حساس‌ترین آشکارساز گازی است و به شکل و اندازه‌های مختلف ساخته می‌شود، کار با آنها ساده و در برابر تغییرات دما و ولتاژ کاملاً پایداری دارند، ولی قادر به اندازه‌گیری انرژی پرتو نمی‌باشند. برای آشکارسازی پرتوی بتا، پنجره کوچکی در انتها یا یک طرف آشکارساز تعبیه شده است. هنگام آشکارسازی پرتوی X یا γ این پنجره معمولاً بسته و هنگام اندازه‌گیری بتا پنجره باز می‌شود.

بررسی گره‌های GM برای آشکارسازی و تخمین نیمه‌کمی پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرند. شمارشگر GM برحسب شمارش در دقیقه (cpm) یا mR/hr کار می‌کند. در اکثر کنتورهای گایگر، نسبت بین سرعت شمارش و سرعت پرتوگیری تابع پیچیده‌ای از انرژی فوتون است. با

^۱Quencher

این حال در بعضی پروب‌های GM که برای انرژی خاصی ساخته شده‌اند، بطور تقریب سرعت پرتوگیری (نوعاً mR/hr) قابل اندازه‌گیری است.

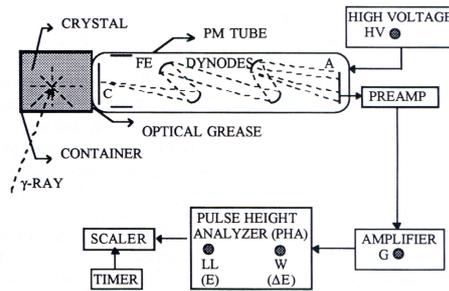
معمول‌ترین کاربرد شمارشگر GM امور حفاظت پرتویی نظیر بررسی میزان آلودگی، سرعت دُز زمین و میزان نشت اشعه از حفاظها است. پروب یک بررسی‌گر GM با پنجره‌ای نازک و پهن برای بررسی میزان آلودگی بسیار مناسب است (شکل ۷-۳). این آشکارسازها به راحتی پرتوهای زمینه را (۵ تا ۱۵ $\mu\text{R/h}$) آشکار می‌سازند. زمان مرده آن‌ها طولانی است در نتیجه در سرعت شمارش بالا، مقدار قابل توجهی شمارش هدر می‌رود. بررسی‌گرهای قدیمی گایگر در میدانهای تابش بالا، اشباع شده عدد صفر را نشان می‌دهند. شمارشگر GM برای بررسی آلودگی‌های کم، بسیار مناسب است و نباید در میدانهای تابش بالا و یا اندازه‌گیری دقیق سرعت پرتوگیری به کار روند.



شکل ۷-۳ بررسی‌گر به همراه پروب گایگر مولر و یک حفاظ پلاستیکی برای تفکیک پرتوهای بتا و گاما به منظور مانیتورینگ محیط و دُزیمتری پرسنل ساخت شرکت ویکتورین

آشکارسازهای جرقه‌ای

مواد متنوعی به‌عنوان فسفرهای جرقه‌ای شناسایی شده‌اند که تحت تأثیر پرتوی پرانرژی، نور تولید می‌کنند. این خاصیت در ابزاری به نام دتکتور جرقه‌ای برای آشکارسازی پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مشاهده نور تولیدی باید نور قادر به خروج از ماده آشکارساز باشد. در مایعات این نیاز مسأله مهمی نیست ولی برای جامدات باید از تک بلورها استفاده کرد، زیرا نور در مرز ریزبلورها جذب و پراکنده می‌شود، در نتیجه مقدار قابل توجهی نور قبل از آشکارسازی هدر می‌رود. دو ماده دیگر ترمولومینسانس و فتولومینسانس نیز به‌عنوان آشکارساز پرتو به کار می‌رود. این مواد انرژی پرتو را برای مدتی در خود ذخیره می‌سازند. سپس انرژی ذخیره با حرارت (ترمولومینسانس) یا تحت تابش نور لیزر (فتولومینسانس) به صورت نور رها می‌شود.



شکل ۸-۳ نمایشی از یک آشکارساز جرقه‌ای با فتومولتی پلایر و اجزای الکترونیک

آشکارسازهای ترمولومینسانس برای نمایش پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. آشکارسازهای فتولومینسانس در رادیولوژی تشخیصی به خصوص در رادیولوژی دیجیتال به کار می‌روند. در شکل مقابل به طور شماتیک یک شمارشگر جرقه‌ای، نمایش داده شده است که شامل ماده جرقه‌زن (کریستال)، افزونگرفوتونی (PMT) شامل صفحه فتوکاتد (C) و تعدادی داینود (FE) برای تبدیل نور مرئی به جریان تقویت شده‌ای از الکترونها، پیش تقویت کننده، تقویت کننده و قسمت‌های الکترونیکی نظیر انتخابگر ارتفاع پالس و سرعت شمار یا شمارنده برای جمع‌آوری و تحلیل خودکار داده‌هاست.

مواد جرقه‌زن (سینتیلاتور) بسیار متنوعند. آنتراسن، نفتالین، انواع پلاستیک‌ها، بلور هالیدهای قلیایی نظیر NaI(Tl)، یا CsF و تنگستات سرب نمونه‌ای از مواد جرقه زن هستند.

جرقه‌زن NaI(Tl)

در پزشکی هسته‌ای بلور یدور سدیم مخلوط با کمی تالیوم، NaI(Tl) در میان سینتیلاتورها، بیشترین کاربرد را دارد. متوسط چگالی ($d = 3.67 \text{ g/cm}^3$) و عدد اتمی مؤثر ($Z_{\text{eff}} = 45$) سبب کارایی آن برای آشکارسازی پرتوهای X و γ در انرژی‌های ۳۰ تا ۵۰۰ keV گردیده است. مقدار نور تولیدی در واحد انرژی جذبی در بلور NaI(Tl) یکی از مزیت‌های آن است. بلور یدور سدیم بدون ناخالصی تالیوم، نور زیادی تولید نمی‌کند و حضور مقدار کمی تالیوم نور منتشره را با ضریب ۱۰ یا بیشتر تقویت می‌کند. زمان استحالته فوسفورسانس که معمولاً معرف زمان مرده یک آشکارساز جرقه‌ای است، تقریباً ۰/۲۵ میکروثانیه است و برای مقادیر رادیواکتیویته مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای مناسب است، به علاوه فن‌آوری رشد این بلور در ابعاد بزرگ و اشکال مختلف به خوبی پیشرفت کرده است؛ به طوری که از دیگر آشکارسازهای جرقه‌زن اقتصادی‌تر است.

بلورهای یدور سدیم جاذب رطوبت است و اجباراً به طور کامل در دیواره‌های نازک آلومینیومی یا محفظه‌های آهنی پوشانده می‌شود. دیواره‌های آلومینیومی و آهنی به مقدار جزئی سبب

تضعیف پرتوهای پرنرژی ۷ می‌گردد. این بلورها نباید ناگهانی تحت تغییرات شدید دما قرار گیرند. حتی موقعی که بلا استفاده‌اند. پاسخ آشکارساز با تغییر دمای اتاق اندکی تغییر می‌کند. نور در حجم بسیار کوچکی از جرقه‌زن تولید می‌شود. این برد برای پرتوی X یا ۷ با انرژیهای کمتر از ۱ Mev بیش از یک میلی‌متر نیست. نور در تمام جهات عبور می‌کند. با پوشاندن تمام سطوح جانبی بلور (به جز وجه مقابل افزونگر فوتونی PMT) با انعکاس‌دهنده نور، نظیر اکسید منیزیم اکثر نورها به طرف افزونگر فوتونی هدایت می‌شوند.

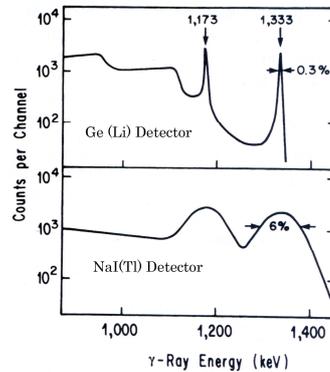
لامپ افزونگر فوتونی

مقدار نور تولیدی در بلور NaI(Tl) آن قدر کم است که به سختی با چشم دیده می‌شود. حتی اگر جرقه تولیدی با چشم دیده شود شمارش نورها عملی نیست. افزونگر فوتونی وسیله‌ای است که نور را به پالس‌های الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند. لامپ PMT از دریچه فتوکاتد که نور به آن وارد می‌شود، یک دسته الکترودهای فلزی به نام دینود با آرایش هندسی خاص و یک آند تشکیل شده است. تمام این اجزا در لوله شیشه‌ای خلأ قرار گرفته‌اند. در اثر برخورد نور به فتوکاتد و برهمکنش فتوالکتریک، الکترون کم انرژی تولید می‌شود. این الکترون تحت اختلاف پتانسیل (۵۰ تا ۱۰۰ ولت) به طرف یک دینود شتاب می‌گیرد. با این شتاب، الکترون‌ها به قدر کافی دارای انرژی جنبشی شده‌اند تا در برخورد با دینود الکترون‌های ثانویه تولید کنند. تعداد الکترون‌های ثانویه بین ۱ تا ۱۰ متغیرند، الکترون‌های ثانویه به طرف دینود دوم شتاب می‌گیرند (دو برابر ولتاژ دینود اولیه تغذیه شده‌اند) و افزایش الکترون‌ها تکرار می‌شود تا بالاخره در دینود نهایی (معمولاً دهم) بین ۱۰۵ تا ۱۰۸ الکترون به‌ازای هر الکترون تولید می‌شود. این الکترون‌ها، در آند جریان پالسی با دامنه چند میکروآمپری در عرض چند میکروثانیه تولید می‌کنند. ولتاژ دینودهای مختلف ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ ولت است. بهره یک PMT شدیداً به ولتاژ هر یک از دینودها وابسته است؛ بنابراین، تغییر جزئی در ولتاژ سبب تغییر عمده در خروجی آشکارسازها می‌گردد. بلور و افزونگر فوتونی معمولاً در محفظه ضد نور قرار دارند تا از رسیدن نور زمینه به افزونگر فوتونی جلوگیری شود.

آشکارسازهای نیمه‌هادی

معمولاً در یک جامد، جفت یون‌های تولیدی پرتوی یونساز، مشابه یک گاز قابل اندازه‌گیری نیست. ولی تحت شرایطی و برای دسته‌ای از مواد به نام نیمه‌هادی‌ها امکان اندازه‌گیری جفت یون‌ها فراهم می‌شود. دو تا از معمولترین آشکارسازهای نیمه‌هادی، Ge(Li) و Si(Li) هستند که از نیمه‌هادی ژرمانیم و سیلیسیم با مقدار کمی لیتیم ساخته شده‌اند. Ge(Li) برای آشکارسازی پرتوهای x یا ۷ استفاده می‌شود و Si(Li) اصولاً برای آشکارسازی پرتوهای ذره‌ای به کار می‌رود. مزیت اصلی آشکارساز Ge(Li) نسبت به آشکارساز جرقه‌ای، قدرت بالای تفکیک انرژی آن است.

یک آشکارساز Ge(Li) می‌تواند قدرت تفکیک انرژی ۱٪ در مقایسه با آشکارساز NaI(Tl) با قدرت تفکیک ۱۰٪ برای پرتوی های گامای ^{137}Cs داشته باشد. عیب اصلی آشکارسازهای Ge(Li) حساسیت پایین، نیاز به نگهداری در برودت ۷۷ درجه کلوین (دمای اتاق حدود ۳۰۰ کلوین است) و عدم دسترسی به ابعاد بزرگ آن است. در شکل فوق طیف حاصل از چشمه ^{60}Co که به وسیله آشکارساز Ge(Li) و NaI(Tl) به دست آمده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۹ طیف تفکیک انرژی در آشکارسازهای یدور سدیم و ژرمانیوم لیتیوم

حفاظت از پرتو و کنترل پرتوگیری

برای کاهش پرتوگیری چهار روش اساسی زمان، فاصله، حفاظ و کنترل آلودگی وجود دارد. این اصول در تمام برنامه‌های حفاظت پرتو بطور وسیع رعایت می‌شود.

زمان

بدون شک کاهش زمان حضور در کنار منابع پرتوزا سبب کاهش پرتوگیری می‌شود. ولی روش‌های حداقل‌سازی زمان همواره عملی نیستند. برای شروع باید گفت تمام منابع پرتوزا دارای سرعت پرتوگیری یکسان نمی‌باشند. دستگاه‌های رادیولوژی، معمولاً پرتودهی زیاد در زمان کوتاه تولید می‌کنند. برای مثال، در پرتونگاری ریه، پرتوگیری پوست در کمتر از ۵۰ میلی ثانیه تقریباً ۲۰ mR است، یعنی سرعت پرتوگیری ۱۴۴۰ R/hr است و برعکس در پزشکی هسته‌ای، پرتوگیری نوعاً با سرعت کم و زمان طولانی انجام می‌شود. برای مثال، معمولاً بیماری که پرتوداروی MDP نشاندار با ^{99}Tc با اکتیویته ۲۰ mCi، برای اسکن استخوان دریافت کند، پرتوگیری در فاصله یک‌متری آن تقریباً ۱ mR/hr است و دو ساعت پس از تزریق یعنی موقع تصویربرداری، از طریق واپاشی و دفع ادرار، پرتوگیری به نصف کاهش می‌یابد. بنابراین، به‌منظور کاهش پرتوگیری از بیماران حاوی مواد رادیواکتیو دانستن سرعت پرتوگیری و تغییرات زمانی آن بسیار مهم است. در جدول ۳-۷ میزان پرتوتابی از بیماران چند رادیودارو را نشان می‌-

دهد. بهترین روش حفاظتی از این بیماران کاهش زمان حضور در کنار آن‌ها و در مرحله دوم انتخاب فاصله مناسب از آن‌هاست. با کسب مهارت و استفاده از ابزار مناسب زمان حضور در کنار چشمه پرتوزا را می‌توان حداقل نمود. برای مثال، برای دوشیدن ژنراتور تکنسیم و آماده سازی پرتودارو نیاز به حضور در کنار چشمه‌های قوی پرتوزاست. تمرین این مراحل با منابع غیرپرتوزا و کسب مهارت برای اجرای عملیات بر روی مواد پرتوزا و استفاده از ابزار اندازه‌گیری و آماده‌سازی وسایل، بسیار مهم است. همچنین، هنگام فلورسکپی، چنانچه کاربر از مهارت کافی برخوردار باشد، پرتوگیری کارمندان و بیماران کاهش می‌یابد.

جدل ۳-۷ سرعت پرتوگیری در فاصله یک متری از بیمار بزرگسال که پرتودارو دریافت کرده است

نوع بررسی	پرتودارو	پرتوایی (mCi) ^a	سرعت پرتوگیری یک متری (mR/h)
درمان سرطان تیروئید	NaI- (¹³¹ I)	۲۰۰	۳۵
تصویر سازی تومور	FDG - (¹⁸ F)	۱۰	۵
تصویر از دریچه‌های قلب	RBC- (^{99m} Tc)	۲۰	۰٫۹
اسکن استخوان	MDP- (^{99m} Tc)	۲۵	۲٫۱
تصویر از تومور	سیترات گالیوم (۶۷)	۳	۰٫۴
اسکن طحال و کبد	سولفور کولوئید تکنسیم ۹۹ m	۴	۰٫۲
تصویر پرفیوژن عضله قلب	کلراید تالیوم ۲۰۱	۳	۰٫۱

^a MBq با ضرب در ۳۷ به دست می‌آید. اندازه‌های سرعت پرتوگیری با اجازه از Hartman دانشگاه کالیفرنیا

فاصله

سرعت پرتوگیری از یک چشمه نقطه‌ای (یعنی، چشمه‌ای که ابعاد آن بسیار کمتر از فاصله آن باشد) با مجذور فاصله از چشمه کاهش می‌یابد. قانون عکس مجذور فاصله، نتیجه ارتباط هندسی بین سطح (A) و شعاع (r) کره $A=4\pi r^2$ است. بنابراین اگر یک چشمه نقطه‌ای را در مرکز کره در نظر بگیریم، سطح انتشار پرتو با مربع فاصله از چشمه (یعنی شعاع) افزایش می‌یابد. اگر در فاصله d_1 سرعت پرتوگیری چشمه‌ای X_1 باشد در d_2 مقدار آن X_2 خواهد شد:

$$X_2 = X_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (3-1)$$

برای مثال، اگر سرعت پرتوگیری در ۲۰ cm از چشمه‌ای ۹۰ mR/hr باشد، دوبرابر شدن فاصله باعث کاهش پرتوگیری با ضریب $\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$ یعنی ۲۲٫۵ mR/h و افزایش فاصله به ۶۰ cm سبب کاهش پرتوگیری به $\left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}$ یا ۱۰ mR/h می‌شود. این نسبت فقط برای چشمه نقطه‌ای معتبر است. بنابراین، در نزدیکی بیمار حاوی ماده پرتوزا (یعنی، کمتر از یک متری) این قاعده

معتبر نیست. در این موارد پرتوگیری بیش از عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد. این تغییر سریع سرعت پرتوگیری با فاصله، مشابه دور نگهداشتن دست از یک منبع حرارتی نظیر شعله شمع یا کوره است. با قدری فاصله از هیترهای الکتریکی گرما مطلوب است، در حالی که در نزدیکی آن گرما غیرقابل تحمل و کمی دورتر گرما احساس نمی‌شود. پرتوهای پراکندگی بیمار، یک منبع پرتوگیری برای رادیولوژیست‌ها و تکنسین‌های رادیولوژی است. براساس یک قانون تقریبی در پرتوهای x تشخیصی، شدت پرتوهای پراکندگی در زاویه ۹۰ درجه و فاصله یک‌متری بیمار حدود یک دهم درصد پرتوی فرودی با سطح مقطع 400 cm^2 است. ولی تمام پرسنل بدون در نظر گرفتن نوع پرتونگاری تا حد ممکن باید دور از بیمار بایستند. پیشنهاد NCRP دور ایستادن حداقل دو متر از تیوب رادیولوژی و بیمار و پشت حفاظ یا در صورت امکان بیرون از اتاق است. از آنجا که در پزشکی هسته‌ای، امکان استفاده از روپوش سربی برای تکنسین‌ها وجود ندارد، رعایت حداقل زمان و حداکثر فاصله از بیمار بهترین روش کاهش دُز اپراتورهاست. پرتوگیری سالانه فن‌آوران پزشکی هسته‌ای عمدتاً در جریان تصویرگیری از بیمار دریافت می‌شود. بنابراین، طراحی اتاق تصویربرداری باید طوری باشد که بین تخت تصویربرداری و میز رایانه حداکثر فاصله ایجاد شود؛ زیرا فن‌آور بیشترین وقت خود را برای دریافت و پردازش اطلاعات در کنار رایانه صرف می‌کند. از جابجایی چشمه‌های پرتوزا با دست و بدون حفاظ سربی خودداری شود مگر چشمه بسته و اکتیویته کم باشد. استفاده از انبر یا هر نوع دستگیره که سبب افزایش فاصله چشمه شود، سرعت پرتوگیری کاهش می‌یابد.

حفاظ

در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای برای کاهش پرتوگیری بیمار، اپراتور و عموم مردم از حفاظ یا شیلد استفاده می‌شود. تصمیم در مورد حفاظ‌گذاری، نوع، ضخامت و محل نصب حفاظ برای یک کاربرد خاص به انرژی و تعداد فتون، شکل هندسی چشمه‌های پرتوزا، جهت و مسیر پرتوگیری و عوامل دیگر بستگی دارد.

حفاظ در پرتوشناسی تشخیصی

محافظت کارکنانی که در نزدیکی دستگاه‌های مولد پرتوی x کار می‌کنند، هدف اصلی حفاظ‌گذاری است. روش‌ها و اطلاعات تکنیکی مورد نیاز طراحی حفاظ اتاق پرتوی x تشخیصی از گزارش شماره ۴۹ NCRP به دست می‌آید که با عنوان، "طراحی حفاظ و ارزیابی برای استفاده پرتوهای x و گاما با انرژی‌های تا 1.0 MeV " در سال ۱۹۷۶ منتشر شده است. روش‌های حفاظ‌گذاری این گزارش برای سال‌ها به خوبی مورد استفاده قرار گرفت. ولی اطلاعات مربوط به تضعیف پرتو مربوط به تجهیزات پرتوی x تشخیصی با مولدهای تک فاز است، در حالی که امروزه اکثر تجهیزات پرتوی x دارای مولدهای سه‌فاز و مبدل‌های پرفرکانس می‌باشند. علاوه بر این، مشخصات بار کار با آنچه امروزه معمول است، مطابقت ندارد؛ برای مثال، امروزه گیرنده‌های

تصویر یعنی مشدد و فیلم سریع به پرتوگیری بسیار کمتری نیاز دارند. بعلاوه، در پرتونگاری عمومی به ندرت از kV_p ثابت استفاده می‌شود بلکه دستگاه بطور خودکار مجموعه‌ای از بیشترین KV_p را انتخاب می‌کند. حد دُز برای عموم مردم پنج مرتبه کاهش و به 1mSv در سال رسیده است. در بسیاری از موارد رعایت دقیق روش‌های گزارش ۴۹ NCRP باعث اضافه وزن و هزینه حفاظ‌گذاری اتاق‌های پرتوی x می‌شود. با تخمین دقیق‌تر بارکار (kV_p, mAs)، استفاده از خروجی تیوب سه‌فاز پرفرکانس و منحنی تضعیف، کاهش پرتوی اولیه در آشکارساز فیلم-فولی و تغییر حد دُز مجاز محیط‌های مجاور اتاق رادیولوژی، روش‌های جدید طراحی حفاظ، جایگزین گزارش ۴۹ NCRP شده است.

در روش‌های جدید دُز مناطق کنترل شده شغلی ده برابر کمتر از دُز قبلی پیشنهاد شده (یعنی 5mSv/y به جای 50mSv/y) و تخمین ضرایب اشغال مناطق کنترل نشده واقعی‌تر (کمتر) از مقادیر قبلی است. هنگام تعیین مقدار و نوع حفاظ چندین عامل باید لحاظ شود. یک مفهوم مهم اصل ALARA است، پرتوکار باید قاعده هرچه کمتر موجه شدنی را در نظر بگیرد. بعلاوه ممکن است پرتوگیری پرسنل از حد تعیین شده اُزانس تجاوز نکند. در امریکا این حد برای پرتوکاران سالانه 50mSv و برای پرسنل غیرپرتوکار (عموم مردم) 50 مرتبه کمتر یا 1mSv می‌باشد. بعلاوه دُز معادل در منطقه کنترل نشده، ممکن نیست بیش از $20\text{ }\mu\text{Sv/h}$ شود. برای تعیین ضخامت حفاظ اتاق، بهتر است واحد زمان، هفته باشد. بنابراین در منطقه کنترل شده که فقط پرتوکاران اجازه حضور دارند حداکثر پرتوگیری مجاز 1mSv در هفته است، البته در گزارش جدید ۴۹ NCRP منطقه کنترل شده به $1\text{mSv}/0.1$ در هفته و مناطق کنترل نشده، حد دُز مجاز به $2\text{mSv}/0.1$ در هفته کاهش یافته است.

منابع پرتوگیری

چشمه‌های پرتودهی یک اتاق پرتوشناسی تشخیصی که باید حفاظ‌گذاری شوند عبارتند از: پرتوهای اولیه، پراکندگی و نشتی. پرتوهای پراکندگی و نشتی، پرتوهای ثانویه یا انحرافی نامیده می‌شوند. پرتوهای اولیه یا پرتوهای مفید از دریچه محدود کننده یا کلیماتور، خارج می‌شوند. شدت پرتوهای اولیه تابع پرتوهای خروجی تیوب اشعه x (توسط kV_p و mR/mAs و فاصله تعیین می‌شود)، تعداد پرتونگاری‌ها و مدت تابش اشعه x است. پرتوهای پراکنده از برخورد پرتوهای مفید با بدن بیمار تولید می‌شوند. از نظر حفاظت، پرتوهای پراکنده، نوعی پرتوی اولیه محسوب می‌شوند که از چشمه جدید (مثلاً بدن بیمار) با طیفی از انرژی منتشر می‌شوند. پرتوهای پراکنده با ابعاد میدان اشعه متناسبند. بطور کلی، پرتوگیری ناشی از پراکندگی در فاصله یک متری بیمار برای اشعه x تشخیصی با میدان 20×20 سانتیمتر، تقریباً 0.1 تا 0.15 درصد پرتوگیری اولیه است.

پرتوهای خروجی از حفاظ تیوب، اشعه نشتی نامیده می‌شوند. انرژی این پرتوها زیاد است زیرا امکان خروج از حفاظ تیوب را یافته‌اند. حداکثر نشت اشعه طبق مقررات ایالتی در فاصله یک متری از تیوب در شرایط پرتوگیری پیوسته (۳ تا ۵ میلی‌آمپر) و با حداکثر ولتاژ (معمولاً 120 kV_p) 100 mR/hr است.

عوامل مؤثر در ساخت حفاظ

معمولاً از سرب برای مسدود یا تضعیف پرتوی x استفاده می‌شود که بین چشمه و منطقه حفاظت شده قرار می‌گیرد تا پرتوگیری را به سطح قابل قبولی کاهش دهد. ضخامت حفاظ تابع جنس آن است. معمولاً سرب به دلیل تضعیف زیاد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد دیگری نظیر بتن، شیشه سربی، آکلریک سرب و تخته گچ نیز در ساخت حفاظ بکار می‌روند. میزان تضعیف پرتو تابع ۵ عامل است:

۱- پرتوگیری در محل مورد نظر (برحسب mR/week) که تابع انرژی پرتو (kV_p)، بارکار (محاسبه شده از پرتوهای نشتی، پراکندگی و اولیه) و فاصله نسبی است.

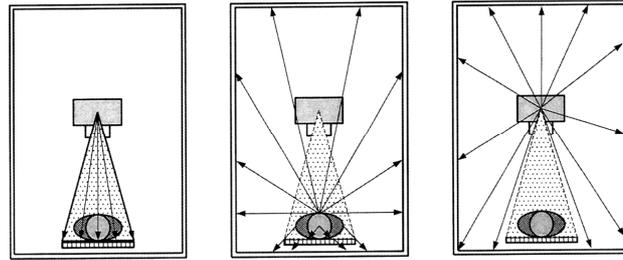
۲- بارکار، W، مقدار پرتوی x که در طول هفته تولید می‌شود.

۳- ضریب استفاده، U، در یک جهت خاص، معرف کسری از زمان که پرتو تحت شرایطی در آن جهت تابیده می‌شود.

۴- ضریب اشغال، T، معرف مدت زمانی از هفته است که مکان مجاور اتاق پرتوشناسی توسط اشخاص اشغال شده باشد.

۵- فاصله، d، مسافت چشمه تا محیط حفاظت شده است.

بارکار برحسب mA.min/week تعریف می‌شود و توسط نوع پرتونگاری و شرایط پرتوگیری (kV_p) و (mAs)، مشخصات آشکارساز (مثلاً سرعت فیلم و مشدد)، متوسط فیلم مصرفی در هر روش و متوسط تعداد بیمار در هفته تعیین می‌شود. بارکار یک اتاق پرتوشناسی بسیار شلوغ می‌تواند 1000 mA.min/week و اتاق پرتوشناسی کم‌کار (مثلاً ۵ بیمار در روز یا کمتر) mA.min/week ۱۰۰ یا کمتر باشد.



A: Primary Radiation B: Scattered Radiation C: Leakage Radiation

شکل ۱۰-۳ منابع مختلف پرتوگیری در اتاق پرتوشناسی تشخیصی. A: پرتوهای اولیه که از لکه کانونی خارج می‌شوند، B: پرتوهای پراکنده که از بدن بیمار بیرون می‌آیند، C: پرتوهای نشتی که از حفاظ تیوب خارج می‌شوند (پرتوهای مازاد بر پرتوهای اولیه)

برای مثال، بارکار اتاقی با ۲۰ بیمار در روز، ۳ فیلم برای هر بیمار و ۵۰ mAs برای هر فیلم طبق رابطه زیر خواهد شد:

$$W = 20 \text{ patients/day} \times 5 \text{ days/week} \times 3 \text{ films/patient} \times 50 \text{ mAs/film} \times 1 \text{ min}/60 \text{ sec} = 250 \text{ mA.min/week}$$

اگر نتوان بارکار را به‌دقت تعیین کرد، احتیاطاً، تعداد بیماران دست بالا گرفته می‌شود تا برای محیط مجاور پرتو، حفاظ‌گذاری مناسبی طراحی شود. جدول ۸-۳ مقادیر بارکار پیشنهادی برای انواع اتاق‌های پرتوشناسی مستخرج از گزارش شماره ۴۹ NCRP را نشان می‌دهد. این مقادیر دست بالاست زیرا براساس فیلم‌های کند (سرعت ۱۰۰) محاسبه شده‌اند در حالی که امروزه از فیلم‌های تند ۴۰۰ استفاده می‌شود.

استفاده از kV_p بالا به دو دلیل سبب کاهش بارکار می‌شود، (الف) با افزایش kV_p مقدار خروجی لامپ (mR/mAs) افزایش می‌یابد، (ب) با کاهش تضعیف پرتو مقدار mAs مورد نیاز دانسیته نوری فیلم کاهش می‌یابد.

خروجی تیوب اشعه x مستقیماً قابل اندازه‌گیری است. از طرفی جدول یا منحنی mR/mAs نسبت به پتانسیل تیوب و لایه نیمه جذب (HVL) (شکل ۱۱A-۳) یا نسبت به فیلتر اضافی و HVL (شکل ۱۱B-۳) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۸-۳ بارکار پیشنهادی پرتوشناسی تشخیصی (مقادیر بارکار بر حسب mA.min/week)، گزارش ۴۹ NCRP

روش	بیمار روزانه	بار کار ^a ۱۰۰	بار کار ^a ۱۲۵	بار کار ^a ۱۵۰
اختصاصاً ریه: ۳ فیلم برای هر بیمار	۶۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۰۰
پرتونمایی و spot filming	۲۴	۷۵۰	۳۰۰	۱۵۰
پرتونگاری عمومی	۲۴	۱۰۰۰	۴۰۰	۲۰۰
روشهای اختصاصی	۸	۷۰۰	۲۸۰	۱۴۰

^a اعداد معرف کیلوولتاژ ماکزیمم kV_p است.

برای مثال، با استفاده از منحنی ۳-۱۱A در فاصله یک‌متری، ۱۰۰ kV_p ولایه نیمه‌جذب ۴mm آلومینیوم، خروجی لامپ ۸/۸ mR/mAs است. خروجی مولد تک فاز کمتر است و با یک تخمین معقول با ضریب تقریبی ۱/۳ (۳۰٪) کاهش می‌یابد.

میزان پرتوگیری در هفته از پرتوهای اولیه X_p، در فاصله یک‌متری چشمه از حاصل ضرب W در خروجی لامپ در فاصله یک‌متری به دست می‌آید.

$$X_p \text{ (mR/week)}_{1m} = W \text{ (mA.min/week)} \times \text{Tub output (mR/mA.min)} \quad (3-2)$$

خروجی لامپ با ضرب در عدد ۶۰ (یعنی ۱mR/mAs × 60sec/min = 60 mR/mA.min) به mR/mA.min تبدیل می‌شود.

پرتوگیری ناشی از پراکندگی بیمار، کسری از پرتوهای اولیه است. ضریب پراکندگی در یک‌متری S، برای یک میدان ۴۰۰ cm² در فاصله یک‌متری و ۱۲۵ kV_p تقریباً ۰/۱۵ درصد است که تابع kV_p و زاویه نسبت به پرتوی اولیه تغییر می‌کند. ضریب پراکندگی متناسب با اندازه میدان تغییر می‌کند (یعنی میدان ۲۰۰ cm² نصف میدان ۴۰۰ cm² و میدان ۸۰۰ cm² دوبرابر آن پراکندگی تولید می‌کند). بنابراین، پراکندگی از ضرب پرتوگیری اولیه در ضریب پراکندگی S، و نسبت اندازه میدان به ۴۰۰ cm² به دست می‌آید. پرتوگیری اولیه در فاصله یک‌متری (X_p)، برای فاصله تیوب تا محل پراکنده‌ساز d_{sca}، با رابطه زیر تصحیح می‌شود:

$$X'_p = \frac{X_p}{(d_{sca})^2} \quad (3-3)$$

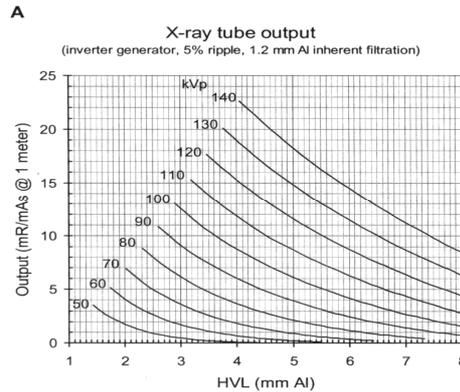
با در نظر گرفتن این پارامتر، میزان پرتوگیری هفتگی ناشی از پراکندگی X_s، در فاصله یک‌متری منبع پراکنده‌ساز (یعنی سطح بدن بیمار) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$X_s \text{ (mR/week)}_{1m} = X'_p \times S \times [\text{Field size (cm}^2\text{)}/400 \text{ cm}^2] \quad (3-4)$$

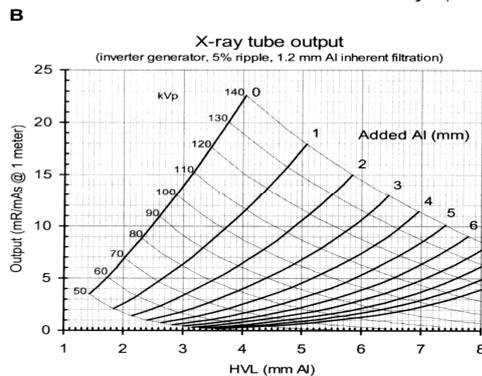
پرتوگیری ناشی از نشت لامپ در فاصله یک‌متری برای حداکثر جریان پیوسته لامپ، (یعنی ۳ تا ۵ mA) در حداکثر ولتاژ (یعنی ۱۲۰ kV_p) نباید متجاوز از ۱۰۰ mR/hr باشد. بنابراین، حداکثر پرتوگیری نشتی در یک ساعت و در فاصله یک‌متری ۱۰۰ mR/mA_{max} است که با تقسیم بر ۶۰ به ۱/۶۷ mR/mA_{max}.min تبدیل می‌شود. مقدار کل پرتوگیری ناشی از نشت اشعه در هفته، X_L، در فاصله یک‌متری لامپ از حاصل ضرب پرتوگیری نشتی در بارکار هفته‌ای به دست می‌آید.

$$X_L \text{ (mR/week)}_{1m} = 1.67 \text{ mR/(mA}_{\text{max}}\text{.min)} \times W \text{ (mA.min/week)} \quad (3-5)$$

توجه داشته باشید، مقادیر کمتر I (mA_{max}) سهم پرتوگیری نشتی را برای یک بارکار، افزایش می‌دهد زیرا حفاظ تیوب کمتری برای مشاهده نشتی مورد نیاز است.



شکل ۱۱-۳: A خروجی لامپ بر حسب mA/mAs در فاصله یک متری به عنوان تابعی از لایه نیمه جذب بر حسب میلی متر آلومینیم و kV_p برای ژنراتور وارونه‌ای (inverter) با ضریب ولتاژ ۵٪. خروجی لامپ بر اساس اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کامپیوتری از لامپ اشعه X با فیلتر داخلی ۱٫۲mm Al به دست آمده است. هر منحنی kV_p با افزایش فیلتر از چپ به راست افزایش می‌یابد. برای ژنراتور تک فاز این منحنیها تقریباً ۳۰٪ دست بالا گرفته شده است (یعنی خروجی باید به ۱/۳ تقسیم شود).



B: خروجی لامپ بر حسب mR/mAs به صورت تابعی از HVL و فیلتر اضافی. این منحنیها نشان‌دهنده مقدار فیلتر اضافی در پرتو برای یک HVL و kV_p داده شده است. در هر منحنی kV_p از چپ به راست افزایش می‌یابد. اگر فیلتر اضافی و HVL معلوم باشد، خروجی لامپ مستقل از kV_p تعیین می‌شود. فیلتر اضافی سبب افزایش انرژی مؤثر و کاهش خروجی می‌شود.

با استفاده از معادلات ۲، ۳، ۴ و ۵ سهم پرتوگیری هفته‌ای پرتوهای اولیه، پراکندگی و نشتی در فاصله یک متری از چشمه پرتوزا به دست می‌آیند. برای محاسبه حفاظ‌گذاری در مراحل بعد، باید سیستم پرتوی X (زمان تابش پرتوهای اولیه به یک مانع) و طراحی اتاق اشعه X (فاصله محل حفاظت شده و میزان اشغال محیط مجاور) را در نظر گرفت. ضریب استفاده U، یک دیوار توسط درصد زمان تابش آن دیوار در هفته به دست می‌آید. دیواری که مقابل پرتوی اولیه است،

مانع اولیه نامیده و ضریب استفاده آن تعیین می‌شود. برای پرتوهای اولیه مقادیر ضریب استفاده از صفر تا ۱ است. برای مثال، در اتاق اختصاصی پرتونگاری ریه، همواره تیوب به طرف دیواری است که بوکی استناد در آن طرف قرار دارد. این دیوار دارای ضریب استفاده ۱ است، در حالی که ضریب استفاده پرتوی اولیه برای دیوارهای دیگر، سقف و کف اتاق صفر است. در اتاق پرتوشناسی معمولی، کف اتاق معمولاً دارای بیشترین ضریب استفاده پرتوی اولیه است (یعنی ۰/۷۵)، دیوارهای دیگر و سقف دارای ضریب استفاده‌ای است که براساس درصد پرتونگاری‌ها و جهت تابش تخمین زده می‌شود (یعنی، ۰/۱۵ برای دیوار B، و ۰/۱ برای دیوار C شکل ۱۲-۳). دیوار مقابل پرتوهای پراکندگی همواره دارای ضریب استفاده ۱ است زیرا پرتوهای پراکندگی و ناشی در تمام پرتونگاری‌ها به همه دیوارها تابیده می‌شود. دیوارها، سقف و کف اتاق، موانع پرتوهای ثانویه‌اند. در اتاق‌های اشعه x با تجهیزاتی که مانع پرتوهای اولیه‌اند (مثل، دستگاه پرتونمایی که مشدد تصویر همواره در مقابل پرتوی اولیه است، اتاق موموگرافی و اتاق CT) هیچ دیواری از اتاق به‌عنوان مانع پرتوی اولیه منظور نمی‌شود. اگرچه در گزارش ۴۹ NCRP، آشکارساز تصویر (کاست فیلم و مشدد) مانع پرتوی اولیه پیشنهاد نشده است.

ضریب اشغال، T

تخمین مدت زمان حضور افراد در اتاق‌های کنترل نشده مجاور اتاق رادیولوژی در طول کار هفتگی ضریب اشغال تعریف می‌شود. در جدول ۹-۳ تعدادی از ضرایب اشغال معرفی شده‌اند. حد دُز ($X_{Limit} = 2mR/week$) به‌وسیله ضریب اشغال به‌صورت رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$X_{Limit} = \frac{2mR / Week}{T} \quad (3-6)$$

مثلاً حد پرتوگیری یک راهرو با فرض منطقه کنترل نشده با ضریب اشغال ۰/۲۵، مطابق رابطه زیر به $8mR/Week$ افزایش می‌یابد:

$$X_{Limit} = \frac{2mR / Week}{0.25} = 8mR / Week$$

فاصله چشمه تابش از نقطه حفاظت شده عامل مهمی در تعیین ضخامت حفاظ است، زیرا قانون عکس مجذور فاصله در مقدار پرتوگیری بسیار مؤثر است. چهارنوع فاصله باید در نظر گرفت:

فاصله چشمه از پراکنده‌ساز، d_{sc} : فاصله لکه کانونی لامپ اشعه ایکس تا سطح بدن بیمار است. خروجی لامپ که در یک‌متری اندازه‌گیری شده توسط این فاصله تصحیح می‌شود.
 فاصله پرتوی اولیه، d_{pri} : از لکه کانونی لامپ اشعه ایکس تا ۳۰ cm (یک فوت) آنطرف دیوار.
 فاصله پرتوی ثانویه، d_{sec} : از نزدیکترین سطح بدن بیمار تا ۳۰ cm آنطرف دیوار.
 فاصله نشت لامپ، d_{leak} : فاصله لامپ اشعه ایکس تا ۳۰ cm آنطرف دیوار.

در همه موارد باید کوتاه‌ترین فاصله تا مانع را در نظر گرفت (مثلاً، برای میز تصویرگیری کوتاه‌ترین فاصله لامپ اشعه ایکس از دیوار). از آنجاکه مقادیر پرتوگیری X_p ، X_s و X_l برای فاصله یک متری تعیین می‌شوند، به ترتیب به مقادیر d_{pri}^2 ، d_{sec}^2 و d_{leak}^2 تقسیم می‌شود تا پرتوگیری در ۳۰ cm آن طرف دیوار اتاق مجاور به دست آید.

پرتوهای اولیه، پراکندگی و نشتی همگی در پرتوگیری محیط‌های مجاور اتاق پرتوشناسی سهیم‌اند. پرتوگیری هفتگی، X ، در فاصله ۰٫۳ متری دیوار محیط مجاور اتاق پرتوشناسی بدون حفاظ، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$X_{(exposure/week)} = \left[\left(\frac{X_p}{d_{pri}^2} \times U_{pri} \right) + \frac{X_s}{d_{sec}^2} + \frac{X_l}{d_{leak}^2} \right] \quad (3-7)$$

جدول ۹-۳، ضرایب اشغال پیشنهادی (T)

T	نوع مکان	سطح اشغال
۱	اتاق کار، دفتر، آزمایشگاه، ایستگاه پرستاری، محل بازی کودکان، محل زندگی	کامل
$\frac{1}{4}$	راهرو، اتاق استراحت، پارکینک بدون مراقب،	ناقص
$\frac{1}{16}$	اتاق انتظار، توالت، راه‌پله، آسانسور، صندوق‌خانه	گاهی

ضخامت ماده تضعیف کننده برای کاهش پرتوگیری به سطح قابل قبول، توسط محاسبات حفاظ‌گذاری تعیین می‌شود. به کمک لایه نیمه جذب (HVL) و لایه یک‌دهم (TVL)، ضخامت حفاظ محاسبه می‌شود، این مقادیر برای سرب و بتن در جدول ۱۰-۳ آورده شده‌اند. برای مثال، فرض کنید پرتوگیری هفتگی (بدون حفاظ) در منطقه کنترل نشده با ضریب اشغال ۱ مقدار ۴۰ mR است. برای کاهش پرتوگیری به ۲ mR/week (یعنی، ۲۰ برابر تضعیف) به یک TVL (کاهش ۱۰ برابر) و یک HVL (کاهش نصف) از ماده تضعیف کننده نیاز است. مثلاً ضخامت سرب لازم برای تضعیف پرتو ۱۲۵ kV_p تقریباً ۱٫۲۱ mm + ۰٫۲۸ mm = ۰٫۹۳ mm و ضخامت بتن ۸۶ mm + ۲۰ mm = ۱۰۶ mm است. مقادیر لایه نیمه جذب و یک‌دهم بتن و سرب برای پرتوی ۱۲۵ kV_p در جدول ۱۰-۳ نشان داده شده‌اند. روش دیگر محاسبه ضخامت حفاظ، استفاده از معادله تضعیف است:

$$X_{lim} = X e^{-\mu_{eff} T} \quad (3-8)$$

که T ضخامت حفاظ و X_{Limit} ماکزیمم حد مجاز است (مثلاً ۲ mR/week برای مناطق کنترل نشده و ۱۰۰ mR/week برای مناطق کنترل شده). یک روش استفاده از این معادله، تعیین ضریب تضعیف مؤثر μ_{eff} از لایه نیمه جذب یا لایه یک‌دهم حفاظ است:

$$\mu_{\text{eff},TVL} = \frac{2.303}{TVL} \quad \text{و} \quad \mu_{\text{eff},HVL} = \frac{0.693}{HVL} \quad (3-9)$$

البته معادلات ۸ و ۹ فقط برای پرتوهای تک‌انرژی و باریک صادق است و برای پرتوهای با طیفی از انرژی تقریبی است. روش محتاط‌تر محاسبه ضریب تضعیف مؤثر به کمک TVL است که مقدار تضعیف کمتری نسبت به لایه نیمه جذب به دست می‌آید. ضریب تضعیف مؤثر سرب برای پرتوی ۱۲۵ kV_p با استفاده از لایه نیمه جذب و لایه یک‌دهم خواهد شد:

$$\mu_{\text{eff},TVL} = 21/43 \text{ cm}^{-1} \quad \text{و} \quad \mu_{\text{eff},HVL} = 24/75 \text{ cm}^{-1}$$

استفاده از لایه دهم جذب روش مرسوم‌تری است که در معادله ۸-۳ قرار داده می‌شود:

$$X_{\text{Limit}} = X e^{-\frac{2.303}{TVL} T}$$

و با حل آن ضخامت حفاظ لازم (T) تعیین می‌شود:

$$T = 0.434 \times \ln\left(\frac{X}{X_{\text{Limit}}}\right) \times TVL \quad (3-10)$$

که Ln لگاریتم طبیعی و T دارای یکای TVL است. ضخامت سرب لازم برای کاهش ۴۰ mR به ۲mR برای پرتوی ۱۲۵kV_p (TVL_{pb} = ۹۳ mm) طبق معادله ۱۱-۳ خواهد شد:

$$T = 0.434 \times \ln\left(\frac{40}{2}\right) \times 0.93 \text{ mm} = 1.209 \text{ mm}$$

که تقریباً همان مجموع یک لایه نیمه جذب و لایه یک‌دهم سرب مثال قبل است. اگر ضریب اشغال اتاق به ۲۰٪ کاهش یابد X_{Limit} خواهد شد:

$$\frac{2\text{mR} / \text{Week}}{0.2} = 10\text{mR}$$

و ضخامت سرب طبق رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$T = 0.434 \times \ln\left(\frac{40}{10}\right) \times 0.93 \text{ mm} = 0.56 \text{ mm}$$

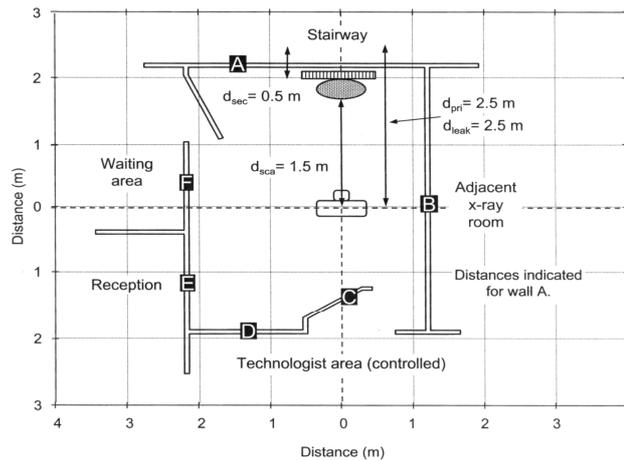
که ضخامت تقریباً با ضریب ۲/۲ کاهش یافته است. قابل ذکر است لایه نیمه جذب و لایه یک‌دهم تابع ۱۲۵kV_p هستند، برای تعیین مقادیر لایه نیمه جذب و لایه یک‌دهم برای بارکار با محدوده‌ای از تکنیک‌های ۱۲۵kV_p، یک ضریب برای ۱۲۵kV_p به‌عنوان مشخصه پرتو در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱۰-۳ لایه نیمه جذب و لایه یک‌دهم برای سرب و بتن در انرژیهای پرتوی ایکس تشخیصی

(K _{Vp})	HVL (mm) سرب	TVL (mm) سرب	HVL (mm) بتن	TVL (mm) بتن
۵۰	۰٫۰۶	۰٫۱۷	۴٫۳	۱۵
۷۰	۰٫۱۷	۰٫۵۲	۸٫۴	۲۸
۱۰۰	۰٫۲۷	۰٫۸۸	۱۶	۵۳
۱۲۵	۰٫۲۸	۰٫۹۳	۲۰	۶۶
۱۵۰	۰٫۳	۰٫۹۹	۲۲٫۴	۷۴

مثال: محاسبه حفاظ اتاق رادیولوژی

در این مثال تعیین حفاظ یک دیوار اتاق رادیولوژی ساده براساس شکل اتاق، حدود پرتوگیری و تخمین بارکار توضیح داده می‌شود. شکل ۱۲-۳ یک اتاق پرتونگاری ریه و مکان‌های مجاور را نشان می‌دهد. بارکار عبارت از ۳۰ بیمار در روز، دو فیلم برای هر بیمار (نماهای روبرو و جانبی) و شرایط 125 kV_p و 5 mAs برای هر فیلم (فیلم و مشدد تند 400) است. لایه نیمه‌جذب پرتو 4 mm آلومینیم و حداکثر جریان پیوسته تیوب 5 mA در ماکزیمم kV_p است. یک ژنراتور پرفرکانس، ولتاژ لامپ پرتوی ایکس را تأمین می‌کند.



شکل ۱۲-۳ طرحی از اتاق پرتونگاری ریه. اطلاعات مربوط به موقعیت تیوب پرتوی ایکس، آشکارساز، فاصله از تیوب تا 30 cm آنطرف دیوار اتاق مجاور (مثلاً راه‌پله، اتاق انتظار، رختکن). ابعاد خطوط شطرنجی یک‌متر است. برای محاسبه حفاظ فاصله‌های دیوار A از منابع پرتوگیری بر روی شکل مشخص شده است.

برای تعیین ضخامت حفاظ دیوار (در این مثال، دیوار A) مراحل زیر لازم الاجراست:

۱. محاسبه بارکار به صورت زیر:

$$30 \text{ patients/day} \times 2 \text{ films/patient} \times 5 \text{ mAs/film} \times 1/160 \text{ min/sec} \times 5 \text{ days/week} = 25 \text{ mA.min/week}$$

۲. خروجی تیوب برای 125 kV_p در لایه نیمه‌جذب 4 mm (شکل ۱۱-۳) تعمیم بین

منحنی‌های kV_p در فاصله یک‌متری تقریباً 13 mR/mAs است. که معادل 780 mR/mA.min است. پرتوگیری هفتگی ناشی از پرتوهای اولیه در فاصله یک‌متری X_p ، از رابطه

۲-۳ تعیین می‌شود.

$$X_p = 25 \text{ mA.min/week} \times 780 \text{ mR/mA.min} = 19500 \text{ mR/week}$$

۳. پرتوگیری بیمار X'_p ، با استفاده از رابطه ۳-۳ تعیین می‌شود. فاصله چشمه تا شیئی d_{sea} برای پرتونگاری ریه تقریباً $۱٫۵m$ است (ضخامت بدن بیمار $۳۰cm$ و فاصله چشمه تا فیلم (SID) را $۱۸۰cm$ در نظر بگیرید).

$$X'_p = \frac{X_p}{(d_{sea})^2} = \frac{19500}{(1.5)^2} \approx 8667 R / week$$

مساحت میدان تابش $۴۳ \times ۳۵cm$ برای پرتونگاری ریه $۱۵۰۰ cm^2$ است. برای $۱۲۵ kV_p$ و میدان $۴۰۰ cm^2$ ضریب پراکندگی در زاویه ۹۰ درجه $۰٫۰۰۱۵$ است. خروجی پرتوی پراکندگی در هفته X_s در فاصله $۱m$ از بیمار با استفاده از معادله ۳-۴ محاسبه می‌شود:

$$X_s = 8667 \times 0.0015 \times (1500/400) \approx 49 mR/week$$

۴. خروجی پرتوگیری نشتی (X_L)، در فاصله یک متری تیوب با استفاده از معادله ۳-۵ (برای بارکار و ماکزیمم جریان پیوسته $I = ۵mA$) به دست می‌آید:

$$X_L = 1.67 \times 25/5 \approx 8.4 mR/week$$

۵. ضریب اشغال (T) راه پله $۰٫۰۶۲۵$ یا $\frac{1}{16}$ در نظر گرفته، حد پرتوگیری مجاز در این منطقه کنترل نشده از معادله ۳-۶ خواهد شد:

$$X_{Limit} = \frac{2mR / week}{0.0625} = 32 mR / week$$

۶. پرتوگیری در $۳۰cm$ آن طرف دیوار بدون حفاظ از هریک از منابع تعیین می‌شود. ضریب استفاده پرتوی اولیه دیوار A برای اتاق پرتونگاری ریه ۱ و فاصله‌های اندازه‌گیری شده تا $۳۰cm$ آن طرف دیوار A، $d_{pri} = ۲٫۵m$ ، $d_{leak} = ۲٫۵m$ و $d_{sec} = ۰٫۵m$ است (شکل ۱۲-۳). پرتوگیری کل بدون حفاظ از معادله ۳-۷ محاسبه می‌شود:

$$X = \left[\frac{19500}{2.5^2} \times 1 + \frac{49}{0.5^2} + \frac{8.4}{2.5^2} \right] \approx 3317 mR / week$$

۷. ضخامت سرب با استفاده از معادله ۳-۱۰ محاسبه می‌شود و لایه یک دهم جذب برای $۱۲۵kV$ مقدار $۰٫۹۳mm$ که برابر با ۵ پوند در فوت مربع سرب است (جدول ۳-۱۰).

$$T = 0.434 \times \ln\left(\frac{3317}{32}\right) \times 0.93 \approx 1.87 mm$$

انجام این هفت مرحله، برای محاسبه حفاظ دیوارها، کف و سقف اتاق ضروری است. برای دیگر موانع (دیوارها، سقف و کف اتاق) ضریب استفاده پرتوی اولیه صفر است در نتیجه حفاظ بسیار کمتری لازم است. در این مثال به دلیل نادیده گرفتن تضعیف ناشی از کاست فیلم مشدد، سینی نگهدارنده بوکی و بدن بیمار در محاسبات، احتمالاً ضخامت حفاظ بیش از اندازه لازم برآورد شده است. تضعیف پرتوی اولیه در نگهدارنده کاست و کاست برای پرتوی kV_p ۱۰۰ ، معادل تضعیف $۰٫۸۵ mm$ سرب است بنابراین، در این شرایط ضخامت حفاظ مورد نیاز،

حدود 1 mm سرب یا ۲/۵ پوند بر فوت مربع خواهد بود. در نتیجه ۲/۵ پوند بر فوت مربع از ضخامت حفاظ، غیر ضروری است.

ملاحظات نظیر این مورد، مستندات است که تجدید نظر در گزارش شماره ۴۹ NCRP را منطقی می‌سازد. در محاسبات بهتر است احتمال افزایش بار کار آینده را در نظر گرفت زیرا هزینه نصب حفاظ مجدد، بیش از هزینه انتخاب حفاظ اولیه ضخیم‌تر است. در طراحی معماری معمولاً حفاظ سرب بر حسب وزن در واحد فوت مربع (مثلاً پوند در فوت مربع) مشخص می‌شود. جدول ۱۰-۳ ضخامت‌های سرب بر حسب میلی‌متر و معادل آن بر حسب پوند بر فوت مربع را نشان می‌دهد. بعلاوه اگر محاسبات حفاظ، ضخامت کمتر از ۰/۸ mm (۲ پوند بر فوت مربع) را توصیه کند (مثلاً یک پوند بر فوت مربع) مسأله عدم دسترسی به ورقه‌های نازک سرب و هزینه بیشتر آن مطرح می‌شود، بنابراین ۲ پوند بر فوت مربع به عنوان کمترین ضخامت سرب، اقتصادی‌تر است. در مثال قبل، دیوارهای دیگر (موانع ثانویه) نیاز به حفاظ اضافی دارند؛ نصب ۲ پوند بر فوت مربع سرب روی این دیوارها به دلیلی که در بالا شرح داده شد، پیشنهاد مناسبی است. بلندی حفاظ برای تمام دیوارها باید از کف اتاق تا ارتفاع ۷ فوت (تقریباً ۲۱۰ cm) باشد. در ساختمانهای چند طبقه محاسبه حفاظ کف و سقف اتاق مشابه مراحل محاسبه دیوارهاست. مصالح ساختمانی بکار رفته (مثلاً بتن در کف اتاق) اغلب نیاز به حفاظ اضافی را کم یا حذف می‌کنند. مواد دیگری، نظیر شیشه تخت، شیشه سربی، آکرلیک سربی، پلاستر، دیوار خشک گچی، پلاستر باریم و استیل، برای حفاظ مورد استفاده قرار می‌گیرند. دانستن خواص تضعیف‌کنندگی مواد (لایه‌های نیمه جذب یا یک‌دهم جذب) امکان جایگزینی با سرب یا بتن را مطرح می‌سازد. برای مثال، در مموگرافی، که ولتاژ تیوب به‌ندرت بیش از ۳۵ kV_p و پرتوی پراکندگی حداقل است دیوار گچی خشک حفاظ مناسبی است. محاسبات حفاظ‌گذاری در اکثر این موارد نشان می‌دهد دو لایه دیوار گچی (ضخامت ۰/۶ cm) حفاظ مورد نیاز را فراهم می‌سازد.

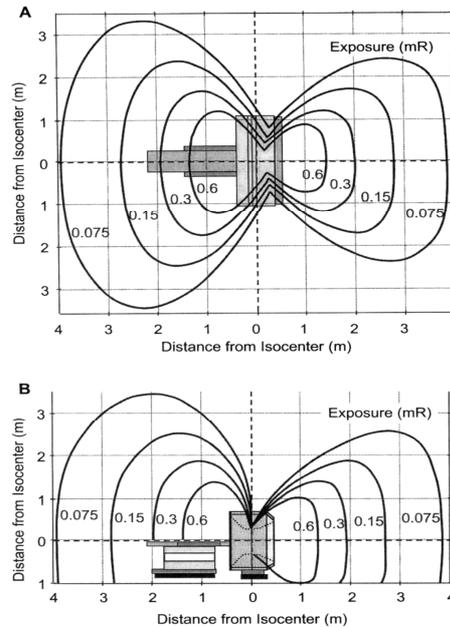
حفاظ‌گذاری در CT

آشکارسازهای دستگاه CT مانع اولیه پرتو و تمام دیوارهای اتاق موانع ثانویه محسوب می‌شوند. برای تعیین مقدار پرتوهای پراکندگی از گانتری هردستگاه، داده‌های یک CT (معمولاً از کارخانه به‌دست می‌آید)، مورد نیاز است. اطلاعات پرتوهای پراکنده معمولاً به‌صورت خطوط پرتوهای خروجی نقطه مرکزی گانتری از هر برش در یک mAs معلوم به‌دست می‌آید (شکل ۱۳-۳). در طراحی حفاظ اتاق CT با در نظر گرفتن متوسط تعداد بیمار در هفته، درصد CT های سر نسبت به بدن (پراکندگی سر نسبت به بدن بسیار متفاوت است) و متوسط mAs برای هر بیمار (براساس تعداد برش و روش، مثلاً اخذ اطلاعات به‌صورت معمولی نسبت به چرخشی یا اسپیرال) بار کار تعیین می‌شود. بانادیده گرفتن اسکن‌های سر (به‌منظور ساده سازی) یک نمونه

بارکار ممکن است شامل ۱۵ بیمار با اسکن شکم در روز باشد (شکل ۱۳-۳ مشخصات پراکندگی آنرا نشان می‌دهد). بطور کلی، فرض می‌شود ۵۰٪ بررسی‌ها قبل و بعد از ورود ماده کنتراست و ۵۰٪ بدون کنتراست (متوسط ۱/۵ بررسی در هر بیمار) و هر آزمایش شامل ۴۰ برش و هر برش ۲۵۰ mAs است.

بنابراین، متوسط تعداد برش در هفته خواهد شد:

$$\text{برش} = ۴۵۰۰ = \text{بیمار} / \text{مطالعه} \times ۱,۵ \times \text{مطالعه} / \text{برش} \times ۴۰ \times \text{هفته} / \text{روز} \times ۵ \times \text{روز} / \text{بیمار} \times ۱,۵$$



شکل ۱۳-۳. یک دستگاه CT مولتی اسلایس (دهانه کلیماتور ۲۵mm) پرتوهای پراکندگی و نشتی را به صورت تابعی از فاصله نقطه هم‌مرکز (isocenter) تولید می‌کند. پرتوگیری برای ۱۰۰ mAs در هر برش است. مقادیر برحسب متوسط mAs در هر برش و تعداد برش در هفته مدرج می‌شود تا مقدار پرتوگیری در شرایط بدون حفاظ تعیین شود. (A) نمای بالای منحنی‌های ایزودز روی صفحه افقی عبوری از نقطه هم‌مرکز. (B) نمای جانبی منحنی‌های هم‌دز در صفحه عبوری از نقطه هم‌مرکز و عمود بر گانتری.

چون میزان پرتوهای پراکنده در هر برش با ترسیم به دست می‌آید، یک نمودار ترسیمی از توزیع پراکندگی و طرح اتاق مورد نیاز است. فرض کنید دیوار پشت گانتری CT با ضریب اشغال ۰/۲۵ در ۳/۵ متری نقطه مرکزی (isocenter) قرار دارد. در این شرایط، تقریباً خط ایزواکسپوز ۰/۷۵ mR/slice نقطه ۰/۳ متر آنطرف دیوار را قطع می‌کند. بنابراین، پرتوگیری هفتگی بدون در نظر گرفتن حفاظ به این صورت محاسبه می‌شود:

$$4500 \text{ slice} \times \frac{0.075 \text{ mR}}{100 \text{ mAs}} \times \frac{250 \text{ mAs}}{\text{slice}} \cong 844 \text{ mR}$$

ضریب اشغال $T=0.25$ سبب افزایش حداکثر پرتوگیری مجاز به محیط مجاور اتاق CT می‌شود:

$$X_{\text{Limit}} = \frac{\left(\frac{2 \text{ mR}}{\text{week}}\right)}{0.25} = 8 \frac{\text{mR}}{\text{week}}$$

با استفاده از معادله $3-10$ (لایه یک‌دهم برای 125 kV_p) حفاظ مورد نیاز برای کاهش پرتوگیری به مقدار 8 mR در هفته محاسبه می‌شود:

$$T = 0.434 \times \ln\left(\frac{844}{8}\right) \times 0.93 = 1.88 \text{ mm}$$

بنابراین ضخامت سرب مورد نیاز این دیوار 5 پوند بر فوت مربع است. برای دیوارهای دیگر، کف و سقف اتاق نیز محاسبات مشابه لازم است. منحنی‌های ایزو دز عمودی برای محاسبه حفاظ نقاط بالا و پایین نقطه هم‌مرکز (شکل $3-13B$) لازم است. در آرایه آشکارسازهای چندبرشی (multislice) و کولیماتورهای با دهانه بزرگتر CT، پرتوهای پراکنده افزایش چشم‌گیر می‌یابند. در سیستم‌های پیشرفته CT به حفاظ‌گذاری قویتری نیاز است.

حفاظت فردی در پرتوشناسی تشخیصی

در روشهای پرتونگاری/پرتونمایی چندین وسیله حفاظتی مورد نیاز است. بیش از هر چیز، همه افرادی که حضورشان هنگام فعال بودن لامپ اشعه ایکس در اتاق الزامی است، باید روپوش سربی (نوعاً 0.25 mm تا 0.5) بپوشند. معمولاً برای خم‌پذیری و راحتی کار، روپوش سرب به شکل ماده‌ای لاستیکی ساخته می‌شود. روپوش سربی تنه (بدون دست و پا)، جلو یا دور بدن را می‌پوشاند. روپوش‌های دور بدن، برای موقعی است که پشت انسان نیز برای مدت طولانی مورد تابش پراکندگی قرار گیرد. بیش از 90% پرتوهای پراکنده (در شرایط استاندارد یعنی ولتاژ تیوب کمتر از 100 kV_p) جذب روپوش با ضخامت 0.25 mm می‌شوند. روپوش‌های ضخیم‌تر (معادل 0.35 mm و 0.5 سرب)، حفاظت بیشتری ایجاد می‌کنند (تضعیف 95% تا 99%) ولی نسبت به ضخامت 0.25 mm سرب با افزایش وزن 50 تا 100% همراه است. در پرتونمایی‌های طولانی مدت استفاده از روپوش سنگین، اغلب عامل محدودکننده در توانایی رادیولوژیست و همکاران اوست. در بعضی از طراحی‌ها، نظیر روپوش‌های دوتیکه، بیشتر وزن روپوش روی کمر است تا روی شانه. مناطقی نظیر بازوها، قسمت پایین پا، سر و گردن و پشت (بجز روپوش‌هایی که دور بدن پیچیده می‌شوند) پوشیده نمی‌شوند. از تیروئیدبند و عینک سربی برای حفاظت تیروئید و چشم استفاده می‌شود. تیروئیدبند اطراف گردن پیچیده و عینک سربی تابع مقدار سرب، سبب تضعیف 30% تا 70% پرتو می‌شود. متأسفانه سنگینی مانع مهمی در استفاده از آنهاست و امروزه شیشه‌های سربی با ضریب تضعیف 20% رواج یافته‌اند. اگر نیاز باشد دست‌ها در نزدیکی پرتو اولیه قرار گیرند، باید دستکش‌های سربی با ضخامت 0.5 میلی‌متر

پوشیده شود. در موارد بارکار زیاد و آزمایش‌های مربوط به قلب، مثلاً آنژیوپلاستی، معمولاً حفاظ متحرک یا سقفی به کار می‌رود که بین بیمار و پرسنل قرار می‌گیرد. در نوع سقفی تنظیم و جابجایی به سهولت انجام می‌شود. شیشه یا آکلریک سربی شفاف به نور و اغلب بیش از روپوش سربی جاذب اشعه x است. قابل ذکر است فقط افرادی که حضورشان هنگام اکسپوز الزامی است، باید در اتاق بمانند و هنگام تصویربرداری باید با روپوش یا پاراوان سربی محافظت شوند. بعلاوه، برای نگهداشتن بیمار هیچ کس نباید در اتاق رادیولوژی بماند بخصوص اگر حامله یا کمتر از ۱۸ سال باشد. در صورت نیاز باید از وسایل و نگهدارنده‌های مکانیکی استفاده شود. نگهدارنده نباید به هیچ وجه در مسیر پرتوی اولیه قرار گیرد و تا حد ممکن باید از پرتوی اولیه دور باشد.

حفاظت در پزشکی هسته‌ای

در پزشکی هسته‌ای برای کاهش پرتوهای لوله مواد پرتوزا از حفاظ‌های تنگستن، سرب یا شیشه سربی استفاده می‌شود. برای کاهش پرتوگیری تکنسین، هنگام آماده سازی سرنگ و تزریق آن به بیمار، از سرنگ حفاظ دار استفاده شود. استفاده از حفاظ سرنگ سبب کاهش پرتوگیری دست از Tc-99m، به میزان یک صدم می‌شود.

آماده سازی پرتودارو در پشت شیشه سربی محصور در قاب سربی انجام می‌شود. در پشت شیشه سربی پرتودارو از ویالی که در ظرف سربی قرار دارد به سرنگ حفاظدار کشیده می‌شود. افرادی که با پرتودارو کاری کنند باید روپوش پوشیده، دستکش یکبار مصرف دست کنند و دزیمتر TLD انگشتانه‌ای و دزیمتر کل بدن داشته باشند. روپوش‌های سربی پرتوشناسی تشخیصی، در پزشکی هسته‌ای کم ارزش است زیرا برعکس کاهش اشعه ایکس کم انرژی، فوتون‌های با انرژی متوسط Tc-99m را که کاربرد عملی دارند، به قدر کافی تضعیف نمی‌کنند.

محل ذخیره پسماندهای پرتوزا حفاظ گذاری می‌شود تا پرتوگیری به حداقل برسد. نصب آینه در پشت دیوار محل ذخیره مواد پرتوزا، سبب می‌شود بدون پرتوگیری مستقیم سر و گردن با مواد پرتوزا کار شود. بهترین حفاظ برای پرتوهای بتا، مواد با عدد اتمی پایین (مثلاً پلاستیک یا شیشه) است، که علاوه بر تضعیف شدید آنها، حداقل پرتوی ایکس ترمزی تولید می‌شود. برای پرتوهای بتا پرانرژی (مثلاً P-32)، با افزودن سرب به شیلدهای با عدد اتمی کم، پرتوهای ترمزی نیز تضعیف می‌شوند. به استثنای دستگاه‌های برش‌نگاری نشر پوزیترونی (PET) که مناطق اطراف آن باید از پرتوهای گامای ۵۱۱ keV (ناشی از پدیده نابودی) محافظت شود، دیوارهای داخل و خارج اکثر آزمایشگاه‌های پزشکی هسته‌ای نیازی به حفاظ گذاری ندارند.

حفاظت بیمار در پرتوی ایکس تشخیصی

ولتاژ تیوب و فیلترکردن پرتو

تعدادل بهینه بین کیفیت تصویر و دُز بیمار، هدف اصلی رادیولوژی تشخیصی است. افزایش ولتاژ باعث عبور پرتوی ایکس بیشتری از بدن بیمار (جذب کمتر) می‌شود. اگر با افزایش ولتاژ، پرتوگیری در هر mAs بیشتر شود با کاهش mAs پرتوگیری بیمار کاهش می‌یابد. استفاده از kV_p بیشتر و mAs کمتر سبب کاهش پرتوگیری بیمار می‌شود ولی افزایش انرژی اشعه ایکس متأسفانه با کاهش کنتراست تصویر همراه است.

پرتوهای کم انرژی که در تشکیل تصویر، بدون تأثیر یا کم‌تأثیرند، با فیلترشدن از طیف پرتوی ایکس حذف و کاهش چشم‌گیری در پرتوگیری ایجاد می‌شود، درغیراین‌صورت این پرتوها توسط بدن تضعیف و بطورعمده جذب پوست یا بافت‌های کم‌عمق می‌شوند. با افزودن فیلتر، پرتو سخت‌تر (انرژی مؤثر بیشتر) و دُز بیمار کمتر می‌شود زیرا پرتوهای کم‌انرژی، کاهش می‌یابند. در افزایش فیلتر محدودیت وجود دارد، زیرا برای جبران کاهش خروجی تیوب، نیاز به افزایش بارکار تیوب و از طرفی با سخت شدن پرتو، کنتراست کاهش می‌یابد. فیلتر معمولی بجز در مموگرافی، تأثیر مهمی در کاهش کنتراست ندارد.

کیفیت پرتوی ایکس (انرژی مؤثر) توسط لایه نیمه‌جذب اندازه‌گیری می‌شود. براساس قوانین ایالتی و فدرال، لایه نیمه‌جذب باید از یک حداقلی بیشترباشد؛ مقررات لایه‌های نیمه‌جذب باید در کلیه تجهیزات تصویربرداری پرتوی ایکس بجز دستگاه‌های مموگرافی اعمال شود. انتخاب فیلتر مناسب بخصوص در پرتونمایی‌های طولانی به‌منظور اجتناب از صدمه پوستی است.

میدان پرتو، حفاظت اندام و شرایط هندسی

محدودکردن میدان پرتو توسط کلیماتور به اندازه مورد نیاز، یک روش مهم کاهش دُز محسوب می‌شود. که علاوه بر محدودشدن حجم پرتوهای اولیه، پرتوهای پراکندگی و در نتیجه، دُز جذبی اندام‌های مجاور نیز کاهش می‌یابند، از طرفی ورود پرتوهای پراکنده به آشکارساز موجب تنزل کیفیت تصویر و کنتراست می‌شود. هنگام تهیه پرتونگاری، درصورت نیاز باید اندام‌های حساس محافظت شوند. برای مثال، هنگام تهیه پرتونگاری از عضوهای خارجی (نظیر دست) روپوش سربی برای بیمار ضروری است. درموارد خاص، برای حفاظت غددجنسی از پرتوهای اولیه درصورتی که حفاظ مانعی بر اندام مورد آزمایش نباشد، باید شیلد شوند. برای تضعیف پرتوهای اولیه، ضخامت حفاظ باید حداقل 0.5 mm سرب باشد، البته نباید سایه حفاظ روی فیلم بیافتد. افزایش فاصله چشمه تا بیمار (SOD) یا چشمه تا تصویر (SID) در کاهش دُز مؤثر است. با افزایش فاصله‌های SOD و SID واگرایی پرتو کاهش و درنتیجه حجم مورد تابش بدن بیمار و دُز کل کاهش می‌یابد. دُز ناشی از نشت تیوب نیز به‌دلیل افزایش فاصله تیوب تا بیمار هرچند

ناچیز، کاهش می‌یابد. در مواردی که SID ثابت است (مثلاً سیستم پرتونمایی C-arm) با افزایش (تاحدممکن) SOD، دُز بیمار کاهش می‌یابد. براساس قوانین فدرال، حداقل فاصله لکه کانونی تا بیمار ۲۰ cm است ولی برای جلوگیری از پرتوگیری اضافی رعایت حداقل فاصله ۳۰ cm اکیداً توصیه می‌شود.

گیرنده‌های تصویر اشعه ایکس

تعداد فوتونهای پرتوی ایکس مورد نیاز برای رسیدن به سطح معینی از سیگنال و در نتیجه دُز بیمار تابع سرعت گیرنده تصویر است. سرعت فیلم ومشدد، نسبت به گیرنده تصویر مساوی ۱۰۰ است، سیستمی با سرعت بیشتر برای تولید دانسیته نوری معین به پرتوگیری کمتری احتیاج دارد (مثلاً پرتوی مورد نیاز فیلم_مشدد ۴۰۰، چهار برابر کمتر از سیستمی با سرعت ۱۰۰ است). فرایند ظهور و ثبوت فیلم نیز در سرعت سیستم مؤثر است. فیلم یا مشدد تند سبب کاهش پرتوگیری بیمار می‌شود. در فیلم تند عیب کاهش وضوح تصویر و در مشدد ضخیم، عیب کاهش قدرت تفکیک پدید می‌آید. بنابراین، با افزایش سرعت فیلم_مشدد، پرتوگیری بیمار کاهش می‌یابد ولی این کاهش توسط کیفیت تصویر محدود می‌شود. در پرتونگاری دیجیتالی از آشکارسازهای فسفر ذخیره‌ای (PSP) استفاده می‌شود و دامنه پرتوگیری گیرنده‌های تصویر عریض است. (تنظیم کنتراست و روشنایی) و پردازش تصویر، امکان دست‌کاری تصویر برای مشاهده بهتر را فراهم می‌سازد.

بنابراین، این آشکارسازها می‌توانند (چندین درجه) پرتوگیری بیشتر یا کمتر از حد لازم را جبران و از تکرار فیلم ناشی از روش نادرست پرتونگاری جلوگیری نمایند. با این حال، پرتوگیری کمتر از حد لازم، سبب کاهش قدرت تفکیک و برعکس، پرتوگیری بیش از حد لازم باعث دُز بی‌مورد بیمار می‌شود. در تصویرسازی اندام‌های خارجی با آشکارسازهای PSP نیاز به مقدار پرتوگیری بیشتری است (نظیر کاست فیلم_مشدد با سرعت ۷۵ تا ۱۰۰) در حالی که، برای کاهش دُز در کودکان باید از پرتوگیری کمتر یعنی فیلم_مشدد تند (مثلاً ۴۰۰) استفاده شود. مشدد، یک سیستم آشکارسازی با محدوده دینامیک عریض است، از اینرو پرتو مورد نیاز توسط دیافراگم یا ضریب تقویت الکترونیکی آشکارساز (مثلاً دوربین TV) تعیین می‌شود. پرتوگیری صفحات مشدد ممکن است از مقادیر بسیار کم $1 \mu R$ در هر تصویر پرتونمایی تا مقادیر زیاد $4 mR$ در هر تصویر برای آنژیوگرافی تفاضلی متغیر باشند.

پرتونمایی

سهم پرتونمایی پزشکی در دُز بیماران زیاد است زیرا پرتوی ایکس بطور پیوسته تولید می‌شود و تصاویر خروجی زنده‌اند. هرچند روش‌های پرتوگیری کاملاً بهینه است (شدت جریان ۱ تا mA ۳ تا $75 kV_p$ برای اکثر مطالعات) ولی در یک آزمایش پرتونمایی ممکن است چند دقیقه و

در موارد خاص به ساعت‌ها پرتوگیری نیاز باشد. برای مثال، یک سیستم ژنراتور تک فاز با 2mA در 80 kV_p به مدت ۱۰ دقیقه پرتونمایی (1200 mA_s) در فاصله یک‌متری $6R$ پرتوتابی می‌کند (فرض کنید برای 80 kV_p در یک‌متری 5 mR/mA_s است). اگر فاصله لکه کانونی از پوست 30 cm باشد پرتوی ورودی بیمار $67R \approx 6R \times (\frac{100}{30})^2$ است. در امریکا حد پرتوگیری بیماران ناشی از پرتونمایی (30 cm از چشمه پرتوی ایکس) برای سیستمی با کنترل اتوماتیک نوری (ABC)^۱ 10 R/min و برای سیستمی بدون ABC، 5 R/min است. متوسط دُز معادل مؤثر بیماران ناشی از آزمایشات آنژیوگرافی قلب در استان یزد 5 mSv و دُز جمعی آن $17/5\text{ man.Sv}$ برآورد شده است. در حالی که دُز معادل مؤثر حد راهنما (SENTINEL) 4 mSv اعلام شده است.

^۱ ABC: Automatic brightness control