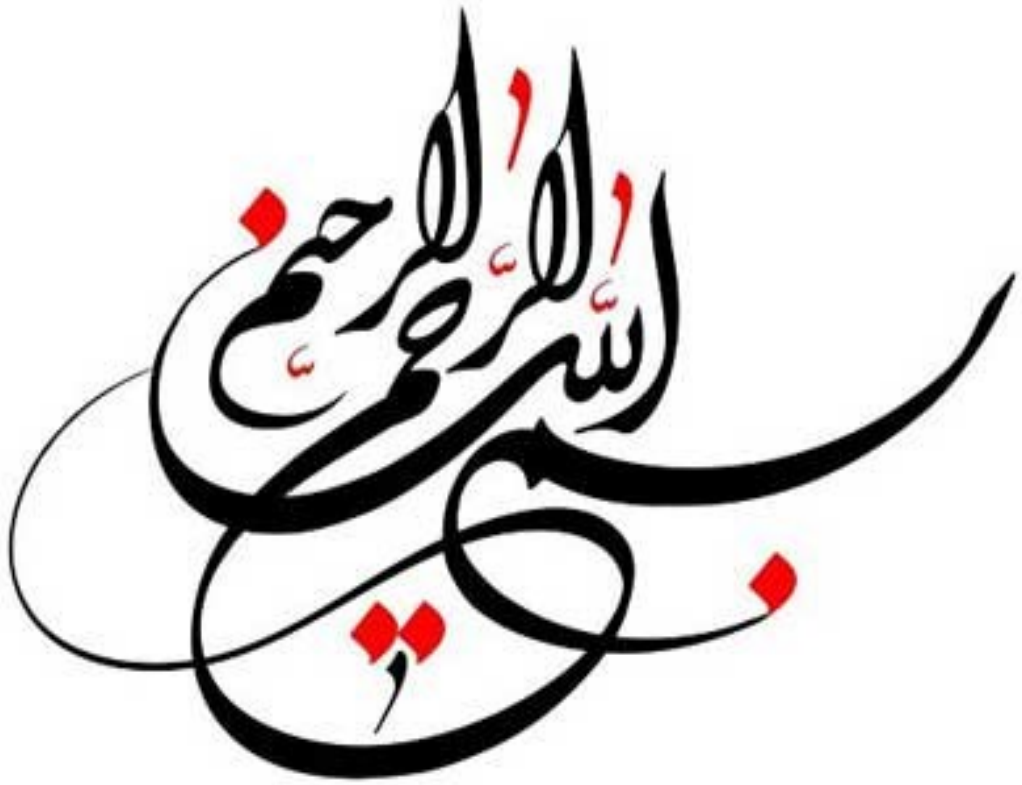




عنوان دوره آموزشی :

## اصول پرتودرمانی ( ۱ )

تابستان ۱۳۹۹



مقدمه	۷
تاریخچه پرتودرمانی	۹
انواع پرتودرمانی	۱۰
پرتودرمانی خارجی	۱۰
رادیوتراپی حین جراحی (Intraoperative Radiotherapy)	۱۰
رادیوتراپی تطبیقی سه بعدی 3D Conformal Radiation Therapy	۱۱
Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT)	۱۱
رادیوتراپی داخلی ( Brachy Therapy )	۱۱
اصول و قواعد پرتودرمانی	۱۲
ارزیابی مقدماتی بیمار ارجاع شده به بخش پرتودرمانی	۱۲
مواردی که انجام پرتودرمانی به صلاح نمی باشد:	۱۳
مواردی که پرتودرمانی به عنوان درمان به کار می روند عبارتند از:	۱۳
مواردی که پرتودرمانی به عنوان مسکن به کار میرود عبارتند از:	۱۳
طرح درمانی	۱۴
تقسیم بندی دوز به زمان درمان	۱۴
تحمل پرتوی ( tolerance )	۱۵
زمان درمان و تقسیم بندی دز به درمان:	۱۷
دز کنترل تومور:	۱۷
TCD به عوامل زیر بستگی دارد:	۱۷
تکنیک های معمول پرتو درمانی	۱۸
عللی که منجر به ناموفق بودن روش درمانی می شوند :	۱۹
خطاهای تکنیکی :	۱۹
مقاومت پرتوی :	۱۹

۱۹	..... وسعت اولیه تومور :
۱۹	..... تومور جدید :
۱۹	..... موارد ناشناخته :
۲۰	..... متاستاز دور دست :
۲۰	..... نسبت درمانی در پرتو درمانی :
۲۱	..... روش های افزایش نسبت درمانی .....
۲۳	..... ارزیابی نتایج درمانی :
۲۴	..... نقش پرتو درمانی در درمان سرطانهای مختلف .....
۲۵	..... منابع انرژی در پرتودرمانی خارجی .....
۲۵	..... اشعه گاما یا X .....
۲۵	..... تشعشعات ذره‌ای ( Particle beams ) .....
۲۵	..... درمان با پرتو پروتون ( Proton beam therapy ) .....
۲۵	..... درمان با پرتو کربن ( Carbon Beam Therapy ) .....
۲۶	..... منابع انرژی مورد استفاده در پرتو درمانی داخلی .....
۲۶	..... Stereo Tactic Radiosurgery .....
۲۶	..... Stereo tactic Radiotherapy .....
۲۶	..... اندازه‌گیری دوز تشعشع .....
۲۷	..... پرتوهای Low LET و پرتوهای High LET .....
۲۷	..... دستگاهها و تجهیزات پرتودرمانی .....
۲۸	..... دستگاههای تله تراپی .....
۲۸	..... اجزای اصلی دستگاه های تله تراپی عبارت اند از: .....
۲۸	..... چشمه های تله تراپی .....
۲۹	..... محفظه ی چشمه های تله تراپی .....

۲۹	..... شتاب دهنده های ذرات
۳۰	..... بتاترون
۳۱	..... سیکلوترون
۳۲	..... میکروترون
۳۳	..... شتاب دهنده ی خطی
۳۳	..... نسل های شتاب دهنده ی خطی
۳۴	..... نکات ایمنی در شتاب دهنده های خطی
۳۴	..... اجزای شتاب دهنده ی خطی
۳۷	..... پرتودرمانی با پروتون، نوترون و یون های سنگین
۳۷	..... ملاحظات حفاظ سازی
۳۸	..... براکی تراپی : جنبه های فیزیکی و عملی
۴۱	..... استفاده ی بالینی
۴۳	..... حساس کننده ها و محافظت کننده های پرتوی
۴۴	..... رادیو داروها
۴۵	..... رادیوبیولوژی مقدماتی
۴۶	..... طبقه بندی پرتو در رادیوبیولوژی
۴۷	..... چرخه ی سلول و مرگ سلول
۴۷	..... پرتودهی به سلول ها
۴۸	..... عمل مستقیم در آسیب سلولی با پرتوها
۴۸	..... تأثیر غیرمستقیم در آسیب سلولی با پرتوها
۴۹	..... وضعیت سلول های پرتودیده
۴۹	..... نوع آسیب پرتودهی
۵۰	..... طبقه بندی آسیب پرتو

۵۰	.....	اثرات یاخته های پیکری و ژنتیک
۵۱	.....	اثرات تصادفی و غیرتصادفی ( قطعی )
۵۱	.....	اثرات زودرس در برابر اثرات دیررس بافت یا اندام
۵۱	.....	واکنش به پرتوگیری کلی بدن
۵۲	.....	پرتوگیری جنینی
۵۲	.....	منحنیهای بقای سلولی
۵۴	.....	منحنیهای پاسخ دز
۵۶	.....	اندازه گیری آسیب پرتوها در بافت
۵۷	.....	سلول های توموری و سالم: نسبت درمانی
۵۸	.....	اثر اکسیژن
۶۰	.....	اثر نسبی بیولوژیکی
۶۱	.....	آهنگ دز و تقسیم دز
۶۳	.....	حساس کننده به پرتو و محافظت کننده از پرتو
۶۴	.....	ایمنی و حفاظت در برابر پرتوها در پرتودرمانی
۶۵	.....	اثرات پرتوها
۶۵	.....	اثرات قطعی
۶۵	.....	اثرات تصادفی
۶۶	.....	اثرات بر روی نطفه و جنین
۶۶	.....	انواع پرتوگیری ها
۶۸	.....	چارچوب پایه برای حفاظت در برابر پرتو
۶۹	.....	قوانین دولتی و سازمان های ملی
۷۰	.....	محدوده ی استانداردهای ایمنی پایه
۷۰	.....	مسئولیت های به کارگیری نیازمندی های استانداردهای ایمنی پایه

ایمنی همراه با آزمون های مقبولیت، اجرا و عملکرد .....	۷۱
ایمنی چشمه ها .....	۷۳
پرتوگیری های شغلی .....	۷۴
مسئولیت ها و شرایط سرویس .....	۷۴
مراتب بررسی برای پرتوگیری کارکنان در پرتودرمانی .....	۷۴
حاملگی کارکنان .....	۷۵
طبقه بندی ناحیه ها .....	۷۶
پایش فردی و ارزیابی پرتودهی .....	۷۷
پایش مکان کار .....	۷۸
بررسی سلامت .....	۷۸
طراحی درمان .....	۷۹
طراحان درمان در پرتو درمانی .....	۷۹
منابع :	۸۱

## مقدمه

پرتودرمانی یا رادیوتراپی ( Radiotherapy ) یکی از مهم‌ترین شاخه‌های فیزیک پزشکی است . پرتودرمانی به درمان بیماری با استفاده از پرتوهای نافذ مانند پرتوهای ایکس و آلفا و بتا و گاما که یا از دستگاه تابیده شده اند یا از داروهای حاوی مواد نشاندار شده ساطع شده اند می گویند . پرتودرمانی با نام های درمان از طریق پرتوهای هسته ای ، سرطان شناسی پرتوی و رادیولوژی درمانی شناخته شده است و یکی از سه روش مهمی است که از آن برای درمان بیماری های بدخیم ( سرطان ) استفاده می شود . دو روش دیگر ، جراحی و شیمی درمانی است . پرتودرمانی از اشعه X ، گاما ، الکترون و یا پروتون برای تخریب یا آسیب رساندن به سلول های سرطانی استفاده می کند . پرتودرمانی یکی از شایع ترین درمان های سرطان بوده و اغلب درمان اصلی در سرطان های سر و گردن ، مثانه ، ریه و بیماری هودچکین می باشد و در بسیاری از سرطان های دیگر نیز بیماران به عنوان قسمتی از برنامه درمانی ، تحت پرتودرمانی قرار می گیرند. پرتودرمانی می تواند به تنهایی یا با درمان های دیگر سرطان نظیر جراحی یا شیمی درمانی همراه باشد . در حقیقت داروهای خاصی به عنوان حساس کننده به اشعه شناخته شده اند و این داروها اثرات پرتودرمانی را چندین برابر کرده و باعث می شوند تا اشعه پرتو درمانی مؤثر تر واقع شود . این خاصیت ناشی از این حقیقت است که داروهای شیمی درمانی باعث قرارگیری سلولهای سرطانی در فازهایی از مراحل تقسیم سلولی می شوند که سلول در آن مراحل به اشعه حساستر است .

برخلاف تخصص های پزشکی دیگر که بر پایه ی اطلاعات کلینیکی و تجربه ی متخصصین پزشکی استوار هستند ، در پرتودرمانی از پرتوهای یونیزان برای درمان سرطان استفاده می کنند . تکنولوژی پیشرفته و همکاری تعدادی متخصص که به صورت گروهی با یک دیگر کار می کنند ، تأثیر به سزایی در نتیجه ی درمان دارد .

پرتو درمانی بوسیله شکستن مولکول DNA داخل سلول سرطانی عمل می کند . این شکسته شدن DNA درون سلولی مانع رشد ، تکثیر و گسترش تومور می گردد . همچنین ممکن است سلول های نرمال بوسیله پرتودرمانی تحت تاثیر قرار بگیرند ، ولی اکثر این سلول ها به حالت نرمال بر خواهند گشت .

برعکس شیمی درمانی که تمام بدن در مواجهه با دارو قرار می گیرد ، پرتودرمانی معمولاً یک درمان موضعی محسوب می شود و عوارض محدود به همان ناحیه دارد در حالیکه بافت سالم مجاور و خارج از محدوده درمان کمترین آسیب را خواهد دید . هدف از پرتو درمانی ، از بین بردن حداکثر سلولهای سرطانی با حداقل آسیب به بافت های سالم است .

نزدیک به دو سوم از بیماران سرطانی در جریان مداوای خود از پرتودرمانی استفاده می کنند . پرتودرمانی به چند منظور انجام می شود . در بعضی مواقع مثل سرطان رکتوم برای کوچک کردن اندازه تومور قبل از جراحی (نئو ادجوانت) استفاده می شود .



هدف دیگر از پرتودرمانی جلوگیری از عود موضعی و گسترش دور دست بیماری است . در این مورد از پرتودرمانی ادجوانت ( Adjuvant ) استفاده می شود تا درمان موضعی ناحیه درمان کامل شود مثل سرطان پستان .

پرتودرمانی با هدف کنترل درد استخوانی و جلوگیری از شکستگی ناشی از متاستاز استخوانی نیز می تواند مد نظر باشد ( درمان پالیاتیو ) .

در بعضی بیماران سرطانی که خونریزی شدیدی وجود دارد ، پرتودرمانی برای کنترل خونریزی نیز می تواند مورد استفاده قرار بگیرد .

در بعضی مواقع که این پیش بینی وجود دارد که با جراحی تنها ، احتمال عود موضعی بالاست می توان از پرتودرمانی در کنار جراحی استفاده کرد . نمونه بارز این منفعت در سرطان پستان وجود دارد که بعد از جراحی و شیمی درمانی در صورتیکه شواهد نشان دهد احتمال عود موضعی بالاست از پرتودرمانی استفاده می شود تا هر سلول تومورال که در موضع باقیمانده است را بصورت کامل از بین ببرد .

در بسیاری از بیماران که انجام عمل جراحی ، عوارض زیادی را به بیمار تحمیل می کند و یک ارگان را از بین می برد می توان از پرتودرمانی به جای جراحی به عنوان درمان قطعی استفاده کرد . برای مثال در خیلی از تومورهای سر و گردن و مری و دهانه رحم از پرتودرمانی در کنار شیمی درمانی به عنوان درمان قطعی استفاده می کنند که جایگزین جراحی شده است ( درمان Definitive ) .

گروه پرتودرمانی متشکل از : سرطان شناس هسته ای ( رادیوانکولوژیست ) ، متخصص فیزیک پزشکی ( فیزیسیست ) ، دزیمتریست ، متخصصین تجهیزات پرتودرمانی و تکنولوژیستهای پرتودرمانی است که تخصص آن ها با یک دیگر فرق دارد و زمینه ی مشترک آن ها تشخیص نیاز قسمت های مهم برای فیزیک پزشکی و برهم کنش پرتوهای یونیزان با بافت بدن است . این رشته ی تخصصی در فیزیک به نام فیزیک سرطان شناسی پرتوی شناخته شده است و تخصص در این رشته نیاز اساسی برای کسانی است که تمایل دارند در یکی از رشته های مربوط به پرتودرمانی و در گروه آن ها به فعالیت مشغول شوند . مزیت هایی که در گذشته بیشتر مربوط به فیزیک بود اکنون در رشته ی سرطان شناسی پرتوی ، اغلب در پیشرفت تکنولوژی در تجهیزات مربوط به فرایند پرتودرمانی و تصویر برداری است .

## تاریخچه پرتودرمانی

در برهه ای از زمان ، بشر متوجه جایگاه درمانی پرتوهای یونیزان شد ، در نتیجه سعی کرد دستگاه هایی را طراحی کند که بتواند امواج یونیزان به داخل ناحیه درمانی تخلیه کند . تاریخچه پرتودرمانی به همان اوایل کشف اشعه X برمی گردد . هنگامی که تجربه های اولیه نشان می داد که مواجهه با مواد ساطع کننده اشعه باعث سوختگی می شود . در نتیجه پزشکان از این نقش درمانی برای درمان ضایعات سطحی پوست مثل لوپوس یا زخم های مزمن استفاده می کردند . مطالعات بعدی نشان داد که امواج پرتودرمانی یک نقش ضد باکتریایی نیز ایفا می کنند ، در نتیجه برای زخم های مقاوم ناشی از سل نیز از این روش درمانی استفاده شد .

استفاده گسترده از ماده رادیواکتیو رادیوم باعث شد بشر متوجه شود تحمل بدن در مقابل این امواج محدود بوده و در صورت رسیدن دوز بیش از حد ، احتمال ایجاد سرطان حتی تا ۴۰ سال بعد نیز وجود دارد . پس از کشف تمام این محدودیت ها ، امروزه از پرتودرمانی با تعیین همه شرایط ، به عنوان یک روش درمانی با اهمیت در سرطان استفاده می شود .

طی دو دهه نخست سده بیستم ، رشته رادیوتراپی انکولوژی تغییرات چشمگیری را پشت سر گذاشته است . در آن زمان متخصصین رادیوتراپی انکولوژی برای برنامه ریزی و درمان بیماران با استفاده از آنچه روش دو بعدی ( 2D ) نامیده می شد ، آموزش دیده بودند . این روش تأکید داشت بر استفاده از یک شبیه ساز مرسوم اشعه ایکس برای طراحی پرتال های پرتویی که بر اساس تکنیک های ترکیب اشعه ای استاندارد و استفاده از بوکمارک های استخوانی تجسم شده بر روی صفحه رادیوگرافی ، کار می کند . این روش در حالی که هنوز توسط برخی کلینیک ها استفاده می شود ، به طور گسترده با یک روش سه بعدی ( 3D ) در کلینیک های پرتو درمانی مدرن جایگزین شده است . با معرفی سیستم های برنامه ریزی درمان 3D تجاری در اوایل دهه ۱۹۹۰ این روش امکان پذیر شد . در مقابل روش 2D ، برنامه ریزی درمان 3D بر یک روش شبیه سازی مجازی بر پایه تصویر برای تعیین حجم تومور و اعضای مهم در خطر برای بیمار خاص تأکید دارد . این فرایند 3D جدید برای متخصصین رادیوتراپی انکولوژی جهت تشخیص حجم و اعضای هدف را که در خطر هستند ، با دقتی بسیار بالاتر از قبل ، تقاضاهای جدیدی را ایجاد کرد . و همچنین برای متخصصین فیزیک پزشکی برای فراهم کردن فرایندهای با کیفیت مطمئن ( QA ) و مؤثر برای اطمینان بخشیدن به استفاده ایمن از این برنامه ریزی جدید بر اساس تصویر و روش کنترل درمان کامپیوتری ، فرصتهای مناسبی را ایجاد کرد .

مشخص نیست که چه کسی برای نخستین مرتبه در تاریخ از پرتوهای یونیزان برای مقاصد درمانی استفاده کرد ، اما یکی از اولین کوشش های اینچنینی متعلق به سال ۱۸۹۶ است که ویکتور دسپن به طور ناموفقی سعی در درمان سرطان معده با پرتوهای ایکس نمود . در آن زمان پرتوها دارای انرژی کافی نبودند و لذا پرتودرمانی را فقط برای

غده‌های سطحی امکان‌پذیر می‌نمودند . این وضعیت البته با ابداع تجهیزات ویژه ۲۰۰ کیلوولتی در سال ۱۹۲۲ میلادی دچار دگرگونی شد . در همان سال ، یک جراح اتریشی بنام لئوپولد فرویند چگونگی درمان یک خال گوشتی توسط پرتوهای اشعه ایکس را برای نخستین بار به انجمن پزشکی وین نشان داد و این سرآغازی بود بر تحقیقات گسترده بعدی جهت شناخت هرچه بهتر آثار پرتوها بر بافت زنده و امکان استفاده ی درمانی از آنها .

### انواع پرتودرمانی

پرتودهی ممکن است توسط دستگاهی خارج از بدن ( رادیوتراپی خارجی ) یا توسط منبع پرتو در داخل بدن ( رادیوتراپی داخلی ) یا توسط مواد رادیواکتیو باز در داخل بدن انجام شود ( رادیوتراپی سیستمیک ) . نوع پرتودهی به نوع تومور، تحمل بافت‌های سالم اطراف محل آن ، مسافتی که پرتو باید در داخل بدن طی کند ، همچنین به سلامت عمومی بیمار ، تاریخچه بیماری و اینکه آیا بیمار از روش‌های دیگر درمان استفاده خواهد کرد یا نه و مجموعه‌ای عوامل دیگر بستگی دارد . در بیشتر بیماران از روش پرتودرمانی خارجی و در تعدادی از بیماران از سه روش پرتو درمانی خارجی ، داخلی و سیستمیک همراه با هم یا جداگانه استفاده می‌شود .

#### پرتودرمانی خارجی

پرتودرمانی یا رادیوتراپی خارجی معمولاً در بیماران سرپایی مورد استفاده قرار می‌گیرد . در بیشتر این بیماران نیاز به بستری شدن در بیمارستان نیست . در پرتودرمانی خارجی از روش‌هایی استفاده می‌شود که قادر به وارد کردن دوز بالای اشعه به داخل بافت تومورال از خارج بدن می‌باشند . اکثریت بیماران تحت پرتودرمانی خارجی در طی چندین هفته متوالی قرار می‌گیرند . پرتودرمانی خارجی بصورت سرپایی در یک بیمارستان یا یک مرکز درمانی انجام می‌شود .

رادیوتراپی خارجی برای درمان انواع سرطان شامل سرطان مثانه ، مغز ، پستان ، رکتوم ، پانکراس ، معده ، گردن رحم ، حنجره ، ریه ، پروستات و رحم استفاده می‌شود . علاوه بر این ، رادیوتراپی خارجی ممکن است برای کاهش دردهای متاستاتیک یا مشکلات دیگر ناشی از گسترش تومورها مورد استفاده قرار گیرد .

#### رادیوتراپی حین جراحی (Intraoperative Radiotherapy)

این روش نوعی پرتو درمانی خارجی همراه با جراحی است ( IORT ) . برای درمان تومورهای متمرکز که نمی‌توان آن‌ها را به طور کامل خارج کرد یا ریسک عود مجدد وجود دارد استفاده می‌شود . بعد از خارج کردن تمام یا بیشتر بافت تومورال ، یک دوز زیاد با انرژی بالا مستقیماً به محل تومور در حین جراحی داده می‌شود ( بافت‌های سالم اطراف به وسیلهٔ شیلدهای مخصوصی حفاظت می‌شوند ) . بیمار بعد از عمل جراحی در بیمارستان بستری می‌شود . این روش ممکن است در درمان تومورهای تیروئید ، colorectal ، gynecological ، روده باریک و لوزالمعده (

پانکراس ) استفاده شود . این روش برای درمان برخی از انواع تومورهای مغز و سارکومای لگن در بزرگسالان تحت بررسی است .

### رادیوتراپی تطبیقی سه بعدی 3D Conformal Radiation Therapy

رادیوتراپی تطبیقی برخلاف طرح درمان‌های قدیمی سه بعدی است و از کامپیوتر برای هدف‌گیری دقیق تر تومور استفاده می‌شود . امروزه بیشتر متخصصین سرطان‌شناسی از این روش استفاده می‌کنند . تصاویر سه بعدی CT ، PET ، MRI و یا SPECT تهیه و به کمک نرم افزارهای مخصوص ، پرتوهایی که با شکل تومور مطابقت دارند طراحی می‌شود . چون در این تکنیک بافت سالم اطراف تومور به‌طور وسیع از تشعشع دور است ، از دوزهای بالاتر برای درمان تومور می‌توان استفاده کرد . استفاده از این روش در تومورهای Nasopharyngeal ، پروستات ، ریه ، کبد و تومورهای مغزی نتایج بهتری در برداشته است .

### (IMRT) Intensity-Modulated Radiation Therapy

در این روش که یک نوع رادیوتراپی تطبیقی سه بعدی جدید است معمولاً از پرتوهای X با شدت‌های متفاوت برای انتقال دزهای متفاوت پرتو به نواحی کوچک بافت به طور هم‌زمان استفاده می‌شود . در این تکنولوژی نیز دزهای بالا به تومور و دزهای کمتر به بافت‌های سالم اطراف می‌رسد . در برخی تکنیک‌ها بیمار دز روزانه بیشتری دریافت می‌کند و زمان کل درمان کاهش و موفقیت درمان بیشتر می‌شود . IMRT ممکن است عوارض جانبی درمان را کاهش دهد . پرتودهی در این روش به وسیلهٔ یک شتاب دهنده خطی مجهز به کولیماتور Multileaf انجام می‌شود (کولیماتور به شکل دادن دقیق پرتوها کمک می‌کند ) . با چرخش دستگاه به دور بدن بیمار پرتوها از بهترین زوایا وارد تومور می‌شوند . پرتوها تا حد امکان به‌طور دقیق با شکل تومور تطبیق داده می‌شوند . چون دستگاه IMRT بسیار تخصصی است ، مراکز سرطان‌شناسی به ندرت از این وسیله استفاده می‌کنند . این تکنولوژی جدید برای درمان تومورهای مغزی ، سروگردن ، حلق ، بینی ، پستان ، کبد ، ریه ، پروستات و رحم مورد استفاده قرار می‌گیرد . IMRT برای هر بیمار یا هر نوع توموری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد .

### رادیوتراپی داخلی (Brachy Therapy)

در این روش ، منبع تشعشع که در یک پوشش نگهدارنده کوچک پیچیده شده در داخل تومور یا بسیار نزدیک به آن قرار می‌گیرد و Implant یا ماده کاشتنی نامیده می‌شود . مواد کاشتنی ممکن است در شکل‌های مختلف مانند سیم‌های کوچک ، تیوب‌های پلاستیکی ( کاترها ) ، ribband ( رشته‌ای ) ، کپسول یا به شکل دانه‌ای وجود داشته باشد . مواد کاشتنی مستقیماً در داخل بدن گذاشته می‌شوند . در رادیوتراپی داخلی ممکن است بیمار نیاز به بستری داشته باشد . رادیوتراپی داخلی معمولاً به یکی از روش‌های زیر انجام می‌شود که هر کدام به‌طور جداگانه توضیح داده شده‌است . در هر سه روش از مواد کاشتنی سربسته استفاده می‌شود .

### رادیوتراپی داخل نسجی (Interstitial Rediotherapy)

در این روش ماده رادیواکتیو در داخل بافت یا نزدیک محل تومور قرار می‌گیرد. این روش در درمان تومورهای سر و گردن، پروستات، گردن رحم (Cervix)، تخمدان، پستان، نواحی لگن و اطراف مقعد استفاده می‌شود. در رادیوتراپی خارجی پستان ممکن است یک دوز بیشتر (Boost) به روش داخل نسجی یا خارجی به بیمار داده شود.

### رادیوتراپی داخل حفره‌ای (Therapy Intracavitary)

در این روش منبع رادیواکتیو به وسیلهٔ یک اپلیکاتور در داخل بدن قرار می‌گیرد. این روش معمولاً در درمان تومورهای رحم استفاده می‌شود. محققان در حال مطالعه و بررسی انواع رادیوتراپی داخلی برای درمان دیگر سرطان‌ها شامل پستان، Bronchial، گردنی، مثانه، دهانی، Tracheal، Rectal، رحم و واژن هستند.

### رادیوتراپی سیستمیک (پزشکی هسته‌ای)

در این روش از مواد رادیواکتیو مانند <sup>89</sup>Strontium، <sup>131</sup>I به صورت خوراکی یا تزریقی استفاده می‌شود. این روش درمانی گاهی اوقات برای درمان سرطان تیروئید و لنفوم غیر هوچکینی بزرگسالان استفاده می‌شود. محققان در حال بررسی موادی هستند که بتواند برای درمان دیگر انواع سرطان استفاده شود.

## اصول و قواعد پرتودرمانی

### ارزیابی مقدماتی بیمار ارجاع شده به بخش پرتودرمانی

یک متخصص پرتودرمانی در ارزیابی مقدماتی بیمار سرطانی معرفی شده به پرتودرمانی، برگ معاینات پزشکی، سابقه بیماری و یکسری امتحانات فیزیکی و رادیوگرافی تشخیصی بیمار را به همراه گزارش پاتولوژی از بیوپسی یا نمونه جراحی انجام گرفته مطالعه می‌کند و بر اساس این ارزیابی، مرحله پیشرفته بیماری (stage) تعیین میشود. برای ارزیابی مناسب مرحله ای بیماری بایستی بررسی‌های تشخیصی بیشتری برای تمامی داده های بالینی در دست داشت.

متخصص پرتودرمانی در صورت تصمیم به پرتودرمانی بیمار بایستی هدف از آن را نیز که آیا پرتودرمانی به دست در ما یا تسکین درد انجام خواهد گرفت، مدنظر قرار دهد.

مواردی که انجام پرتودرمانی به صلاح نمی باشد:

۱. وضعیت عمومی بیمار ممکن است چنان نامناسب باشد که نتواند تحمل یک دوره درمانی پرتوی را داشته باشد .
۲. مرحله بیماری ممکن است چنان پیشرفته باشد که پرتودرمانی برای بیمار نتیجه ی مطلوب را برآورد نکند .
۳. بیماری ممکن است با روش های دیگر درمانی به طور مناسب تری مداوا شونده باشد .
۴. بیمار ممکن است یک دز پرتوی بالایی را که برای پرتودرمانی مد نظر است قد بلند دریافت کرده باشد .
۵. تومور گاهی آنچنان به عضو حساس به پرتو نزدیک است که پرتودرمانی باعث به خطر افتادن زندگی بیمار می شود .

مواردی که پرتودرمانی به عنوان درمان به کار می روند عبارتند از:

۱. پرتودرمانی تنها ، در تعداد معدودی از تومورها نظیر کانسر اولیه نخاع ، کانسر گردن رحم ، مراحل اولیه بیماری هوچکین درمانی می باشد . با این حال در تعداد کثیری از بیماران دوزهای بالای با علم به اینکه شانس مداوا پایین است ، مثلن در کانسر موضوعی یک داده می شود .
۲. پرتودرمانی همراه با جراحی در درمان تعداد کثیری از بیماران نظیر بیماران مبتلا به کانسر سر و گردن ، پستان ، مثانه ، رحم و رکتوم به کار میرود .
۳. پرتو همراه با شیمی درمانی برای تعداد معدودی از بیماران نظیر بیماران با هوچکین پیشرفته به کار میرود .
۴. در برخی از بیماران هر سه نوع روش درمانی ( پرتو درمانی ، جراحی و شیمی درمانی ) با هم به کار میرود . مستند برای سارکوم های بافت نرم ، تومور ویلمز و برخی از بیماران با کانسر پستان .

مواردی که پرتودرمانی به عنوان مسکن به کار میرود عبارتند از:

- تعداد کثیری از بیماران، پرتو درمانی را برای برطرف کردن لحظه ای علائم حاصل از کانسر پیشرفته دریافت می کنند .
- بیمارانی که متاستاز استخوانی درد دار یا مغزی همراه با علائم مغزی دارند معمولاً پرتو درمانی را به عنوان مسکن دریافت می کنند .

در این مورد بایستی دوره درمانی با پرتو کوتاه باشد .

#### طرح درمانی

طراحی درمان مهمترین بخش کار متخصص پرتو درمانی است و برای هر بیمار قبل از شروع و هر گونه برنامه پرتو درمانی انجام میگردد . مشارکت تکنولوژیست ، دوزیمتریست پرتوی و در موارد خاص فیزیسیست پرتو نیز در طراحی درمان صورت می گیرد . برای یک طرح درمانی مناسب موارد زیر اساسی هستند :

۱. آگاهی از محل و وسعت تومور

۲. آگاهی از سابقه طبیعی تومور

۳. آگاهی از میزان حساسیت پرتوی تومور

۴. آگاهی از تحمل پرتوی ساختارهای آناتومیک موجود در حجم درمان

۵. آگاهی از ویژگی های فیزیکی باریکه پرتوی یا منابع پرتوی به کار رفته در پرتو درمانی .

۶. آگاهی از تکنیک درمانی که باید به کار رود .

۷. توصیف هدف درمان یا دز تومور

۸ . جدول کسر بندی دز - زمان

۹. محاسبات اساسی دز پرتوی

تقسیم بندی دوز به زمان درمان

۱. تقسیم بندی استاندارد - ۲۰۰ راد برای هر تقسیم ، ۵ جلسه در هفته

۲. رژیم طولانی شده - دوره درمانی طولانی شده تا ۶۰ الی ۷۰ روز برای تخفیف شدت واکنش های حاد بافتی مفید می باشد .

۳. رژیم درمانی فاصله دار - دو دوره درمانی با یک فاصله استراحت برای اینکه بافت های سالم بهبود یافته و تومورها دوباره اکسیژنه شوند ، به کار می رود .

۴. تقسیم بندی سه روز در هفته - که در آن پرتو درمانی در روزهای شنبه ، دوشنبه و چهارشنبه صورت می گیرد .

۵. تقسیم بندی دو بار در روز - برای بیمارانی با تومور سریع رشد به منظور جلوگیری از پروليفراسيون سلولی بين جلسات اعمال می شود .

۶. رژیم دز بالا در چند جلسه محدود

تحمل پرتوی ( tolerance )

حداکثر دز پرتوی که حداقل احتمال بروز جراحت دائمی در بافت نرمال پرتودیده را بدهد به دز تحمل پرتوی معروف است . دز تحمل پرتوی در هر بافتی مقدار دزی است که یک تا ۵٪ شانس ایجاد ضایعه را در عرض ۵ سال خواهد داشت . دزهای تحمل پرتوی بافتهای مختلف در جدول زیر نشان داده شده است .



حساسیت نسبی پرتوی بافتهای سالم	
حساسیت پرتوی	بافت سالم
خیلی بالا	لنفوسیت
	مغز استخوان
	اپیتلیوم روده ای
	اپیتلیوم بیضه ای
بالا	اپیتلیوم تخمدانی
	اپیتلیوم فولیکول مو
	اپیدرم
	غشاهای مخاطی حفره دهان و حلق
	اپیتلیوم مثانه ای - ادراری
متوسط	بافت پیوندی
	عروق کوچک خونی ( اندوتلیوم )
	بافت نوروگلیا ( بافت پیوندی سیستم عصبی )
	غضروف استخوان در حال رشد
	اپیتلیوم غده ای پستان
اندکی پائین	غضروف یا استخوان بالغ
	اپیتلیوم غدد بزاقی
	اپیتلیوم ریوی
	اپیتلیوم کلیوی
	اپیتلیوم تیروئید
	اپیتلیوم لوزالمعده ای
	اپیتلیوم هیپوفیزی
	اپیتلیوم کبدی
پائین	بافت عصبی
	عضله

تحمل پرتوی به عوامل زیر بستگی خواهد داشت:

نوع بافت :

بافت ها بر اساس میزان حساسیت پرتوی متفاوت عمل می کنند .

حجم بافت پرتودیده:

تحمل پرتوی با افزایش حجم درمانی کاهش می یابد.

زمان درمان و تقسیم بندی دز به درمان:

الیس (ELLIS) روابط هم اثر برای تحمل بافتی بافت سالم را با فرمول ریاضی که معروف به معادل دز استاندارد عددی الیس (NSD) می باشد توضیح داده است .

معادله NSD بر اساس خطوط هم اثر روی پوست محاسبه شده و به شکل زیر بیان می شود :

$$D=NSD*T^{0.11} *N^{0.24}$$

که در آن  $D$  = دز پرتوی بر حسب راد برای بافت سالم

$NSD$  = ثابت تناسب بر حسب Rat (معادل راد در پرتودرمانی)

$T$  = زمان بر حسب روز

$N$  = تعداد جلسات است.

باید تاکید کرد که معادله مذکور بر اساس مقادیر مشاهده شده در پوست می باشد و ممکن است مقادیر متفاوتی برای بافتهای دیگر داشته باشد . همچنین برای تصحیح اندازه میدان فاکتوری در معادله پیش بینی نشده است که جزء نقایص عمده معادله محسوب می شود زیرا به خوبی شناخته شده است که تحمل پرتوی بافت با افزایش حجم درمانی تخفیف می یابد . با این مفهوم NSD تعیین عملی خود را در پرتودرمانی بالینی دارد و از آن می توان برای مقایسه دو رژیم درمانی با دز کل ، زمان کل و تعداد جلسات مختلف استفاده کرد .

همچنین برای ارزیابی مقدار پرتوی که می تواند بعد از فواصل درمانی یا بعد از یک دوره درمانی که در آن دز پرتوی کمتر از حد تحمل پرتوی بوده باشد ، استفاده می شود .

دز کنترل تومور:

دز پرتوی لازم برای کنترل موضعی تومور به دز کنترل تومور (TCD) معروف است .

**TCD** به عوامل زیر بستگی دارد:

نوع بافتی تومور

اندازه : تومورهای بزرگ تمایل به داشتن TCD بالاتری نسبت به تومورهای کوچک دارند، زیرا که دارای سلول های بیشتری هستند .

تغذیه خونی : اگر تغذیه خونی یک تومور ناکافی باشد سلول های هیپوکسیک داشته و بالطبع در برابر پرتو درمانی نسبتاً مقاوم خواهند بود .

تقسیم بندی دز - زمان ، TCD با افزایش زمان درمان و جلسات پرتو درمانی افزایش می یابد .

تکنیک های معمول پرتو درمانی

روشها و تکنیک های درمانی باید دز کافی به تومور رسانیده و حداقل پرتو به بافت های سالم اطراف تابیده شود .

تکنیک تک میدانی:

در این روش باریکه پرتوی توسط یک میدان عمود بر سطح پوست به بدن تابانیده می شود. تکنیک مذکور برای تومورهای پوستی و تومورهایی که در نواحی سطح بدن قرار گرفته اند به کار می رود و نیز به عنوان مسکن با دز پایین کاربرد دارد. به عنوان مثال در درمان متاستازهای نخاعی کانسر پستان مورد استفاده می باشد .

عیب عمده تکنیک فوق استفاده از دزهای بالا است که باعث رسیدن دز زیاد به پوست و بافتهای زیر جلدی می شود .

تکنیک دو میدانی موازی متقابل :

رایج ترین روش در پرتو درمانی به علت راحتی و دقت کافی می باشد. در این تکنیک تومور بین دو میدان متقابل قرار می گیرد. تومورهای قفسه سینه و شکم با میادین موازی متقابل خلفی - قدامی و تومورهای سر و گردن با میادین موازی متقابل طرفی درمان می شوند .

عیب عمده تکنیک در اعمال دزهای بالا ظاهر می شود که در این مورد دز ساختارهای سطحی نظیر بافت زیر جلدی بالا است . با استفاده از دستگاههای پرتوژی و اعمال هر دو میدان در هر جلسه درمانی دز سطحی تخفیف می یابد .

تکنیک چند میدانی :

در این تکنیک تومور با سه یا چهار میدان درمان می شود . در مواردی که اعمال دز های بالا برای مقاصد درمانی به تومورهای عمیق همراه با ساختارهای حساس پرتوی در حجم درمانی مورد نیاز باشد ، مفید می باشد .

عیب عمده آن از آنجا ناشی می شود که چون میادین متعدددند احتمال بروز خطا بالاست و همچنین تنظیم و اعمال زمان درمان نیز در مقایسه با تکنیک های ساده تر مشکل تر است .

تکنیک میدان کوچک شونده :

در مواردی که بایستی دز های بالا به تومورهای با حساسیت پرتوی متوسطی داده شوند ، از تکنیک مذکور استفاده می شود . در تکنیک میدان کوچک شونده که می تواند با هر کدام از تکنیک های دیگر ترکیب شود ، اندازه میداین درمان زمانی که دز کافی به توده اصلی تومورال داده شد ، کاهش می یابد . بدین طریق بخش مرکزی تومور که از مقاومت پرتوی بالاتری برخوردار بوده و بیشترین تعداد سلول بدخیم را دارا است حداکثر دز را دریافت می کند در حالیکه میزان حجم پرتو دیده از بافت سالم حداقل خواهد بود .

عللی که منجر به ناموفق بودن روش درمانی می شوند :

نا موفق بودن درمان عبارت است از رشد دوباره تومور در ناحیه پرتودرمانی شده و یا بروز یک مشکل درمانی حاد می باشد . علل عمده عبارتند از :

خطاهای تکنیکی :

ممکن است بخش هایی از تومور خارج از میداین پرتوی قرار گیرند که در این صورت بخش هایی از تومور دز کمتر از حد لازم دریافت می کنند ( نقاط سرد ) و بعدا دوباره عود خواهند کرد . این مورد از شایعترین مشکلات تکنیک های درمانی چند میدانی محسوب می شود . در مقابل نواحی هم دز بالاتری دریافت می کنند ( نقاط داغ ) که گاهی به علت رویهم افتادگی میداین در تکنیک های چند میدانی است و در آن بخشی از حجم درمانی دز بیشتری دریافت می کند .

گاهی رسیدن دز بیشتر به اعضای حساس به پرتو در حجم درمان نیز دیده می شود . تومور دز زیاد باعث مشکلاتی می شود . تومور دز کم باعث عود موضعی تومور می شود .

مقاومت پرتوی :

بافت تومورال جزو بافت های مقاوم به پرتو بوده است .

وسعت اولیه تومور :

عود موضعی از معمول ترین موارد برای تومورهای بزرگی است که دارای سلول های تومورال هیپوکسیک فراوان می باشند . بایستی گفت که وجود متاستاز های شناخته شده ناحیه ای نیز در ناموفق بودن درمان دخیل هستند .

تومور جدید :

در برخی از بیماران ظهور تومور دیگری در ناحیه پرتودرمانی شده باعث عدم موفقیت در درمان موضعی می شود .

موارد ناشناخته :

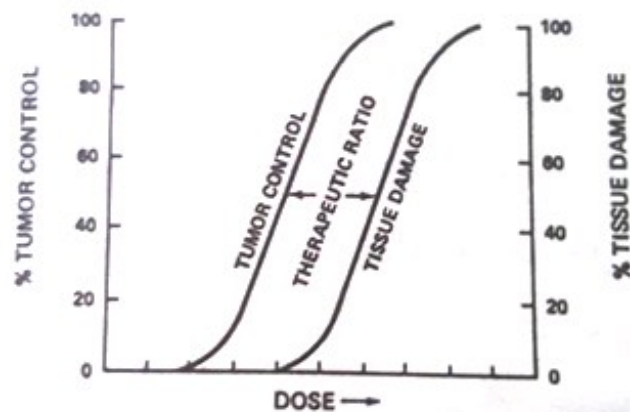
در بسیاری از بیماران توضیحی برای عود موضعی تومور یا مشکلات بعدی وجود ندارد .

متاستاز دور دست :

عدم موفقیت درمان در بسیاری از بیماران به علت رشد متاستاز دوردست حتی بعد از کنترل موضعی تومور حاصل می شود . این مورد از اهمیت کمتری نسبت به موارد دیگر در پرتو درمانی موضعی تومور برخوردار است .

نسبت درمانی در پرتو درمانی :

نسبت درمانی ، نسبتی بین میزان کنترل تومور و میزان بروز مشکلات درمانی می باشد . چنانچه از شکل زیر ملاحظه می شود نرخ های کنترل تومور و مشکلات بعدی را می توان به شکل منحنی های واکنش سیگموئیدی ( S شکل ) رسم کرد . هدف از پرتودرمانی افزایش میزان درمانی با افزودن بهره کنترل تومور بدون افزودن بر میزان سایر مشکلات جانبی می باشد .



شکل ۱-۱۰: نمایش مفهوم نسبت درمانی

روش های افزایش نسبت درمانی

۱. تقسیم بندی دوز درمانی :

با تقسیم بندی دوز درمانی به بافت های سالم اجازه ترمیم داده و بر نرخ کنترل تومور می افزاییم .

۲. تکنیک میدان کوچک شونده :

با این تکنیک بیشترین دوز به مقاومترین بخش تومور داده میشود و به دوز رسیده به بافت سالم به حداقل می رسد .

۳- ترکیب پرتودرمانی و جراحی :

دلیل ترکیب جراحی و پرتودرمانی آنست که استفاده از دز تعدیل شده پرتوی باقیمانده های میکروسکوپی کنسر را که خارج از میدان جراحی باشند را حذف خواهد کرد در حالی که جراحی توده مرکزی نسبتا مقاوم به تومور را برخواهد داشت . می توان پرتودرمانی را قبل از جراحی یا متعاقب آن انجام داد. از لحاظ تئوری پرتودرمانی قبل از جراحی مناسب تر است زیرا :

الف) سلول های تومورالی که موقع جراحی به جریان خون وارد میشوند زنده نخواهند بود .

ب) مقدار توموری که با جراحی برداشته می شود حجم زیادی نداشته و در نتیجه احتمال باقی ماندن سلول های تومورال در درون زخم کاهش می یابد . از طرف دیگر پرتودرمانی بعد از جراحی :

الف) به متخصص پاتولوژی اجازه می دهد که تومور پرتوندیده را ارزیابی کند و بالطبع اطلاع دقیقتری در دست داشته باشد .

ب) بسته به یافته های پاتولوژیک شاید برخی از بیماران نیاز به پرتودرمانی نداشته باشند .

۴- داروهای حساس کننده پرتوی :

داروهای گروه نیتروایمیدازول نظیر مترونیدازول و میزونیدازول قادرند که سلول ها را به پرتو حساس کنند ولی بر روی سلولهای تومورالی که از اکسیژنازی مناسبی برخوردارند موثر نمی باشد .

بنابراین داروهای مذکور در پرتودرمانی بالینی بعنوان یک روش افزایش بهره درمانی بکار می روند و اینکار را با حساس کردن سلولهای هایپوکسیک و بالطبع افزایش کنترل تومور بدون افزایش سایر مشکلات جانبی انجام می دهند .

۵- داروهای محافظت کننده پرتوی- تیوفسفات مشتق شده از سیستمین در پرتو درمانی بالینی می تواند مفید واقع شود . مطالعات اولیه نشان داده اند که این دارو قادر به حفاظت بافت نرمال که دارای تغذیه خونی مناسب باشد ، است در حالیکه سلولهای تومورال که تغذیه خونی نامناسبی دارند مورد محافظت قرار نخواهند گرفت . بنابراین داروی مذکور بهره درمانی را با کاستن از مشکلات بعدی افزایش خواهد داد .

۶- اکسیژن پرفشار \_ میزان درمان برخی از تومورها را میتوان با قراردادن بیمار در یک اتاقک اکسیژن پرفشار در طی پرتو درمانی افزایش داد . بنابراین بیمار در فشار اکسیژن سه یا چهار برابر اتمسفر تحت درمان قرار میگیرد .

از لحاظ تئوری ، این عمل اکسیژناسیون سلولهای هیپوکسیک تومور را افزوده و آنها را به پرتو حساستر میکند . مرکز تحقیقات پزشکی انگلستان مطالعات خود را در این زمینه تکمیل کرده و نشان داده است که کنترل موضعی تومور و میزان بقای بیمار برای بیماران با کانسره های سرو گردن و سرویکس که در اتاقک اکسیژن پرفشار مداوا شده اند در مقایسه با آنهایی که تنها تحت پرتو درمانی قرار گرفته اند ، افزایش داشته است .

۷. پرتوهای با LET بالا - درمان بانوترون های سریع و پرتوهای ایکس یا نوترون های سریع و پرتوهای گاما نسبت درمانی را با افزودن میزان کنترل تومور و نتیجه تاثیر بر روی سلولهای هیپوکسیک افزایش میدهد . سلولهای هیپوکسیک زمانی که با نوترونها تحت درمان قرار میگیرند به اندازه سلولهای اکسیژنه شده محافظت نمیشوند . اکنون تجربیات بالینی در مراکز تحقیقاتی ایالات متحده در زمینه ارزیابی اثرباث درمان با نوترونها در حال انجام است .

۸. ترکیب شیمی درمانی و پرتو درمانی- مطالعات در زمینه ارزیابی تاثیر ترکیب مواد شیمی درمانی و پرتو درمانی بر روی تومورها و بافت سالم در حال انجام هستند . متأسفانه اکثر مواد شیمی درمانی در ترکیب پرتو درمانی شدت واکنش های بافت سالم را افزایش میدهند طوری که نسبت درمانی افزایش نمی یابد . آنچه مورد نیاز است ماده ای میباشد که بطور سینرژیک (تقویتی) همراه با پرتو درمانی عمل کند طوری که تاثیر خالص بر روی سلولهای تومورال تاثیر کشتار بزرگتری از مجموع دو ماده باشد . موفقیت در درمان توام و جراحی قبلا در تومورهای اطفال به اثبات رسیده است و احتمال دارد که موفقیت های بیشتری در آینده با عرضه مواد شیمی درمانی جدید دیده شوند .

۹. هیپر ترمی و پرتو درمانی - بطور تجربی نشان داده شده است که افزودن حرارت میزان ضایعه پرتوی را بر روی هردو بافت سالم و تومورال افزایش میدهد . مطالعات بالینی پیگیری برای ارزیابی میزان اثرات هاپرترمی در درمان کانسر به تنهایی و یا توام با پرتو درمانی در حال انجام می باشند .

تکنیک هایی برای هاپترتری تمامی بدن در دست بررسی هستند ولی در حال حاضر برای استفاده در پرتو درمانی ، هاپترتری به صورت موضعی استفاده میشود . تومور با استفاده از دستگاه های خاص مولد حرارت تا ۴۱,۵ تا ۴۶,۵ درجه سانتی گراد گرم می شود و در این حرارت حداقل نیم ساعت قرار می گیرد .

حرارت را می توان با امواج میکروویو ، دیاترمی ، موج کوتاه ، جریان محرک رادیوفرکانسی ، امواج ماوراء صوت یا حمامهای آب گرم ایجاد کرد .

حرارت در افزایش کشتار سلولی زمانیکه قبل ، طی یا متعاقب پرتودرمانی اعمال شود موثر است . با اینحال هنوز اینکه هیپرترمی نسبت درمانی تومور را افزایش می دهد یا نه بطور قطعی مشخص نشده است .

#### ارزیابی نتایج درمانی :

در ارزیابی نتایج درمانی درمان موضعی در روشهایی نظیر پرتودرمانی عوامل متعددی بایستی مد نظر قرار گیرد :

#### نرخ بقا :

در اکثر تومورها نرخ بقا پنج ساله مدت زمان استاندارد ارزیابی نتایج درمانی می باشد. نرخ بقا ۵ ساله عبارت است از درصد تعداد کل بیماران مداوا شده برای یک تومور خاص که بعد از اتمام دوره درمان به مدت ۵ سال زنده مانده اند . در برخی از تومورها که سابقه رشد طبیعی طولانی تری دارند، نظیر کانسر پستان یا پروستات ، نرخ بقای ده ساله مناسبتر است. برای تومورهای سریع رشدی نظیر کانسر ریه نرخ بقا دو ساله نقطه پایان معمولی است .

#### کنترل تومور :

نکته مهم دیگر نرخ کنترل تومور در حجم درمانی می باشد . نرخ کنترل تومور درصد تعداد کل مداوا شده ها است که در آنها بیماری در محدوده حجم درمان برای مدت زمان خاصی مثلا ۲/۵ یا ۱۰ سال بعد از درمان کنترل شده است .

برای درمان پرتوی موضعی نرخ کنترل تومور معنی دار تر از نرخ بقا می باشد . زیرا که اغلب بیمارانی که تحت کنترل حجم درمان قرار می گیرند به علت متاستازهای دوردست می میرند . در این شرایط با وجود موفقیت در درمان موضعی ، درمان متاستاز دوردست ناموفق می باشد .

#### میزان بروز مشکلات بعدی :

میزان بروز مشکلات بعدی عبارت است از درصد تعداد کل بیماران پرتودیده که مشکلات درمانی چشمگیری در مدت زمان خاصی بعد از درمان (۲ یا ۵ سال بعد) نشان می دهند .



این یافته از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا که یک تکنیک درمان موفق دارای میزان بروز مشکلات بعدی اندکی ( ۵ تا ۱۰ درصد) خواهد بود .

#### نقش پرتو درمانی در درمان سرطانهای مختلف

در ذیل به نقش پرتو درمانی در درمان سرطانهای مختلف بدن به تفکیک می پردازیم .

۱- سرطانهای سر و گردن : نقش پرتودرمانی در سرطانهای سر و گردن بعنوان درمان قطعی یا پس از جراحی بسیار پررنگ است . در تومورهای هایپو فارنکس ، نازوفارنکس ، سوپراگلوت و ... درمان رادیوتراپی ، درمان قطعی است و در سرطانهای زبان ، حفره دهان و مغز بعنوان درمان اصلی اجوانت در اغلب موارد بکار می رود .

۲- سرطان پستان : اکثر مبتلایان به سرطان پستان ( بعنوان شایعترین سرطان زنان ) به رادیوتراپی بعنوان بخشی از درمان پس از جراحی نیاز پیدا می کنند . در عین حال مبتلایانی که تحت جراحی فقط پستان قرار می گیرند نیاز قطعی به رادیوتراپی ادجوانت دارند .

۳- سرطان های دستگاه گوارش : در سرطان های مری و رکتوم رادیوتراپی و شیمی درمانی همزمان با آن بعنوان درمان نئوادجوانت یا درمان قطعی و در سرطان معده و یا پانکراس بعنوان درمان ادجوانت بکار می رود .

۴- سرطان های زنان : بعنوان درمان قطعی ، از رادیوتراپی در سرطان سرویکس در مراحل موضعی پیشرفته یا درمان ادجوانت در موارد ابتدایی استفاده می شود . در سرطانهای رحم نقش آن بعنوان درمان ادجوانت قطعی است .

۵- سرطان پروستات : در حال حاضر رادیوتراپی بعنوان درمان قطعی سرطان پروستات پیشرفته شناخته می شود و در برخی موارد سرطانهای اولیه و عود می توان از آن بجای جراحی های رادیکال و پر عارضه در افراد مسن استفاده کرد .

۶- سرطان ریه : رادیوتراپی به عنوان درمان نئوادجوانت یا ادجوانت در مراحل پیشرفته بکار می رود .

۷- لنفوم ها : در اغلب موارد بیماری هوچکین از این درمان استفاده می شود . در موارد لنفوم غیر هوچکین هم رادیوتراپی پس از شیمی درمانی درمان اصلی در مراحل اولیه است .

۸- تومورهای خوش خیم : رادیوتراپی بعنوان درمان اصلی یا ادجوانت در موارد خوش خیم مثل آدنوم های هیپوفیز و مننژیوم مغزی بکار می رود .

### منابع انرژی در پرتودرمانی خارجی

منابع پرتودهی مورد استفاده در رادیوتراپی خارجی ممکن است شامل انواع زیر باشد :

#### اشعه گاما یا X

این پرتوها از نوع تشعشع الکترومغناطیس محسوب می‌شوند ، ولی طریقه تولید آن‌ها متفاوت است . پرتوهای X به وسیله دستگاهی به نام شتاب دهنده خطی تولید می‌شوند . پرتوهای با انرژی پایین در تخریب سلول‌های سرطانی سطحی و پرتوهای با انرژی بالاتر در درمان تومورهای عمقی تر بکار می‌روند . پرتوهای X می‌توانند یک ناحیه بزرگ را مورد تشعشع قرار دهند . پرتوهای گاما از رادیو ایزوتوپهایی مثل ایریدیم Ir و CO60 منتشر می‌شوند . هر عنصر در یک زمان خاص واپاشی و میزان متفاوتی از انرژی را آزاد می‌کند که بر نفوذ آن به داخل بدن مؤثر است . در واپاشی کبالت پرتو گاما منتشر می‌شود که در درمان با Gamma Knife نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد .

#### تشعشعات ذره‌ای ( Particle beams )

در این روش از ذرات هسته‌ای پر انرژی به جای فوتون استفاده می‌شود . این روش درمانی ، رادیوتراپی ذره‌ای یا تشعشع ذره‌ای نامیده می‌شود . تشعشعات ذره‌ای به وسیله شتاب دهنده‌های خطی ، سنکروترون و سیکلوترون تولید می‌شود . ذرات شتابدار عبارتند از : الکترون که به وسیله تیوب اشعه X تولید می‌شود ، نوترون‌ها که به وسیله عناصر رادیواکتیو و تجهیزات مخصوص تولید می‌شوند . یون‌های سنگین مثل پروتون‌ها ، هلیوم و ذرات باردار کوچک یعنی مزون که به وسیله شتابدهنده و یک سیستم مغناطیسی تولید می‌شوند . برخلاف پرتوهای ایکس و گاما ، پرتوهای ذره‌ای قدرت نفوذ کم دارند . بنابراین از این پرتوها معمولاً برای درمان تومورهای سطحی یا زیر جلدی استفاده می‌شود .

#### درمان با پرتو پروتون ( Proton beam therapy )

در این روش از پرتوهای پروتونی استفاده می‌شود که انرژی خود را در یک ناحیه کوچک ( Bragg Peak ) از دست می‌دهند . در این ناحیه دزهای بالا بر روی تومور با حداقل آسیب به بافت‌های نرمال متمرکز می‌شود . پروتون درمانی فعلاً در مراکز محدودی در ایالات متحده استفاده می‌شود . این شیوه برای درمان تومورهایی که عمل جراحی مشکل یا پر مخاطره است به کار می‌رود . تحقیقات کلینیکی برای استفاده از این روش در درمان ملانومای چشم ، Retinoblastoma ( یک نوع تومور چشمی که بیشتر در اطفال زیر ۵ سال اتفاق می‌افتد ) ، سارکومای عضلات مخطط ، برخی انواع تومورهای سر و گردن ، پروستات ، مغز و ریه در حال انجام است .

#### درمان با پرتو کربن ( Carbon Beam Therapy )

در این روش از پرتوهای یون‌های کربن استفاده می‌شود که انرژی خود را در یک ناحیه کوچک ( Bragg Peak ) همانند پروتون از دست می‌دهند ، و حداقل آسیب به بافت‌های سالم را در پی خواهد داشت . به علت هزینه بالای

شتاب دهنده‌های تولیدکننده یون‌های کربن با سرعت بالا ، به کارگیری این روش درمانی با محدودیت زیادی روبرو است .

منابع انرژی مورد استفاده در پرتو درمانی داخلی

منابع تشعشع مورد استفاده در رادیوتراپی داخلی عبارتند از : ایزوتوپ‌های رادیواکتیو مانند (I131) و Sr89 ، فسفر ، palladium ، سزیم ، ایریدیوم ، فسفات یا کبالت ، منابع دیگری هم در دست بررسی هستند .

### Stereo Tactic Radiosurgery

در این روش از یک دوز بالا برای تخریب بافت تومورال در مغز استفاده می‌شود . سر بیمار در یک قالب مخصوص که به مجموعه متصل است قرار می‌گیرد . از قالب به منظور تابش به خط مستقیم به تومور سر بیمار استفاده می‌شود . تابش دقیقاً در ناحیه مورد نظر خواهد بود. این روش بافت‌های اطراف تومور عموماً از آسیب در امان خواهند ماند . این شیوه به سه صورت انجام می‌گیرد : روش متداول استفاده از فوتون‌های با انرژی زیاد شتاب دهنده خطی که Linac-based stereo tactic RT نامیده می‌شود . در دومین روش از پرتوی گامای CO60 و در روش سوم از پرتوهای ذرات باردار سنگین مثل پروتون‌ها و یون‌های هلیوم Stereo Tactic استفاده می‌شود . این روش اکثراً در درمان تومورهای کوچک خوش خیم یا بد خیم مغز مثل مننژیوما ، و تومور هیپوفیز همچنین در درمان بیماری‌های دیگر مثل پارکینسون ، صرع ، تومورهای متاستاتیک مغز ( تومورهایی که از قسمت‌های دیگر بدن انتشار یافته‌اند ) ، به صورت منفرد یا همراه با رادیوتراپی تمام مغز مورد استفاده قرار می‌گیرند .

### Stereo tactic Radiotherapy

در این روش از همان شیوه مورد استفاده در روش‌های قبل ولی با دوزهای پایین در تعداد جلسات متعدد استفاده می‌شود . دزهای کم و تعداد جلسات زیاد نتیجه را بهبود بخشیده ، عوارض اشعه را به حداقل می‌رساند . این روش برای درمان تومورهای مغزی با همان روشی که در قسمت‌های دیگر بدن بکار می‌رود ، استفاده می‌شود . در تحقیقات بالینی سودمندی این دو شیوه به صورت منفرد یا همراه با دیگر روش‌های پرتو درمانی در حال بررسی است .

اندازه‌گیری دوز تشعشع

مقدار انرژی جذب شده در واحد جرم ماده دز جذبی یا دوز تشعشع نامیده می‌شود . تا قبل از سال ۱۹۸۵ واحد دز جذبی ، راد ( rad ) بود . امروزه از واحد گری ( Gy ) استفاده می‌شود . یک‌گری برابر با 100 rad است (  $1\text{cGy} = 1\text{rad}$  ) . دوز قابل تحمل بافت‌های مختلف متفاوت است . برای مثال کبد می‌تواند یک دز مجموع 3000 cGy را تحمل کند در صورتی که کلیه‌ها قدرت تحمل 1800 cGy را دارند . دز مجموع معمولاً به دزهای کوچک‌تر در تعداد

جلسات معین که به صورت روزانه داده می‌شود ، تقسیم می‌شود . این روش باعث افزایش تخریب سلول‌های سرطانی با حداقل آسیب به بافت سالم می‌شود . برای نشان دادن میزان آسیب سلول‌های سرطانی در مقایسه با سلول‌های سالم از یک ضریب به نام نسبت درمانی ( Therapeutic Ratio ) استفاده می‌شود .

### پرتوهای Low LET و پرتوهای High LET

LET معرف میزان انرژی به جا مانده از پرتو در هنگام عبور از بافت است. با جذب انرژی بیشتر ، سلول‌های بیشتری از بین می‌روند . LET پرتوها متفاوت است. برای مثال پرتوهای X ، گاما و الکترون‌ها Low LET و Pions و نوترون‌ها ، یون‌های سنگین High LET می‌باشند . تحقیق و بررسی دربارهٔ پرتوهای High LET در حال انجام است . هزینه سنگین این تجهیزات و آموزش‌های تخصصی مورد نیاز ، استفاده از این پرتوها را به مراکز اندکی در ایالات متحده آمریکا محدود کرده است .

### دستگاهها و تجهیزات پرتودرمانی

پس از کشف پرتو X توسط رونتگن در سال ۱۸۹۵ ، تکنولوژی تولید پرتو X برای پرتودرمانی به وجود آمد . دستگاه‌های تولید پرتو X به مرور به سمت ایجاد باریکه ی فوتون یا الکترون با انرژی‌های بالاتر و شدت باریکه ی بیش تر حرکت کرد و در حال حاضر نیز انتقال باریکه به صورت کامپیوتری و مدوله شدید ( Intensity modulated beam ) صورت می‌گیرد . در ۵۰ سال اول پرتودرمانی ، پیشرفت تکنولوژی بسیار آهسته بود و اکثراً بر اساس تیوب پرتو X ، شتاب دهنده ی واندوگراف و بتاترون صورت می‌گرفت .

با اختراع دستگاه تله ترایی کبالت ۶۰ به همت اچ.ای. جونز در کانادا در دهه ی اول ۱۹۵۰ ، این دستگاه توانست پاسخگوی انرژی‌های بالا برای پرتودرمانی باشد و تا چندین سال دستگاه‌های تله ترایی کبالت ۶۰ در پرتودرمانی پیشتاز بودند . هم زمان ، پیشرفت شتاب دهنده‌های خطی پزشکی باعث کمرنگ شدن دستگاه‌های کبالت ۶۰ در پرتودرمانی شدند و پس از پنج نسل تکامل ، در حال حاضر یکی از مهم ترین منابع تولید پرتو در پرتودرمانی هستند . شتاب دهنده‌های خطی با طراحی فشرده و مؤثر ، با ایجاد ایزوسنتز و تأمین باریکه‌های الکترون و پرتو X مگاولتاژ در بازه ی گسترده ای از انرژی ، تطبیق پذیری بالایی برای استفاده در پرتودرمانی ایجاد کرده اند .

علاوه بر شتاب دهنده‌های خطی ، انواع دیگر شتاب دهنده‌ها نظیر میکروترون ها و بتاترون ها برای تولید باریکه ی الکترون و پرتو X برای پرتودرمانی به کار می‌روند . ذرات دیگر پر انرژی نظیر پروتون ها ، نوترون ها و یون‌های سنگین و مزون‌های پی منفی همگی بر پایه شتاب دهنده‌های مخصوصی ایجاد شده و برخی از آن‌ها در پرتودرمانی استفاده می‌شوند ؛ گر چه اغلب روش‌های پرتودرمانی از طریق شتاب دهنده‌های خطی یا دستگاه‌های تله ترایی کبالت اجرا می‌شوند .

### دستگاه‌های تله تراپی

دستگاه‌های درمان که از چشمه‌های پرتو گاما برای پرتودرمانی خارجی استفاده می‌کنند، دستگاه تله تراپی نامیده می‌شوند. نحوه‌ی ساخت این دستگاه‌ها اغلب ایزوسنتریک است که در آن باریکه با چرخش به دور بیمار بر روی محور در فاصله‌ی مشخص تا چشمه مکان ایزوسنتر را ایجاد می‌کند. دستگاه‌های تله تراپی جدید فاصله‌ی محور تا چشمه ۸۰ یا ۱۰۰ cm دارند.

### اجزای اصلی دستگاه‌های تله تراپی عبارت‌اند از:

چشمه‌ی رادیواکتیو، محفظه‌ی چشمه به همراه کلیماتور باریکه و سیستم حرکت دهنده‌ی چشمه، گانتری و پایه در دستگاه‌هایی که بصورت ایزوسنتریک کار می‌کنند، قسمت نگهدارنده بیمار و کنسول دستگاه.

### چشمه‌های تله تراپی

رایجترین چشمه مورد استفاده در تله تراپی، رادیونوکلید کبالت ۶۰ است که در کپسول‌های استنلس استیل به شکل استوانه‌ای محکم و درزبندی شده‌اند. برای جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو، کپسول‌ها به صورت دو لایه‌ای مهر و موم شده‌اند. نکات مهم در مورد چشمه‌های مورد استفاده در دستگاه‌های تله تراپی عبارت‌اند از:

۱ - برای این که انتقال چشمه‌ها از دستگاه تله تراپی به دستگاه دیگر یا از سیستم تولیدکننده‌ی چشمه به سیستم تولیدکننده‌ی دیگر آسان تر باشد، کپسول‌های چشمه به صورت استاندارد ساخته می‌شوند.

۲ - قطر استوانه‌ی چشمه بین ۱ تا ۲ سانتیمتر و طول آن حدود ۲/۵ سانتیمتر است. هر چه قطر چشمه کم تر باشد، نیم سایه‌ی فیزیکی آن کوچک تر بوده و گران تر است. معمولاً قطر چشمه ۱/۵ سانتیمتر انتخاب می‌شود که قیمت و نیم سایه‌ی ایجاد شده با هم قابل مقایسه است.

۳ - اکتیویته‌ی چشمه‌ها بین ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ Ci است که آهنگ دز ۱۰۰ - ۲۰۰ cGy/min را در فاصله‌ی ۸۰ سانتیمتر از چشمه‌ی تله تراپی ایجاد می‌کند. معمولاً خروجی دستگاه تله تراپی به صورت رونتگن بر دقیقه در ۵ متر محاسبه می‌شود.

۴ - چشمه‌های تله تراپی بعد از نیمه عمر تعویض می‌شوند؛ ولی گاهی اوقات به دلیل ملاحظات اقتصادی زمان طولانی تری استفاده می‌شوند.

۵ - رادیونوکلید کبالت ۶۰ نیمه عمر ۵/۲۶ سال دارد که با واپاشی  $\beta$  و انرژی ۳۲۰ Kev به هسته‌ی دختر نیکل ۶۰ منجر شده که این هسته‌ی دختر دو پرتو گاما با انرژیهای ۱.۱۷ و ۱.۳۳ Mev ساطع کرده و به حالت پایدار می‌رسد.

رسد . پرتو گاما برای درمان استفاده شده و الکترون ها درون چشمه ی کبالت یا کپسول جذب می شوند . پرتو X برمشتراولونگ و مشخصه ی تولید شده بسیار کم بوده و قابل صرف نظر کردن است .

محفظه ی چشمه های تله تراپی

محفظه ی چشمه های تله تراپی سرچشمه ( Source Head ) نامیده می شود و شامل حفاظ استیل و سرب است که برای حفاظت در برابر پرتو بوده ، هم چنین مکانیسمی برای جابه جا کردن چشمه و باز کردن کلیماتور دارد که پرتو گاما را به صورت باریکه ی درمانی در می آورد .

نکات مهم در این رابطه به قرار ذیل هستند:

۱ - در حال حاضر دو روش برای حرکت چشمه از حالت خاموشی باریکه به حالت روشن شدن باریکه وجود دارند که عبارت اند از :

□ - چشمه در سیلندر چرخان قرار دارد ،

□ - چشمه بر روی کشوی لغزنده قرار دارد.

در هر دو روش حالت ایمن برای قطع باریکه هنگام اختلال در قدرت یا موارد اورژانس وجود دارد.

۲ - هنگامی که چشمه در حالت خاموشی باریکه قرار دارد منبع نوری در مکان چشمه در بالای کلیماتور ظاهر می شود که امکان دید میدان پرتوها را فراهم می کند که می توان اندازه ی آن را با کلیماتورها و بلوک های حفاظتی مخصوص تغییر داد.

۳ - همیشه امکان فرار پرتو و نشتی دستگاه هنگام خاموشی وجود دارد . نشتی دستگاه باید کم تر از  $1 \text{ mR/h}$  (  $0.01 \text{ MSv/h}$  ) در فاصله ی ۱ متری از چشمه باشد . قوانین بین المللی نشتی دستگاه های تله تراپی را کم تر از  $2 \text{ mR/h}$  (  $0.02 \text{ MSv/h}$  ) در فاصله ی ۱ متری از چشمه تعیین کرده است .

شتاب دهنده های ذرات

انواع گوناگونی از شتاب دهنده ها در تحقیقات پایه ای هسته ای و فیزیک ذرات انرژی بالا ساخته شده است و برخی از آن ها نیز برای استفاده در پرتودرمانی با عملکرد محدود طراحی و ساخته شده است . صرف نظر از نوع شتاب دهنده ها دو شرط اولیه در تمام شتاب دهنده های ذرات باید تأمین شوند که عبارت اند از:

• ذره ای که شتاب داده می شود باید باردار شود ،

• در مسیر شتاب دهی ذرات باید میدان الکتریکی وجود داشته باشد .

تفاوت شتاب دهنده ها در نحوه ی ایجاد میدان الکتریکی شتاب دهنده و چگونگی عملکرد میدان بر روی ذرات برای شتاب دادن به آن ها است . دو نوع میدان الکتریکی برای شتاب دادن به ذرات وجود دارد که عبارت اند از :  
الکتروستاتیک و تناوبی ( Cyclic ) .

□ - در شتاب دهنده های الکتروستاتیک ذرات از طریق میدان الکتریکی و به وسیله ی اختلاف ولتاژ ثابت در طول زمان شتاب داده می شوند. مقدار اختلاف ولتاژ با توجه به شتاب نهایی ذرات تنظیم می شود . از آن جایی که میدان الکتروستاتیک ثابت است ، انرژی جنبشی ذرات به نقطه ی شروع حرکت و انتهای آن بستگی داشته و نمی تواند بیش از ولتاژی باشد که دستگاه آن را تأمین کرده است . انرژی که شتاب دهنده های الکتروستاتیک تأمین می کنند به دلیل دشارژی که در ترمینال ولتاژهای بالا و دیواره های اتاقک شتاب دهنده اتفاق می افتد و ناشی از افت ولتاژ حاصل از مقدار بحرانی ( 1 MV ) است ، محدود می شود .

□ - در شتاب دهنده های تناوبی میدان الکتریکی متغیر است که به همراه میدان مغناطیسی متغیر ایجاد می شود و در مسیری که نزدیک به مسیر ذرات است شتاب پیدا می کنند. اگر ذرات در این مسیر بسته ، به دفعات زیاد حرکت کنند شتاب به دست آمده بالا بوده و با ولتاژ میدان محدود نمی شود . بنابراین انرژی جنبشی نهایی ذرات بر اثر فرستادن ذرات باردار با انرژی جنبشی غیرصفر در این میدان به دست می آید که هر بار چرخش ذره در این مسیر بسته به انرژی آن می افزاید .

مثالی از شتاب دهنده های الکتروستاتیک که در پزشکی استفاده می شوند ، تیوب های پرتو X اورتوولتاژ سطحی و هم چنین ژنراتورهای نوترون هستند . مثال معروف شتاب دهنده های تناوبی ، شتاب دهنده های خطی است . میکروترون ها ، بتاترون ها و سیکلوترون ها نیز از نوع شتاب دهنده های تناوبی هستند .

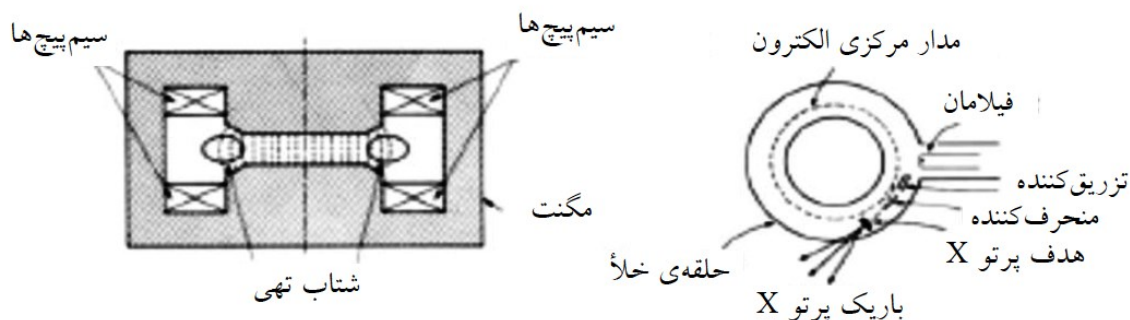
#### بتاترون

بتاترون در سال ۵۸۴۰ به همت دی . دبلیو . کرسنت به منزله ی شتاب دهنده ی تناوبی الکترون برای تحقیقات پایه ای فیزیک ساخته شد و پتانسیل آن برای استفاده در پرتودرمانی بلافاصله شناخته شد . نکات مهم در مورد این شتاب دهنده ها عبارت اند از :

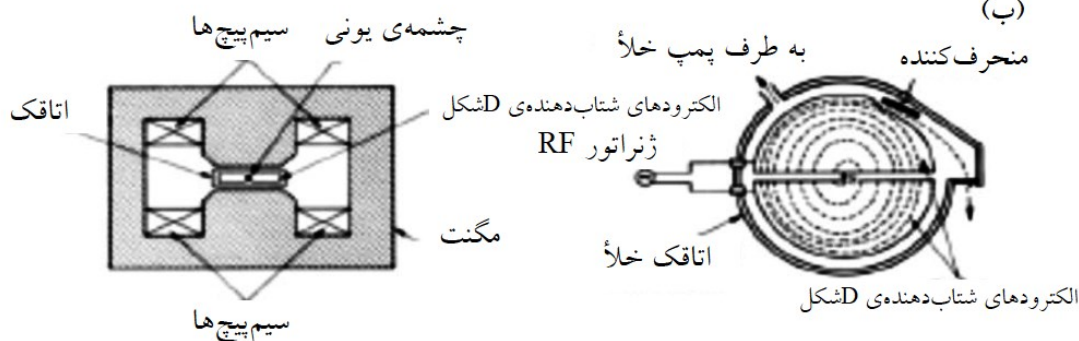
• این دستگاه شامل تغذیه ی مغناطیسی از طریق جریان متناوب با فرکانس بین 50 و 200 Hz است . الکترون ها در مسیر چنبره ای - حلقه ای در اتاقک خلأ گردش می کنند ، که این اتاقک در فضای خالی بین دو قطب مغناطیسی قرار دارد .

- به صورت مفهومی بتاترون را می توان مشابه ترانسفورمر فرض کرد که جریان متناوب اولیه باعث ایجاد میدان مغناطیسی شده و جریان ثانویه نیز گردش دایره ای الکترون ها در اتاقک خلأ است .
- الکترون ها در میدان الکتریکی القایی که با تغییر شار مغناطیسی ایجاد شده است ، در مسیر چنبره ای شتاب داده می شوند . الکترون ها در میدان مغناطیسی در مسیر دایره ای نگه داشته می شوند .
- در دهه ی ۱۹۵۰ بتاترون ها نقش مهمی در پرتودرمانی مگاولتاژ داشتند ؛ ولی پیشرفت شتاب دهنده های خطی آن ها را به فراموشی سپرد ، چرا که شتاب دهنده های خطی مزایای بیش تری در قبال بتاترون ها داشتند ، از جمله : خروجی باریکه ی بالا ( تا  $10 \text{ Gy/min}$  برای شتابدهنده های خطی و تا  $1 \text{ Gy/min}$  برای بتاترونها ) ، اندازه ی میدان بزرگ تر ، ایزوسنتریک کامل ، طراحی فشرده تر و عملکرد بی صداتر برای شتاب دهنده های خطی .

(الف)



(ب)



دو نوع شتاب دهنده ی تناوبی: (الف) بتاترون، (ب) سیکلوترون.

## سیکلوترون

سیکلوترون در سال ۱۹۳۰ به همت ای . او . لارنس برای شتاب دادن به یون ها برای دست یابی به انرژی چندین مگا الکترون ولت ساخته شد . در ابتدا سیکلوترون برای تحقیقات پایه ای فیزیک هسته ای ساخته شد ؛ اما بعداً در



پزشکی برای ساخت رادیوایزوتوپ ها در پزشکی هسته ای و هم چنین تولید باریکه ی پروتون و نوترون در پرتودرمانی استفاده شد .

در حال حاضر دستگاه های PET/CT اهمیت سیکلوترون ها را در پزشکی هسته ای افزایش داده اند . یکی از عملکردهای مهم دستگاه های PET/CT براساس گلوکز نشاندار شده فلوئور - ۱۸ است که از طریق سیکلوترون پروتون ساخته می شود . عملکرد سیکلوترون به صورت خلاصه به شرح ذیل است :

- در سیکلوترون ذرات در مسیر مارپیچی حرکت می کنند که این مسیر خلأ بوده و درون دو نیمه استوانه که الکترودها را تشکیل می دهند قرار دارد . ذرات از میدان مغناطیسی یکنواخت ( 1 T ) شتاب می گیرند که بین دو قطب یک مغناطیس بزرگ تشکیل شده است .

- یک ولتاژ RF با فرکانس ثابت بین 10 تا 30 MHz بین دو الکترودها ایجاد می شود و ذرات باردار هنگام عبور از شکاف شتاب می گیرند .

- درون الکترودها هیچ میدان الکتریکی وجود ندارد و جریان ذرات بر اثر میدان مغناطیسی در مسیر نیم دایره با سرعت ثابت انجام می گیرد تا این که از شکاف عبور کنند . اگر در این بین میدان الکتریکی معکوس شود ذره دوباره در مسیر شکاف شتاب پیدا می کند و مجدداً مقدار کم ی انرژی پیدا کرده و به سمت الکترودها مقابل در مسیر نیم دایره با شعاع بزرگ تر از مسیر قبلی جریان می یابد که در نتیجه مسیر مارپیچی پیدا کرده و انرژی ذره پس از تعداد زیادی عبور از شکاف افزایش قابل ملاحظه ای می یابد .

#### میکروترون

میکروترون شتاب دهنده ی الکترون است که ترکیبی از طراحی شتاب دهنده ی خطی با سیکلوترون است . ایده ی میکروترون به وی . آی وکسلر در سال ۱۹۴۴ داده شد ؛ ولی در حال حاضر در پرتودرمانی مدرن کم تر از شتاب دهنده های خطی استفاده می شود . دو نوع میکروترون ساخته شده است که عبارت اند از : حلقوی ( Circular ) و مسیر سرعت ( Racetrack ) .

- در میکروترون حلقوی الکترون انرژی خود را از طریق امواج رزونانس مایکروویو در حفره به دست می آورد و در میدان مغناطیسی یکنواخت و در مسیر دایره ای انجام می گیرد که شعاع آن افزایش می یابد . برای این که ذره با امواج مایکروویو هم فاز بماند باید ولتاژ حفره و فرکانس میدان مغناطیسی افزایش یافته و برابر با تعداد سیکل های مایکروویو باشد .

• در میکروترون نوع مسیر سرعت ، مگنت به دو قسمت D شکل در قطب ها تقسیم شده که بتواند انعطاف بیش تری در دست یابی مؤثر تزریق الکترون داشته و هم چنین بهره ی انرژی بالایی در هر چرخش به دست آورد . این خاصیت با استفاده از ساختمان شتاب دهی چندحفره ای ( Multicavity ) شبیه شتاب دهنده ی خطی به دست آمده است . هر مسیر بسته ی الکترون متشکل از دو نیم دایره و دو خط مستقیم است .

#### شتاب دهنده ی خطی

شتاب دهنده ی خطی پزشکی از نوع شتاب دهنده های تناوبی است و برای شتاب دادن به الکترون ها و رسیدن به انرژی های 4 تا 25 MeV استفاده می شود . برای شتاب دادن به ذرات ، از میدان مایکروویو RF متغیر با فرکانسی در محدوده ی  $10^3$  MHz ( باند L ) تا  $10^4$  MHz ( باند X ) استفاده می شود و اغلب در محدوده ی 2856 MHz ( باند S ) کار می کنند .

در شتاب دهنده ی خطی الکترون ها در مسیر مستقیم در لوله شتاب داده می شوند که درون آن خلأ بوده و موجبر ( Waveguide ) شتاب دهنده نامیده می شود . الکترون ها از مسیر مستقیم چندین بار عبور می کنند و به همین دلیل شتاب دهنده های خطی از نوع تناوبی هستند که مثل بتاترون ها مسیر منحنی برای ذرات ایجاد می کنند . برای شتاب دادن به ذرات از میدان RF با قدرت بالا استفاده می شود که در موجبر ایجاد شده و این میدان با استفاده از شتاب منفی الکترون ها در پتانسیل کاهشی در دستگاه مگنترون یا کلایسترون ایجاد می شود .

انواع مختلفی از شتاب دهنده های خطی در حوزه ی درمانی استفاده می شوند . برخی از آن ها فقط برای ایجاد پرتو X در محدوده ی پایین مگاولتاژ ( 4 یا 6 Mev ) استفاده می شود و برخی نیز هم پرتو X و هم باریکه ی الکترون در انرژی های مختلف مگاولتاژ تولید می کنند . شتاب دهنده های خطی مدرن انرژی بالا دو نوع فوتون با انرژی های 6 و 18 MeV و چندین انرژی برای الکترون ( 6 ، 9 ، 12 ، 16 و 22 Mev ) تولید می کنند .

#### نسل های شتاب دهنده ی خطی

در طول ۴۰ سال گذشته انواع مختلف شتاب دهنده های خطی در پنج نسل مجزا وارد حوزه ی پرتودرمانی شدند . مشخصات هر یک از این نسل ها در ذیل آمده است :

- فوتون های کم انرژی ( 4 – 8 MV ) : باریکه ی مستقیم ، فیلتر صاف کننده ی ثابت ، کلیماتور گوه ای خارجی ، کلیماتور آرواره ای متقارن ، اتاقک یونیزاسیون انتقالی منفرد و عملکرد ایزوسنتریک .
- باریکه ی فوتون های با انرژی متوسط ( 10 – 15 MV ) و باریکه ی الکترون : باریکه ی خمیده ، هدف و فیلتر صاف کننده ی متحرک ، فویل پراکنده کننده ی اتاقک یونیزاسیون دوگانه و باریکه ی الکترون مخروطی .

• فوتون های انرژی بالا ( 18 – 25 MV ) و الکترون : انرژی فوتون دوگانه و انرژی الکترون چندگانه ، مگنت خم کننده ی آکروماتیک ، فویل پراکنده کننده ی دوگانه یا باریکه ی الکترونی جاروبی ، کلیماتور گوه ای موتوریزه و کلیماتور آرواره ای غیر متقارن یا مستقل .

• فوتون ها و الکترون های با انرژی بالا : کنترل عملکرد کامپیوتری ، کلیماتور گوه ای

دینامیکی ، وسیله ی تصویربرداری الکترونیکی پورتال و کلیماتور چند برگه ای .

• فوتون ها و الکترون های با انرژی بالا : تغییر شدت باریکه بر اثر کلیماتور چند برگه ای ، انتقال دز تطبیقی (Conformal) به صورت تمام دینامیکی به وسیله ی شدت باریکه که با کلیماتور چند برگه ای تعیین می شود .

نکات ایمنی در شتاب دهنده های خطی

پیچیدگی شتاب دهنده های مدرن ایمنی عملکرد دستگاه چه از نظر بیمار و چه اپراتور توجه بیشتری را به دنبال داشته است . کمیته ی بین المللی الکتروتکنیک ، استانداردها را تا حد امکان با موافقت بین المللی آرا در موارد تکنیکی منتشر می کند . شتاب دهنده های الکترون با جزییات از طریق این کمیته ( IEC ) اشاره شده است . توضیح این کمیته در مورد ایمنی شتاب دهنده ها ( IEC 60601-2-1 ، ص ۱۳ ) به شرح ذیل است :

" استفاده از شتاب دهنده های الکترون به منظور پرتودرمانی ممکن است به دلیل نقص فنی در دستگاه برای انتقال دز یا عدم رعایت استانداردهای ایمنی مکانیکی و الکترونیکی ، بیمار را در معرض خطر قرار دهد . در صورت نقص فنی در ایجاد پرتو مناسب در این تجهیزات یا طراحی نامناسب اتاق درمان ، این تجهیزات هم چنین می توانند باعث خطر برای افرادی باشند که در مجاورت آن هستند . "

کمیته ی بین المللی الکتروتکنیک سه نوع مدرک ایمنی الکترونیکی ، مکانیکی و پرتویی را منتشر کرده است و تجهیزات اصلی مورد نیاز در مورد طراحی و ساخت شتاب دهنده های خطی مورد استفاده در پزشکی را برای کارخانه های سازنده ی شتاب دهنده ها مشخص کرده است . این مدارک نکات ایمنی پرتویی در اتاق های درمان از طریق استفاده کنندگان این دستگاه ها را پوشش می دهد .

اجزای شتاب دهنده ی خطی

عملکرد شتاب دهنده های خطی معمولاً به صورت هم مرکزی ( ایزوسنتریک ) است و سیستم کاربری آن ها در ۵ قسمت عمده و مجزای دستگاه تقسیم شده اند که عبارت اند از :

گانتري بدنه شامل ( سر دستگاه )

سيستم نگه دارنده ي گانتري

كابين مدولاتور

سيستم نگه دارنده ي بيمار ( مثل تخت بيمار )

كنسول كنترل

شكل زير در بر گيرنده ي شكل عمومي اجزاي شتاب دهنده است .

شتاب دهنده هاي مختلف تجارتي تفاوت هاي زيادي دارند كه به انرژي هاي باريكه ي الكترون و طراحي خاص سازنده ي دستگاه بستگي دارد . نكات مهم در مورد اجزاي دستگاه شتاب دهنده خطي عبارت اند از :

□ طول موجبر شتاب دهنده به انرژي هاي الكترون بستگي دارد و بين 30 cm ~ براي 4 MeV و تا حدود ~ 150 cm براي 25 MeV است.

□ اجزاي اصلي شكل دهنده ي باريكه در شتاب دهنده ي پزشكي مدرن به شش گروه تقسيم مي شوند كه عبارت اند از:

□ - سيستم تزريق

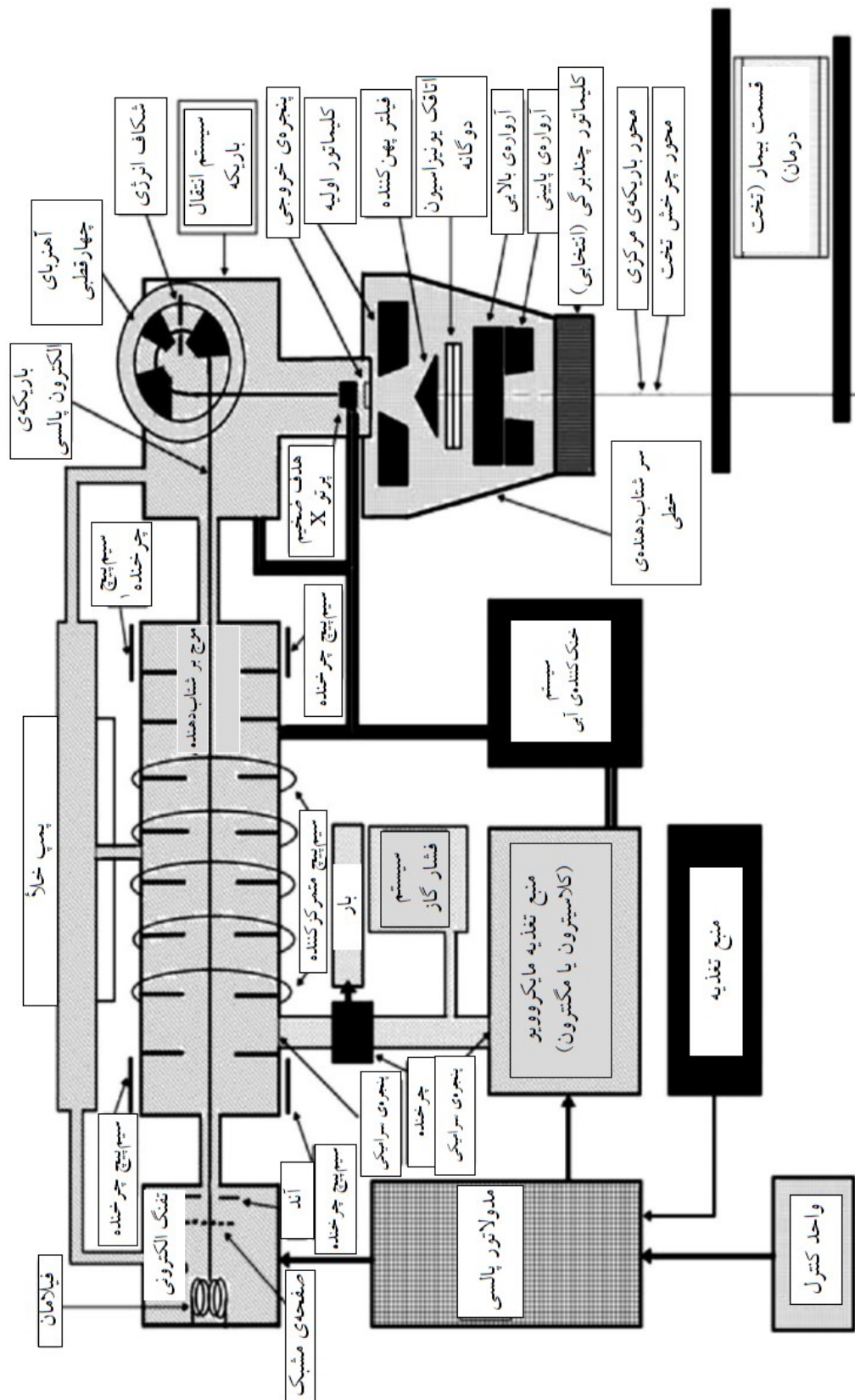
□ - سيستم توليد قدرت RF

□ - موجبر شتاب دهنده

□ - سيستم هاي جانبي

□ - سيستم انتقال باريكه

□ - متمرکز کننده ي باريكه ۵ و سيستم پايش باريكه



پرتودرمانی با پروتون، نوترون و یون های سنگین

پرتودرمانی خارجی اغلب با دستگاه هایی انجام می گیرد که باریکه ی پرتو X یا الکترون تولید می کنند . در تعداد معدودی از مراکز دنیا پرتودرمانی خارجی با ذرات سنگین تر صورت می پذیرد که عبارت اند از :

- نوترون ها که در ژنراتور نوترون یا سیکلوترون تولید می شوند ،
- پروتون ها که در سیکلوترون ها یا سنکروترون ها تولید می شوند ،
- ذرات سنگین ( هلیوم ، کربن ، نیتروژن ، آرگون ، نئون ) که در سینکروترون یا سیکلوترون ها تولید می شوند .

این ذرات مزایایی بیش از باریکه ی استاندارد پرتو X و الکترون دارند که به برخی از آن ها اشاره می شود :

- پایین بودن قابل ملاحظه ی نسبت OER ( اثر افزایش اکسیژن ) برای نوترون ها
- هیستوگرام حجمی دز ( DVH ) بهتر برای پروتون ها و یون های سنگین .

گرچه تجهیزات تولید پروتون ، نوترون و یون های سنگین در مقایسه با دستگاه های استاندارد پرتودرمانی از نظر هزینه ی دستگاه و نگه داری و سرویس آن ها بسیار بالا است ؛ اما در حال حاضر در برخی مراکز به صورت گسترده ای استفاده می شود . کاهش قیمت سیکلوترون های پروتون باعث استفاده ی بیش تر باریکه ی درمانی پروتون در آینده می شوند .

ملاحظات حفاظ سازی

پرتودرمانی باریکه ی خارجی از طریق سه نوع تجهیزات اصلی انجام می پذیرد که باریکه ی X یا الکترون تولید می کنند که عبارت اند از :

- دستگاه های پرتو X ( سطحی یا اورتوولتاژ ) ،

- دستگاه های تله ترابی کبالت - ۶۰

- شتاب دهنده ها .

تمامی تجهیزات پرتودرمانی باید در اتاق های درمان مخصوص قرار بگیرند که حفاظ سازی شده اند ، تا پرسنل و مردم عادی که در اطراف قرار دارند حفاظت شوند . اتاق های درمان نه تنها باید قوانین مربوط به بنای ساختمانی را رعایت کنند ، بلکه باید قوانین ملی و بین المللی مربوط به حفاظ سازی را برای حفاظت در برابر پرتوها اجرا کنند .

هنگام طراحی محل برای نصب دستگاه باید فیزیزیت پزشکی ضخامت حفاظ های اولیه و ثانویه را محاسبه کرده و اطلاعات لازم در مورد مهندسی ساختمان و مصالح مورد استفاده برای نقشه های ساختمانی اتاق درمان را تأمین کند . اتاق های درمان پرتو X سطحی و اورتوولتاژ به وسیله ی بتن معمولی (  $2.35 \text{ g/cm}^3$  ) یا سرب حفاظ سازی می شوند . در این محدوده ی انرژی پدیده ی فوتوالکتریک برهم کنش غالب با ماده است که باعث می شود استفاده از سرب برای حفاظ سازی مناسب باشد .

اتاق های درمان مگاولتاژ ( اغلب به نام سنگر بتونی یا گنبد نامیده می شوند که به دلیل حفاظ های بزرگ و ضخیم در این نوع از تجهیزات درمان است ) اغلب با بتن معمولی حفاظ سازی می شوند که در هزینه ی ساختمان نیز صرفه جویی می شود . در این محدوده ی انرژی اثر کامپتون برهم کنش غالب با ماده است . برای اشغال کم تر فضا می توان از مواد با چگالی بیش تر استفاده کرد ، چرا که ضخامت دیواره ی لازم با عکس چگالی ماده ی حفاظ متناسب است . بنابراین استفاده از بتن با چگالی بالا (  $5 \text{ g/cm}^3$  ) ضخامت دیواره را در قبال بتن معمولی به نصف کاهش داده ؛ ولی هزینه ی ساختمان را تا ۳۰ برابر افزایش می دهد .

#### براکی تراپی : جنبه های فیزیکی و عملی

براکی تراپی ( گاهی اوقات کوری تراپی یا اندوکوری تراپی نیز نامیده می شود ) عبارتی است که برای درمان سرطان به وسیله ی پرتوهای چشمه های کوچک رادیونوکلید به صورت کپسول از فاصله ی نزدیک استفاده می شود. این نوع درمان با جای گذاری مستقیم چشمه درون یا نزدیک حجم هدف انجام می شود. پس از آن انتقال دز به صورت پیوسته یا در یک دوره ی کوتاه ( کاشت موقت ) یا در زمان عمر چشمه تا کامل شدن واپاشی ( کاشت دائم ) صورت می گیرد . اغلب چشمه های رایج براکی تراپی گسیلنده ی فوتون هستند . گرچه در برخی شرایط خاص گسیلنده های بتا و نوترون نیز استفاده می شوند .

دو نوع اصلی از درمان براکی تراپی وجود دارد :

- درون حفره ای ، که در آن چشمه ها در حفره های بدن نزدیک به حجم تومور قرار می گیرند ،
- درون نسجی ، که در آن چشمه ها درون حجم تومور کاشته می شوند .

درمان های درون حفره ای همیشه موقتی و برای دوره ی کوتاه است در حالی که درمان های درون نسجی موقتی یا دائمی هستند . کاشت های موقتی یا به وسیله ی دستی یا به وسیله ی کنترل از راه دور پس از بارگذاری داخل می شوند . سایر شکل های درمان های براکی تراپی که کم تر معمول هستند شامل کاربردهای چشمه های پلاک مسطح

، داخل مجرای ، جراحی داخلی و درون رگی است ؛ برای این درمان ها از چشمه های گسیلنده ی بتا یا گاما استفاده می شود .

مزیت فیزیکی درمان های براکی تراپی در مقایسه با پرتودرمانی باریکه ی خارجی بهینه شدن مکان انتقال دز به حجم هدف مورد نظر است . ایراد این روش این است که از براکی تراپی فقط در مواردی می توان استفاده کرد که مکان تومور به خوبی مشخص شده باشد و به نسبت کوچک باشد . در گروه پرتودرمانی معمول در حدود ۲۰٪ - ۱۰٪ کل بیماران ، پرتودرمانی به وسیله ی براکی تراپی درمان می شوند .

جنبه های متعددی باید هنگام درمان براکی تراپی مورد توجه قرار گیرد. مهم ترین آن روشی است که چشمه ها در مکان حجم مورد نظر درمان باید قرار گیرند و چندین روش برای جای گذاری در طول چند دهه ی گذشته برای این منظور ایجاد شده اند . مزیت استفاده از یک مدل که به خوبی ساخته شده این است که تجربه های طولانی استفاده از آن مفید بوده و می توان از نتایج منتشر شده در مقالات نیز استفاده کرد . استفاده از مدل ها و روش های یکسان در براکی تراپی مقایسه ی نتایج در مان را ساده تر می کند.

درمان های نمونه و روش مورد استفاده، برای مثال درمان سرطان دهانه ی رحم که در آن دز به نقطه ی مشخص A داده می شود یا درمان های جریان دز پایین در سرطان های سر و گردن با استفاده از سیم های ایریدیم - ۱۹۲ است . در مورد آخر مدل پاریس یک راهنمای مناسب برای محاسبه ی دز و زمان درمان است .

برای درمان هایی که در آن ها از تکنیک های بهینه سازی دز استفاده می شود ، زمان های درمان به چگونگی مکان چشمه ها در نقاطی که دز آن ها محاسبه شده و قدرت چشمه بستگی دارد . در مؤسسه هایی که سیستم درمان آن ها واضح نیست ، نشریات علمی باید مورد مشورت قرار گیرند تا از تمام مزایای آزمایشات موجود بتوان بهره مند شد .

استفاده از روشی ویژه برای درمان براکی تراپی و مدلی برای محاسبات توزیع دز مقایسه ی نتایج را ساده می کند . استفاده از سیستم دزیمتری با ساختار خوب در درمان سرطان یک نقطه ی مشترک برای چنین مقایسه هایی ایجاد می کند . گرچه استفاده از یک روش به تنهایی برای تصدیق نتایج کافی نیست و لازم است که روش قابل اعتماد برای تعیین قدرت چشمه و دقیق بودن محاسبات دز اتخاذ شود . این به این معناست که کالیبراسیون چشمه های براکی تراپی با کالیبراسیون قابل ردیابی در آزمایشگاه های استاندارد

ملی یا بین المللی ضروری است .



جنبه های مهم در درمان های براکی تراپی عبارت اند از :

- استفاده از روش مناسب دزیمتری برای محاسبه ی زمان و دز درمان ،
- استفاده از چشمه های کالیبره شده .

این ها به هیچ وجه همه ی اجزای لازم نیستند . در صورتی که در قرار گیری چشمه ها خطاهای جدی هندسی درباره ی مکان مورد نظر وجود داشته باشد چشمه در قرار گیری در محل هدف حاشیه ی بزرگی داشته و درمان نمی تواند به هدف اصلی خود برسد . با توجه به این که از مشخصات براکی تراپی گرادیان دز با شیب زیاد است این خطاهای هندسی باعث خسارت جدی در درمان موردنظر می شوند . بنابراین برنامه های کنترل کیفی برای تضمین این که درمان مطابق با اهداف آن انجام می شود ، لازم است .

از نقطه نظر رادیوبیولوژیکی انتقال دز براکی تراپی می تواند اثرات آهنگ دز پیچیده ای داشته باشد که ممکن است در خروجی درمان مؤثر باشد . پیوسته بودن انتقال دز در بازسازی کشندگی ثانویه و صدمات کشنده ی بالقوه ، تکثیر سلولی و دیگر سینتیک های سلولی تأثیرگذار بوده ، همه ی آن ها در پاسخ پرتو تومورها و بافت های نرمال تغییر ایجاد می کنند . در جدول های زیر ، درمان های براکی تراپی با توجه به نوع کاشت ، دوره ی کاشت ، روش بارگذاری چشمه و آهنگ دز به صورت خلاصه آمده است :

#### ۱. انواع مختلف کاشت براکی تراپی.

نوع کاشت	توضیح
درون حفره ای	چشمه ها درون حفره های بدن نزدیک به تومور قرار داده می شوند.
درون نسجی	چشمه ها به وسیله ی جراحی درون حجم تومور قرار داده می شوند.
سطحی (مولدی)	چشمه ها بر روی محل درمان قرار می گیرند.
جداره ی داخلی	چشمه در جداره ی داخلی قرار می گیرد.
جراحی داخلی	چشمه ها طی عمل جراحی در بافت هدف قرار می گیرند.
درون عروق	یک تک چشمه در رگ های بزرگ یا کوچک قرار داده می شود.

#### ۲. انواع درمان براکی تراپی با توجه به طول درمان.

نوع کاشت	توضیح
موقت	دز در مدتی کوتاه داده شده و چشمه پس از انتقال دز توصیه شده خارج می شود.
دایم	دز در مدت طول عمر چشمه تا زمان واپاشی کامل منتقل می شود.

۳. انواع درمان‌های براکی‌تراپی با توجه به بارگذاری چشمه.

روش بارگذاری	توضیح
بارگذاری داغ	اپلیکاتور قبلاً بارگذاری شده و شامل چشمه‌های رادیواکتیو در زمان قرارگیری در بیمار است.
بارگذاری ثانویه	اپلیکاتور ابتدا در محل هدف قرار می‌گیرد و سپس چشمه‌ها در آن دستی (بارگذاری ثانویه دستی) یا با دستگاه (بارگذاری ثانویه‌ی کنترل از راه دور اتوماتیک) قرار می‌گیرند.

۴. انواع درمان‌های براکی‌تراپی با توجه به آهنگ دز.

آهنگ دز	مقادیر عددی دز در نقاط مخصوص دز
آهنگ دز پایین (LDR)	۰٫۴-۲ Gy/h
آهنگ دز متوسط (MDR)	۲-۱۲ Gy/h
آهنگ دز بالا (HDR)	>۱۲ Gy/h

استفاده ی بالینی

بیماری های زنان

براکی تراپی داخل حفره ای اغلب برای سرطان های دهانه ی رحم ، رحم و واژن استفاده می شود . اپلیکاتورهای مختلفی برای نگه داری چشمه ها به شکل مناسب در دسترس هستند . اپلیکاتور دهانه ی رحم شامل تیوب مرکزی ( تاندم ) و کپسول های جانبی ( بیضوی یا کولپوستات ) است .

براکی تراپی درون نسجی

سیستم های دزیمتری از پیش طراحی شده ی مختلفی برای استفاده ی بالینی توسعه داده شده اند . در سال های اولیه ی براکی تراپی ، جدول های دز کامل انتقال یافته برحسب محیط یا حجم درمان محاسبه شده و در دسترس بود . این جدول ها برای محاسبه ی تعداد لازم چشمه ها و پیش طراحی جای گذاری آن ها در حجم هدف برای دست یابی به درمان کافی استفاده می شد . این اهداف نیازمند قوانین تعریف شده ی مناسبی برای جای گذاری

چشمه ها بودند . دو سیستمی که به صورت گسترده استفاده می شدند عبارتند از : سیستم پترسون - پارکر ( منچستر ) و سیستم کوئیمی ( مموریال ) . در حال حاضر رایج ترین سیستم مورد استفاده سیستم پاریس است .

سیستم های کنترل از راه دور بارگذاری ثانویه

معمولاً چشمه های پرتو به صورت دستی در اپلیکاتورها یا میله ی جراحی که درون حجم هدف کار گذاشته شده قرار می گیرند . در انتهای درمان نیز چشمه ها مجدداً دستی جابه جا می شوند . این فرایند ها باعث پرتوگیری رادیواکتیو پرسنل پزشکی و کارکنان می شود . چندین نوع از سیستم های کنترل از راه دور بارگذاری ثانویه برای کاهش این پرتو ها توسعه داده شده اند .

کاشت های دایم پروستات

براکی تراپی مقبولیت گسترده ای در روش های درمانی مراحل اولیه سرطان پروستات که فقط محدود به غده ی پروستات است ، به دست آورده است . جای گذاری دایمی چشمه های رادیونوکلید با عمر کوتاه و گسیلنده ی فوتون های انرژی پایین ، اغلب برای درمان پایه استفاده می شوند و برخی تلاش ها نیز برای استفاده ی درمان چندجلسه ای یا درمان تک جلسه ای HDR به منزله ی مکمل پرتودرمانی باریکه ی خارجی نیز انجام شده است .

پلاک های چشمی

تومورهای داخل چشمی از شایع ترین تومورها در چشم هستند . پلاک چشم که با دانه های ید - ۱۲۵ بارگذاری شده است ، بر روی سطح خارجی صلبیه چشم بر بالای تومور قرار می گیرد . تعداد دانه های استفاده شده به اندازه ی پلاک بستگی داشته و در محدوده ی ۷ تا ۲۴ عدد برای قطر پلاک 12 - 20 mm است . اکتیویته ی معمول مورد استفاده 0.5 - 5 mCi برای هر دانه برای دست یابی به آهنگ دز درمانی 0.5 - 1.25 G/hr است که برای انتقال دز تجویزی 100 Gy در ۱۲ - ۵ روز متوالی است .

براکی تراپی درون رگی

پتانسیل نقش پرتو در جلوگیری از انسداد رگ ها پس از درمان آنژیوپلاستی یا قرار دادن استنت با استفاده از تکنیک های براکی تراپی در حال مطالعه و بررسی است . تحقیقات پیش بالینی و بالینی از میله ی جراحی براساس چشمه های پرتو یا استنت های رادیواکتیو برای انتقال دز به دیواره ی رگ های شریانی قلبی تحت تأثیر استفاده می کنند . ایریدیم - ۱۹۲ انتخابی برای چشمه ی گسیلنده ی گاما با انرژی متوسط است و در هر دو آهنگ های دز بالا و متوسط استفاده می شود . استرانسیم ۹۰ ، ایتیریم ۹۰ و پتاسیم ۳۲ به عنوان چشمه های گسیلنده ی

بتا استفاده می شوند . چندین عامل نظیر انتقال کافی دز ، عمق نفوذ ، پوشش دز و دز پرتو دریافت شده ی کارکنان در انتخاب چشمه رادیواکتیو برای این درمان ها در نظر گرفته می شوند .

تجویز دز درمانی معمول 14 Gy در 2 mm از مرکز چشمه است که دز در سطح داخلی مجرای عضو نباید از 30Gy تجاوز کند . اندازه گیری ها و محاسبات آهنگ های دز در فاصله های خیلی کم ( کمتر از 5 mm ) چشمه برای استفاده ی بالینی از آن ها لازم است .

#### حساس کننده ها و محافظت کننده های پرتوی

عناصر شیمیایی مختلف ممکن است پاسخ سلول به پرتوهای یونساز را با کاهش یا افزایش پاسخ سلول افزایش دهند . عناصر شیمیایی که پاسخ سلول به پرتو را کاهش دهند ، محافظت کننده از پرتو نامیده می شوند . آن ها معمولاً اثرات غیرمستقیم پرتو را با تضعیف کردن تولید رادیکال های آزاد ، تحت نفوذ خود قرار می دهند . فاکتور اصلاح دز ( DMF ) به صورت زیر تعریف می شود :

$$\text{دز برای تولید یک اثر با محافظت کننده از پرتوها} = \frac{\text{فاکتور اصلاح دز (DMF)}}{\text{دز برای ایجاد همان اثر بدون محافظت کننده از پرتوها}}$$

عناصر شیمیایی که پاسخ سلول به پرتو را بالا می برند ، حساس کننده به پرتو نامیده می شوند و معمولاً اثرات مستقیم و غیرمستقیم پرتو را بالا می برند . مثال هایی از این نوع ، پریمیدین های هالوژنه شده که بین توده های DNA جا داده و مانع ترمیم می شوند ، و حساس کننده ی پرتو سلولی بدون اکسیژن هستند که مثل اکسیژن عمل می کنند .

نوع دیگر حساس کننده به پرتو مؤلفه هایی است شامل بور ، که اثرات درمان با پرتو نوترون حرارتی را بالا می برد . بور - ۱۰ سطح مقطع بالایی برای برهم کنش با نوترون های بالاتر دارد ( انرژی جنبشی از مرتبه 0.025 eV ) و وقتی که نوترون حرارتی با بور - ۱۰ برهم کنش می کند ، هسته ی ناپایدار بور - ۱۱ تشکیل می شود که متحمل شکافت می شود و ذرات  $\alpha$  تولید می کند که دز بالایی را بدون واسطه به ترکیب مجاور شامل بور انتقال می دهد . این درمان نوترون تسخیری بور ( BNCT ) از سال ۱۹۵۰ مورد تحقیق قرار گرفته است ، هر چند کاربردهای کلینیکی موفقیت آمیزی هنوز به دست نیامده است .

## رادیو داروها

رادیو داروها رادیوایزوتوپهایی هستند که به مولکولهای بیولوژیکی متصل شده و قادر هستند اندامها ، بافتها یا سلولهای خاصی را در بدن انسان مورد هدف قرار دهند . از این داروهای رادیواکتیو می توان برای تشخیص بیماری و به طور فزاینده ای برای درمان بیماری ها استفاده کرد .

تعداد رادیو داروهای مورد استفاده در کاربردهای بالینی به سرعت در حال رشد است ، بنابراین به جامعه پزشکی این امکان را می دهد تا به اطلاعات دقیق در مورد خصوصیات انواع مختلف تومورها دسترسی بهتری داشته باشد .

یک رادیو دارو را می توان به عنوان موجودی متشکل از یک رادیونوکلئید و یک مولکول حامل با میل یا قدرت زیاد برای اتصال به یک بافت یا یک عملکرد خاص از یک اندام انسانی در نظر گرفت . همچنین اگر خصوصیات بیولوژیکی مناسبی را نشان دهد ، ممکن است این کاربرد فقط رادیوایزوتوپ را شامل شود .

رادیو دارو برای تولید تصاویر از اندام ها یا بافت های مورد علاقه استفاده می شود ، فرایندی که سنتیگرافی ( scintigraphy ) نامیده می شود . نوعی از تجهیزات پزشکی معروف به دوربین گاما قادر به تشخیص پرتوهای گامای ساطع شده توسط رادیوایزوتوپ است . این تصاویر به روش غیر تهاجمی تولید می شود که عملکرد اندام یا بافت تحت بررسی را منعکس می کند .

رادیوایزوتوپی که گسترده ترین مورد استفاده در پزشکی هسته ای تشخیصی را دارد ، تکنسیوم  $m^{99}$  است . این رادیوایزوتوپ می تواند به چندین مولکول خاص متصل شده و امکان تشخیص بسیاری از بیماری ها از جمله انواع خاصی از سرطان ها را فراهم آورد . به عنوان مثال ، تکنسیوم  $m\text{-MDP}^{99}$  (متیلن دیفسفونات) به طور گسترده ای برای تشخیص متاستاز استخوانی مرتبط با سرطان استفاده می شود .

برخی از این رادیو داروها که تحت عنوان رادیونوکلئوتیدها شناخته می شوند ، داروهای رادیواکتیوی هستند که برای درمان انواع سرطان شامل تومور تیروئید ، تومور عود کرده قفسه سینه و تومور متاستاتیک استخوان استفاده می شوند . بیشترین استفاده مربوط به  $\text{Samarium}^{153}$  و  $\text{Strontium}^{89}$  می باشد . این داروها به وسیله FDA برای کاهش درد متاستاتیک استخوان تأیید شده است . هردو دارو از طریق تزریق داخل وریدی و معمولاً در بیماران سرپایی مورد استفاده قرار می گیرند . بعضی مواقع این داروها به همراه رادیوتراپی خارجی استفاده می شوند . انواع دیگر رادیونوکلئوتیدها  $\text{Rhodium}^{186}$ ،  $\text{P}^{32}$  و گالییم نترات می باشد . داروهای دیگری نیز تحت مطالعه و بررسی هستند

## رادیوبیولوژی مقدماتی

رادیوبیولوژی شاخه ای از علم که با عمل پرتوهای یونساز روی بافت های بیولوژیکی و اندامهای زنده مرتبط است ، ترکیبی از دو میدان مطالعه : فیزیک پرتو و بیولوژی پرتو است . همه ی موجودات زنده از پروتوپلاسم ساخته شده اند که مرکب از اجزای آلی و غیرآلی حل شده یا معلق در آب هستند . کوچک ترین واحد پروتوپلاسم مستعد زندگی سلول است . سلول ها محتوی اجزای غیرآلی ( آب و مواد معدنی ) به اضافه ی اجزای آلی ( پروتئینها ، کربوهیدراتها ، نوکلئیک اسیدها و لیپیدها ) هستند . دو جزء اصلی یک سلول عبارت اند از :

سیتوپلاسم که همه ی فعالیت های متابولیک در سلول را پشتیبانی می کند و هسته که محتوی اطلاعات ژنتیک ( DNA ) است .

سلول های پیشرفته یاخته های پیکری (Somatic) یا جنینی (Germ) هستند .

سلول ها به صورت تقسیم ، تکثیر می شوند و تقسیم سلول های جنسی ، میتوز نامیده می شود ، در حالی که تقسیم سلول های جنینی ، میوز نامیده می شود . وقتی که یاخته های پیکری تقسیم می شوند ، دو سلول تولید می شوند ، که هر کدام حامل مکمل کروموزوم مساوی با کروموزوم سلول اصلی هستند . سلول های جدید متحمل تقسیم بیش تر می شوند و مرحله ادامه پیدا می کند .

یاخته های پیکری به این صورت طبقه بندی می شوند .

□ سلول های بنیادی که برای همیشه وجود دارند و سلول هایی را برای جمعیت سلولی متمایز تولید میکنند (برای مثال سلول های بنیادی سیستم هماتوپوئیک یا سیستم وابسته به تکمیل سلول های خونی و پوشش مخاطی روده)

□ سلول های عبوری که در حرکت هستند به جمع دیگری مهاجرت می کنند (مثلاً یک سلول خونی قرمز نابالغ که متمایز می شود برای این که سلول خونی ۷ شود) ،

□ سلول های بالغ که کاملاً متمایز می شوند و فعالیت میتوزی از خود نشان نمیدهند (مثل سلول های ماهیچه و بافت عصبی).

گروهی از سلول ها که با هم دیگر یک یا چند کار را انجام میدهند یک عضو نامیده می شوند . گروهی از اعضا که با هم دیگر یک یا چند کار را انجام می دهند سیستمی از اعضا یا یک موجود زنده هستند .

طبقه بندی پرتو در رادیوبیولوژی

برای کاربرد در حفاظت در برابر پرتو و رادیوبیولوژی کمیت فیزیکی که برای تعریف کیفیت باریکه ی پرتوهای یونساز مفید است انتقال انرژی خطی ( LET ) است که در مقابل توان ایستاندگی است که توجه خود را روی اتلاف انرژی در ذره ی باردار پرانرژی که در یک محیط حرکت می کند متمرکز می کند . LET توجه خود را روی آهنگ خطی جذب انرژی در محیط جاذب به منزله ی ذره ی بارداری که محیط را طی می کند متمرکز می کند.

ICRU ، LET را به صورت زیر تعریف می کند:

LET ذرات باردار در محیط ، خارج قسمت  $dE/dl$  است که  $dE$  انرژی متوسط داده شده به محیط در ذره ی باردار با انرژی مشخص طی مسافت طی شده ی  $dl$  است.

در مقابل توان ایستاندگی که واحد  $MeV/cm$  دارد ، واحدی که معمولاً برای LET استفاده می شود  $keV/\mu m$  است . متوسط انرژی با تقسیم مسیر ذره به فواصل انرژی مساوی و متوسط گیری طول مسیری که روی این فواصل انرژی ته نشست می کنند ، به دست می آید .

مقادیر LET برای پرتوهایی که معمولاً استفاده می شوند ، عبارت اند از :

□ پرتو X 250kVp :  $2keV/\mu m$

□: پرتو گامای کبالت ۶۰ :  $0.3keV/\mu m$

□ پرتو X 3MeV :  $0.3 keV/\mu m$

□ الکترون های 1 MeV :  $0.25 keV/\mu m$

مقادیر LET برای پرتوهای دیگری نیز هستند که کمتر استفاده می شوند :

□ نوترون های 14 Mev :  $12 keV/\mu m$

□ ذرات باردار سنگین:  $100 - 200 keV/\mu m$

□ الکترون های  $1 keV$  :  $12.3 keV/\mu m$

□ الکترون های  $10 keV$  :  $2.3 keV/\mu m$

پرتوهای X و گاما ، پرتوهای های با LET پایین در نظر گرفته می شوند . در حالی که نوترون های پراثری ، پروتون ها و ذرات باردار سنگین ، پرتوهایی با LET بالا ( یونیزاسیون تراکمی ) هستند . مقدار حدی بین LET بالا و پایین حدود  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  است .

چرخه ی سلول و مرگ سلول

چرخه ی تکثیر سلولی با دو دوره ی زمانی به خوبی تعیین شده ، تعریف می شود :

□ میتوز (M) که تقسیم رخ میدهد ،

□ دوره ی سنتز DNA (S))

بخش های S و M چرخه ی سلولی با دو پرپود  $G_1$  و  $G_2$  جدا می شوند ، به طور نسبی ، DNA هنوز ساخته نشده است یا ساخته شده اس ؛ اما مراحل متابولیک دیگر واقع می شوند .

زمان بین تقسیم های متوالی ( میتوزها ) زمان چرخه ی سلول نامیده می شود . برای سلول های استاندارد که به صورت کشت در آزمایشگاه رشد میکنند فاز S معمولاً در محدوده ی  $6 - 8 \text{ h}$  است ، فاز M کم تر از یک ساعت ،  $G_2$  در محدوده ی  $2 - 4 \text{ h}$  و  $G_1$  ،  $1 - 8 \text{ h}$  است . در مقابل ، چرخه ی سلولی برای سلول های بنیادی در بافت های معین تا حدود ۱۰ روز است .

معمولاً ، سلول ها بیش تر در فازهای M و  $G_2$  حساس به پرتوها هستند و در فاز بعدی S مقاوم به پرتوها هستند .

زمان چرخه ی سلولی سلول های بدخیم کم تر از زمان چرخه ی سلولی سلول های بافت نرمال است ؛ اما طی بازسازی بعد از آسیب ، سلول های سالم تندتر تکثیر می شوند . مرگ سلولی سلول های تکثیر نیافته ( استاتیک ) به صورت از دست رفتن کارایی ویژه تعریف می شود ، در حالی که برای سلول های بنیادی و سلول های دیگر با قابلیت چندین تقسیم ، به صورت از دست دادن قابلیت تکثیر تعریف می شود . سلول زنده که قابلیت تکثیر خود را با تمامیت کامل حفظ می کند و تقریباً به صورت نا محدود تکثیر می شود کلونوزنیک نام دارد .

پرتودهی به سلول ها

وقتی که سلول ها با پرتوهای یونساز پرتودهی می شوند اثرات فیزیکی استاندارد بین پرتوها و اتم ها یا مولکول های سلول های اول رخ می دهد و به دنبال آن امکان تخریب بیولوژیکی کارکرد سلولی پیش می آید . اثرات بیولوژیکی پرتو در اصل از خرابی DNA منجر می شود که بحرانی ترین هدف در سلول است ، هر چند مکانیسم های دیگری



نیز در سلول هستند که وقتی آسیب دیدند ممکن است منجر به مرگ سلولی شوند . وقتی که پرتوهای یونساز مستقیم در ماده ی بیولوژیکی جذب می شوند آسیب به سلول ممکن است به صورت مستقیم یا غیرمستقیم رخ دهد

عمل مستقیم در آسیب سلولی با پرتوها

در تأثیر مستقیم ، پرتوها مستقیماً با هدف بحرانی در سلول برهم کنش می کنند . اتم های خود هدف ممکن است یونیزان شوند یا به صورت برهم کنشهای کولمبی برانگیخته شوند که منجر به زنجیره ی رویدادهای فیزیکی و شیمیایی می شود که سرانجام آسیب بیولوژیکی را به وجود می آورد . تأثیر مستقیم ، مرحله ی غالب در برهم کنش ذرات با LET بالا با ماده ی بیولوژیکی است .

تأثیر غیرمستقیم در آسیب سلولی با پرتوها

در تأثیر غیرمستقیم ، پرتوها با اتم ها و مولکول های دیگر ( بیشتر آب ، از آن جایی که حدود ۸۰٪ سلول از آب تشکیل شده ) در سلول برهم کنش کرده و رادیکال های آزاد را تولید می کنند و با انتشار در سلول به هدف بحرانی در سلول آسیب می رسانند . در برهم کنشهای پرتوها با آب ، رادیکال های آزاد کم عمر، ولی در عین حال بسیار واکنش پذیر مثل  $H_2O^+$  ( یون آب ) و  $OH$  ( رادیکال هیدروکسیل ) تولید می شوند . رادیکال های آزاد در حالت های مناسبی می توانند سبب آسیب به هدف در سلول شوند .

رادیکال های آزادی که باندهای شیمیایی را می شکنند و تولید تغییرات شیمیایی می کنند منجر به آسیب بیولوژیکی می شوند ، و این مولکول ها بر هم کنش پذیری بالا دارند ، چون هر یک الکترون والانس جفت نشده دارند . حدود دو سوم آسیب بیولوژیکی با پرتوهای با LET پایین ( پرتوهای یونساز پراکنده ) مثل پرتو X یا الکترون ها به واسطه ی عمل غیرمستقیم است .

اثر غیرمستقیم با حس گرهای شیمیایی یا نگه دارنده های پرتو تعدیل می شود . مراحل تولید آسیب بیولوژیکی با اثر غیرمستقیم پرتو X شامل موارد ذیل هستند :

□ مرحله ی ۱: برهم کنش فوتون اولیه (اثر فوتوالکتریک ، اثر کامپتون و تولید جفت) یک الکترون با انرژی بالا تولید می کند.

□ مرحله ی ۲: الکترون با انرژی بالا در حرکت داخل بافت تولید رادیکال های آزاد در بافت می کند.

□ مرحله ی ۳: رادیکال های آزاد ممکن است با شکست باندهای شیمیایی تغییراتی را در DNA ایجاد کنند.

□ مرحله ی ۴: تغییرات در باندهای شیمیایی منجر به اثرات بیولوژیکی می شود.

مرحله ی ۱ در محدوده ی فیزیک ، مرحله ی ۲ در محدوده ی شیمی و مراحل ۳ و ۴ در محدوده ی رادیوبیولوژی هستند .

وضعیت سلول های پرتودیده

پرتودهی سلول منجر به یکی از نه نتیجه ی ذیل می شود :

□ بدون اثر

□ تأخیر تقسیم: سلول تقسیم شدنش به تأخیر می افتد.

□ مرگ سلولی برنامه دار: سلول قبل از این که بتواند تقسیم شود می میرد ، یا بعد از آن با تکه تکه شدن به بدنه های کوچک تر که جذب سلول های همسایه می شوند ، می میرد.

□ عدم قوه ی تکثیر سلول: هنگامی که سلول مبادرت به میتوز اول یا بعدی می کند ، می میرد.

□ ناپایداری ژنومیک: در نتیجه ی القای ناپایداری ژنومیک ، در اتمام تکثیر تأخیر به وجود می آید.

□ موتاسیون: سلول زنده می ماند ؛ اما یک موتاسیون را در بر دارد.

□ تغییر شکل: سلول زنده می ماند ؛ اما موتاسیون منجر به یک فنوتیپ تغییر شکل یافته و شاید تولید سرطان می شود.

□ اثرات ناظر: سلول پرتودیده سیگنالهایی را به سلول های پرتو ندیده ی مجاور می فرستند و آسیب ژنتیک به آن ها را فراهم می کند.

□ واکنش های قابل تطبیق: سلول پرتودیده جهت واکنش تحریک شده و به پرتودهی بعدی مقاوم می شود.

نوع آسیب پرتودهی

مقیاس زمانی

مقیاس زمانی مورد بحث بین شکست باندهای شیمیایی و اثر بیولوژیکی ممکن است ساعت ها تا سال ها وابسته به نوع آسیب باشد .

اگر نتیجه مرگ سلول باشد ، ممکن است در ساعت ها یا سال ها وقتی که سلول آسیب دیده مبادرت به تقسیم میکند ( اثرات اولیه ی پرتو ) اتفاق بیفتد . اگر سلول های زیادی کشته شوند می تواند منجر به واکنش زودرس بافت ( اثرات قطعی ) شود .

اگر آسیب آنکوژنیک یا مسبب سرطان باشد ، پس ممکن است ، بروز علامتش سال ها تأخیر داشته باشد ( اثرات کند پرتو ) . پرتوهای یونساز ثابت شده است که سبب لوسمی می شود و در توسعه ی چندین سرطان دیگر در بافت ها مثل استخوان ، ریه ، پوست ، تیروئید و پستان مؤثر باشد . علاوه بر تولید سرطان ، اثرات کند پرتو شامل موارد زیر می شوند .

واکنش های دیررس بافت ( اثرات قطعی ) مثل فیبروز و واکنش های دیگر ناشی از نقص های عروقی ، کاهش مدت زندگی ( بیشتر به دلیل کشنده بودن سرطان ) ؛ آسیب ژنتیک که اثرات آن ممکن است در نسل های بعدی ؛ و اثرات بالقوه در جنین ظاهر شوند .

طبقه بندی آسیب پرتو

آسیب پرتوها به سلول های پستاندار به سه طبقه تقسیم می شود :

- آسیب مهلک ، که برگشت ناپذیر و جبران ناپذیر است و منجر به مرگ سلول می شود.
- آسیب غیر مهلک که در چندین ساعت ترمیم می شوند ، مگر این که آسیب غیر مهلک دیگری افزوده شود که سرانجام منجر به آسیب مهلک می شود.
- آسیب مهلک بالقوه که می توانند با ترمیم وقتی درست شوند که سلول ها مجازند در حالت غیرتقسیم بمانند.

اثرات یاخته های پیکری و ژنتیک

اثرات پرتو روی جمعیت بشر می تواند به صورت یاخته های پیکری یا ژنتیک طبقه بندی شود .

□ اثرات یاخته های پیکری آسیب هایی هستند که افراد پرتو دیده ، طی زمان عمرشان متحمل می شوند ، مثل سرطان های ناشی از پرتو ، عقیمی ، کدری عدسی چشم و کوتاهی عمر.

□ اثرات ژنتیک یا ارثی ، موتاسیون های ناشی از پرتو هستند که با ژن های فردی و DNA در تولد نسل های ناقص سهیم می شوند.

سرطان زایی خود را به صورت اثرات تأخیری سلولی به شکل لوسمی حاد یا لوسمی ناشی از مغز استخوان مزمن یا به صورت تومورهای جامد ، برای مثال در پوست ، استخوان ، ریه ، تیروئید یا پستان نشان می دهد . داده های بشر روی سرطان های ناشی از پرتو از منابع زیر جمع آوری می شود :

□ پرتوگیری حرفه ای با سطح پایین

□ بازمانده های بمب اتمی در هیروشیما و ناکازاکی

□ پرتوگیری پزشکی بیماران (مثلاً طی درمان التهاب مهره ی جمود مفصلی با درمان ناهنجاریهای تیروئید و پرتو درمانی سرطان) و پرسنل (مثلاً رادیولوژیستها در اوایل قرن گذشته)

اثرات تصادفی و غیرتصادفی ( قطعی )

اثرات مضر پرتو ممکن است به دو طبقه ی عمومی تقسیم بندی شود ، تصادفی و غیرتصادفی ( قطعی ) . انجمن ملی حفاظت در برابر پرتوها و اندازه گیری ها ( NCRP ) این اثرات را به صورت زیر تعریف می کند :

□ اثر تصادفی اثری است که در آن احتمال رخداد با افزایش دز افزایش پیدا می کند ؛ اما تأثیر سختی و شدت در اشخاص به دز وابسته نیست (القا سرطان ، سرطان های ناشی از پرتو و اثرات ژنتیک). دز آستانه ای برای اثراتی که به واقع تصادفی هستند وجود ندارد ، چون این اثرات در تک سلول ها رخ می دهند و فرض می شود که احتمال کمی وجود دارد که در دزهای پایین حادثه ای رخ بدهد .

□ اثر غیرتصادفی یا قطعی (واکنش بافت) آنی است که شدت آن با افزایش دز (معمولاً بالای دز آستانه) در اشخاص (با بدکاری عضو و تصلب بافت ها ، کدری عدسی چشم ، تغییرات خونی و کاهش در شمارش اسپرم) افزایش پیدا کند. این حوادث پس از ایجاد دز بیش از دز آستانه به دلیل آسیب به جمعیت سلولی رخ می دهد .

اثرات زودرس در برابر اثرات دیررس بافت یا اندام

یک اندام یا بافت پاسخ به آسیب پرتو را به صورت یک اثر بحرانی ( آنی ) یا به صورت یک اثر کند ( مزمن ) اظهار می کند .

اثرات بحرانی خیلی زود بعد از پرتوگیری آشکار می شوند و با التهاب ، ورم ، آسیب بافت مخاطی و بافت مربوط به سلول های خونی و خونریزی مشخص می شوند . اثرات تأخیری مانند تصلب بافت ها ، لاغری ، زخم ، تنگی مجرا یا انسداد روده هستند . اثرات تأخیری ممکن است عمومی و ناشی از جذب مستقیم پرتو در بافت هدف باشند یا پیامد آسیب بحرانی در بافت های پوششی مثل مخاط ها یا اپیدرم ها باشند .

واکنش به پرتوگیری کلی بدن

واکنش موجود زنده به پرتوگیری بحرانی کل بدن با واکنش ترکیبی به پرتودهی همه ی اعضای که موجود زنده را تشکیل می دهند ، متأثر می شود . در پرتودهی کل بدن با دز بالای 1 Gy ، پاسخ به صورت سندرم پرتوی مشخص شرح داده می شود :

- $1 \text{ Gy} > \text{دز} > 10 \text{ Gy}$ : سندرم مغز استخوان،
- $10 \text{ Gy} > \text{دز} > 100 \text{ Gy}$ : سندرم معده‌ای روده‌ای،
- $100 \text{ Gy} > \text{دز}$ : سندروم سیستم عصبی مرکزی.

داده های منجر به سندروم های پرتوی مشخص از مراجع زیر جمع آوری شده است :

- حوادث آزمایشگاههای تحقیقاتی و صنعتی ،
- پرتوگیری از گرد و غبار اتمی رادیواکتیو از آزمایش های سلاح های هسته ای یا حادثه ی نیروگاه برق هسته ای چرنوبیل ،
- پرتوگیری انسانی با سطوح بالای پرتوها در هیروشیما و ناکازاکی ،
- پرتوگیری پزشکی بشر با پرتوگیری های کلی بدن (TBI ها).

#### پرتوگیری جنینی

بین انعقاد نطفه و تولد ، جنین از سه مرحله ی اساسی رشد عبور می کند :

- قبل از لانه گزینی (روز اول تا دهم) ،
  - رشد اعضا (روز یازدهم تا چهل و دوم) ،
  - مرحله ی رشد (روز ۴۳ تا تولد).
- پرتوها عامل نقص کننده ی جنین شناخته شده اند . اثرات پرتوها روی جنین وابسته به دو عامل است : دز و مرحله ی رشد در زمان پرتوگیری . اثرات بنیادی پرتو روی جنین ، مرگ جنینی یا نوزادی ، نقصهای خلقی ، کندی رشد ، نواقص مادرزادی و القا سرطان است .
- سقط جنین برای اجتناب از احتمال نابهنجاریهای مادرزادی القا شده از پرتو باید فقط وقتی در نظر گرفته شود که دز جنینی از  $10 \text{ cGy}$  تجاوز کند .

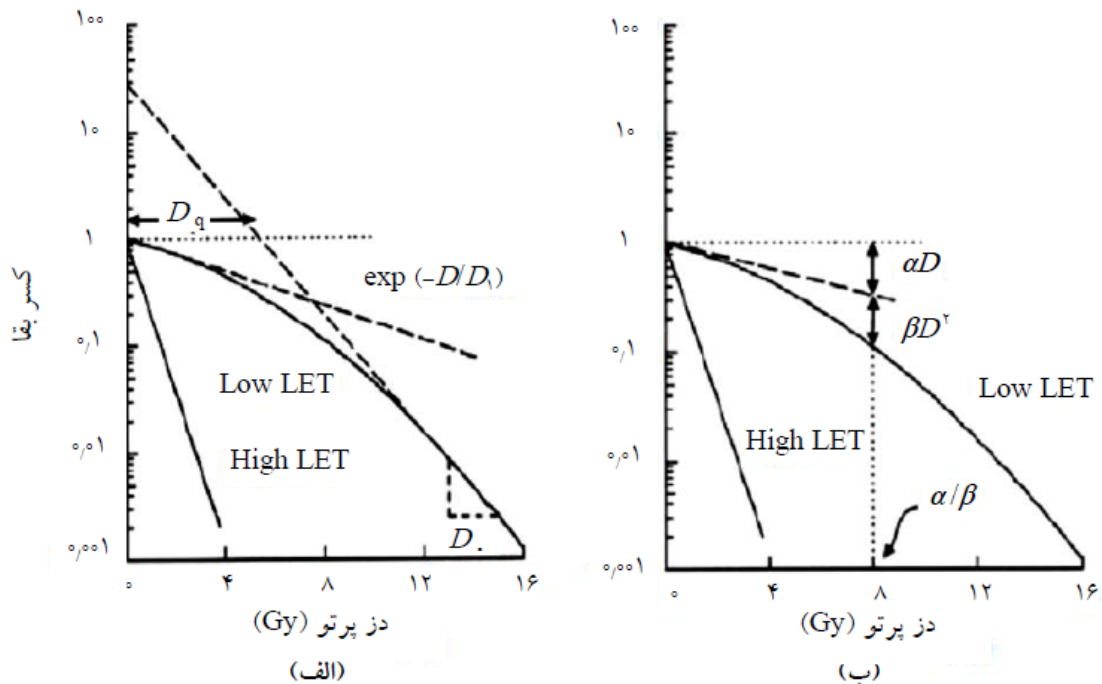
#### منحنیهای بقای سلولی

منحنی بقای سلولی ، رابطه ی بین کسر بقای سلول ها ( یعنی کسر سلول های پرتودیده که درستی باز تولیدی خود را حفظ می کنند ) و دز جذب شده را شرح می دهد . بقای سلولی به صورت تابعی از دز پرتو به صورت گرافیکی با

رسم کسری بقا روی مقیاس لگاریتمی روی محور عرضی (Y) در برابر دز روی مقیاس خطی روی محور طولی (X) بیان می شود.

کسرهای بقای سلولی با تکنیک های داخلی آزمایشگاهی یا درون بافت زنده تعیین می شوند. مثال هایی از منحنیهای بقا برای سلول های پرتودیده با باریکه های پرتوهای یونساز به صورت تراکمی و پراکنده در شکلهای زیر نشان داده می شوند.

نوع پرتو، شکل منحنی بقای سلولی را تحت تأثیر قرار می دهد. پرتوهای یونساز متراکم، منحنی بقای سلولی را به صورت تابع نمایی از دز با یک خط مستقیم تقریبی روی نمودار لگاریتمی خطی نشان می دهد. هرچند برای پرتوهای یونساز پراکنده، منحنی ها شیبی آغازین و سپس دنباله ای را نشان می دهند که تقریباً در دزهای بالاتر مستقیم می شود.



منحنی های بقای سلولی برای پرتو با LET بالا (یونیزاسیون تراکمی) و پرتو با LET پایین (یونیزاسیون پراکنده) (الف) مدل تک ضربه ای چند هدفی اولیه، (ب) مدل درجه ای دو خطی رایج.

عواملی که سلول ها را کم تر به پرتو حساس می کنند: دفع اکسیژن برای خلق حالت بی اکسیژنی، اضافه کردن رباینده های رادیکال شیمیایی، استفاده از آهنگ های دز پایین یا پرتودهی چند بار تفکیک شده و سلول های سنکرون شده یا مطابق شده با هم از نظر زمانی در فاز S یا گذشته ی چرخه ی سلولی، هستند.

چندین روش ریاضی با درجات مختلف پیچیدگی برای تعریف شکل منحنیهای بقای سلولی توسعه پیدا کرده اند که همه براساس مفهوم طبیعت تصادفی نشست انرژی در پرتو هستند .

منحنیهای پاسخ دز

نموداری از اثر بیولوژیکی مشاهده شده ( مثلاً القا تومور یا پاسخ بافت ) در برابر دز داده شده منحنی پاسخ دز نامیده می شود ( معمولاً چنان چه دز افزایش پیدا کند ، اثر بیولوژیکی افزایش پیدا می کند ) .

سه نوع رابطه ی پاسخ دز شناخته شده اند :

- خطی ،

- درجه ی دوم خطی ،

- سیگموئید ( S شکل ) .

منحنی های پاسخ دز ممکن است آستانه داشته باشند یا نداشته باشند . دز آستانه بیش ترین دز برای اثر خاص مطالعه شده است که زیر آن اثری مشاهده نمی شود .

منحنی های پاسخ دز مختلفی در شکل زیر نشان داده می شوند با :

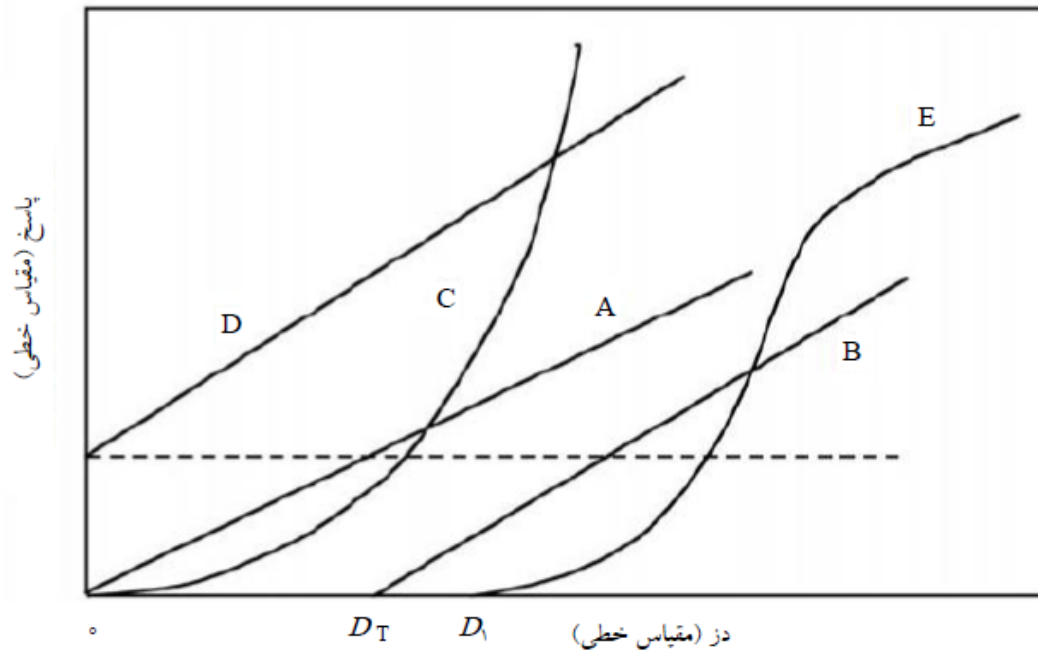
- رابطه ی خطی بدون آستانه

- رابطه ی خطی با یک آستانه

- رابطه ی درجه دو خطی بدون آستانه

- رابطه ی خطی ( سطح زیر خط با علامت وقوع طبیعی اثر را نشان می دهد )

- رابطه ی سیگموئید با آستانه .



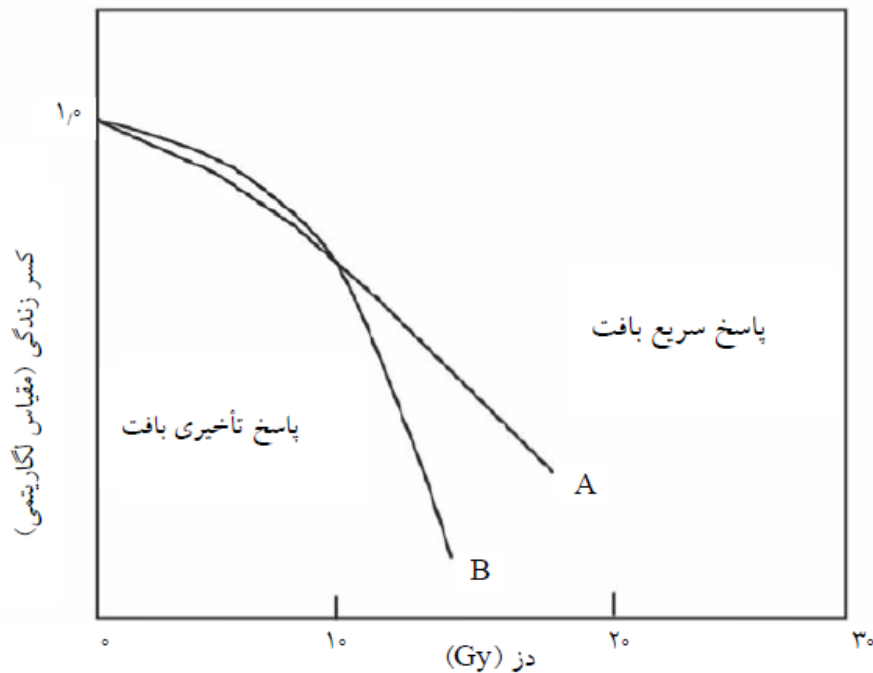
منحنی‌های پاسخ دز برای القای سرطان (منحنی‌های A, B, C و D) و برای پاسخ بافت (منحنی E). منحنی A رابطه‌ی خطی بدون آستانه را نشان می‌دهد، منحنی B رابطه‌ی خطی با آستانه‌ی  $D_T$  را نشان می‌دهد، منحنی C رابطه‌ی درجه دو خطی بدون آستانه را نشان می‌دهد (فرض شده برای اثرات تصادفی برای مثال تولید سرطان)، منحنی D رابطه‌ی خطی بدون آستانه را نشان می‌دهد (سطح زیر خط نقطه‌چین وقوع طبیعی اثر را نشان می‌دهد، برای مثال تولید سرطان) و منحنی E رابطه‌ی سیگموئید با آستانه‌ی  $D_1$  را برای اثرات قطعی رایج در بافت‌ها نشان می‌دهد. برای مثال کنترل تومور یا مرگ‌زایی درمان<sup>۱</sup> منحنی‌ها فقط وابسته به شکل هندسی هستند و برای وضوح جدا شده‌اند (در محل خط نقطه‌چین پایین‌تر خواهد بود).

پاسخ بافت‌های مختلف یا اندام‌ها به پرتو به صورت محسوسی متفاوت بوده و دو عامل حساسیت ذاتی تک سلول‌ها و سینتیک تکثیر وابسته است.

تمایز شفاف‌ی در پاسخ پرتو بین بافت‌هایی که پاسخدهی زودرس دارند (پوست، مخاط و پوشش روده ای) و آن‌هایی که پاسخ‌دهی دیررس دارند (نخاع) وجود دارد، و به صورت شماتیک در شکل زیر برای کسر بقا برابر دز نشان داده شده است.

منحنی‌های بقا سلولی برای بافت‌هایی که پاسخ‌دهی دیررس دارند از بافت‌هایی با پاسخ‌دهی زودرس خمیده‌تر است. برای اثرات زودرس نسبت  $\alpha/\beta$  بالا است و  $\alpha$  در دزهای پایین غالب می‌شود. برای اثرات دیررس  $\alpha/\beta$  کوچک است و  $\beta$  در دزهای کم‌تر از دزهای مربوط به بافت‌هایی که پاسخ‌دهی زودرس دارند، برتری دارد.





منحنی‌های بقای سلولی هدف فرضی برای (منحنی A) بافت‌هایی با پاسخ‌دهی زودرس و (منحنی B) بافت‌های با پاسخ‌دهی دیررس.

اندازه‌گیری آسیب پرتوها در بافت

اثرات پرتوها روی بافت به صورت تابعی از دز با تحقیق و آزمایش اندازه‌گیری می‌شود و نتایج اندازه‌گیری به شکل منحنیهای بقای سلولی یا منحنیهای پاسخ دز داده می‌شوند.

سه طبقه آزمایش بافتی قابل استفاده هستند :

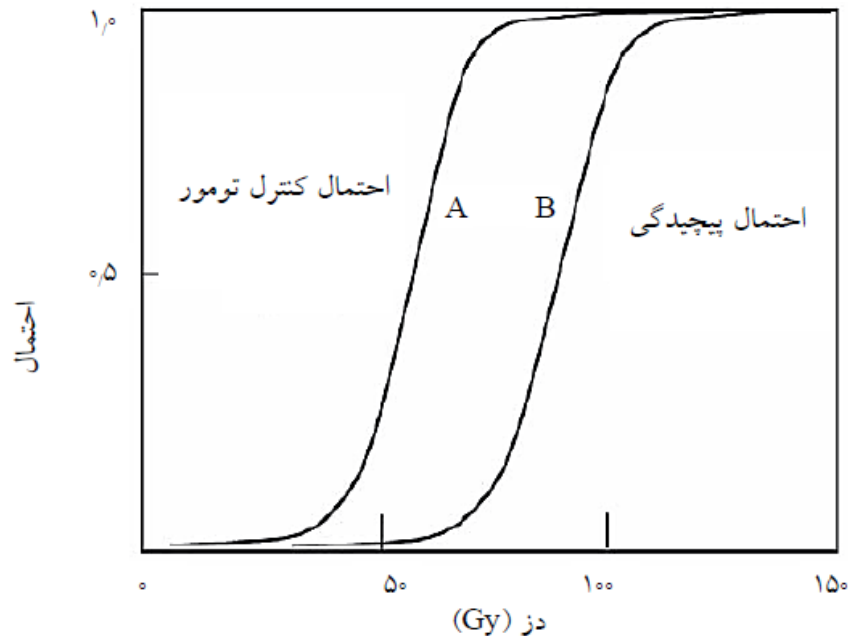
- آزمایش‌های کلونوزنیک که درستی و بی‌نقصی باز تولیدی سلول‌های بنیادی کلونوزنیک در بافت را اندازه‌گیری می‌گیرند که منجر به منحنیهای بقای سلولی می‌شوند.
- آزمایش‌های کارکردی، نقاط انتهایی کارکرد برای بافت‌های مختلف را اندازه‌گیری و

منحنی‌های پاسخ دزی را تولید می‌کنند که در آن منحنیهای پاسخ روی مقیاس واکنش درجه بندی شده، اندازه‌گیری می‌شود یا پاسخ به صورت درجه‌ای از حالت‌هایی که واکنشها بزرگ‌تر از سلول خاص هستند بیان می‌شود.

- آزمایش های کشنده ، تعداد مرگ های حیوانی بعد از پرتوگیری کل حیوانی یا یک عضو خاص یا یک دز داده شده را از نظر کمی تعیین می کنند . آزمایشها معمولاً در مقادیر دریافت شده از پارامتر  $LD_{50}$  نتیجه می شوند که  $LD$  سمبل دز کشنده است که به صورت دز داده شده به حیوانات یا به یک عضو ویژه ای از حیوانات است که ۵۰٪ از حیوانات را می کشد .

سلول های توموری و سالم: نسبت درمانی

هدف از پرتودرمانی دادن دز کافی به تومور برای تخریب آن بدون پرتوگیری بافت سالم با دزی است که منجر به مرگ تومور شود . در شکل زیر با رسم دو منحنی حلقوی ، یکی برای احتمال کنترل تومور ( TCP ) ( منحنی A ) و دیگری برای احتمال عوارض بافت نرمال ( NTCP ) ( منحنی B ) این اصول شرح داده شده است .



اصل نسبت درمانی، منحنی A (TCP) و منحنی B احتمال عوارض را بیان می کند. دز کلینیکی کلی معمولاً در بخش های ۲ Gy داده می شود.

بهترین انتخاب و تکنیک انتقال دز در درمان تومور داده شده این است که دز دریافت شده ، TCT را به بیش ترین مقدار می رساند و هم زمان NTCP را به حداقل می رساند . برای پرتودرمانی خوب معمولاً ،  $TCP > 0.5$  و  $NTCP < 0.05$  است .

در شکل ، اگر منحنی B ( NTCP ) طرف راست منحنی A باشد آسان تر می توان به هدف پرتودرمانی رسید زیرا هرچه نسبت درمانی بالاتر باشد ، احتمال کم تری برای ایجاد پیچیدگی درمان وجود دارد . نسبت درمانی معمولاً به نسبت TCP و NTCP در یک سطح خاص پاسخ مربوط به بافت نرمال ( معمولاً ۰/۰۵ ) اشاره می کند .

شکل موقعیتی ایده آل را نشان میدهد ، در واقع منحنی TCP اغلب تا حدی کم ژرفاتر از منحنی NTCP است که به دلیل ناهمگنی تومورها نسبت به بافت نرمال است . علاوه بر این ، منحنی TCP 0 برای کنترل محلی تومورهای معین هرگز به مقدار ۰/۱ نمی رسد که این خود نتیجه ای از انتشار میکروسکوپی یا متاستازی بیماری زیر جایگاه تومور اولیه است . ضروری است که دزهای متوسط داده شده به بافت های نرمال کم تر از دزهای داده شده به تومورها نگه داشته شوند تا عوارض درمان به حداقل برسند و نتایج درمان بهینه شوند . در پرتودرمانی مدرن این مسئله با طراحی درمان سه بعدی پیشرفته ( معکوس یا مستقیم ) و دریافت دز ( کانفورمال یا مدولاسیون شدت بالا ) به دست می آید .

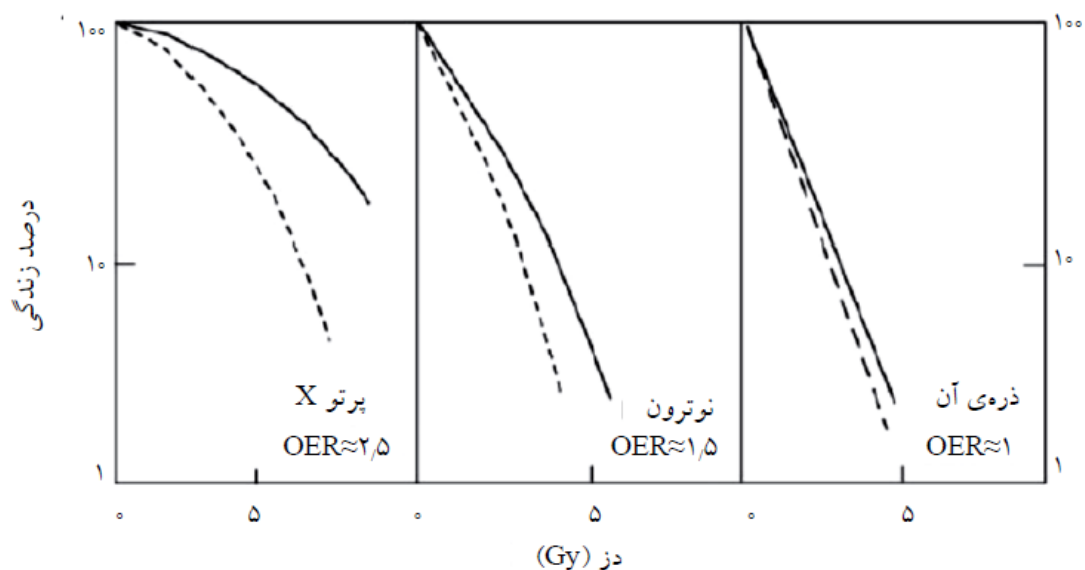
در روزهای اولیه پرتودرمانی معمولاً فرض بر این است که سلول های سالم به تک دز های پرتو حساس تر از سلول های توموری هستند ، هر چند این اصل قابل پذیرش است که سلول های بدخیم و سلول های سالم در پاسخ زودرس مقادیر مشابهی را ( گرچه با تغییرات فردی ) برای  $D_0$  حول 1.3 Gy ، با  $\alpha/\beta$  برابر با حدودا 10 Gy نشان می دهند .

این به دلیل واکنش های دیررس معمولی است که دنباله ی منحنی بقای سلول هدف به صورت مؤثری بزرگ تر از سلول های هدف در تومورها یا بافت های واکنش دهنده ی اولیه ، با  $\alpha/\beta$  حدودا 3 Gy هستند ، که در نتیجه باعث ایجاد تمایز شده و در پروتکل های با تقسیم دز فوق العاده بالا برای کاهش واکنش های تأخیری توسط کسرهای کوچک دز استفاده می شود .

نسبت درمانی با عوامل زیادی مانند آهنگ دز ، LET پرتوگیری ، حضور حساس کننده ها یا محافظت کننده ها از پرتو ، نقشه طرح درمان و دقت اجرای طرح درمان تغییر می کند .

#### اثر اکسیژن

حضور یا عدم حضور اکسیژن مولکولی در یک سلول اثر بیولوژیکی پرتوهای یونساز را تحت نفوذ خود قرار میدهد ، هرچه اکسیژن سلولی بیش تر از شرایط آنوکسی باشد ، اثر بیولوژیکی پرتوهای یونساز بیشتر است . به ویژه برای پرتوهای با LET پایین ، هرچه ترکیب با اکسیژن بالاتر از حد آنوکسی باشد ، اثر بیولوژیکی بیش تر از زمانی است که اثر اشباع اکسیژن رخ بدهد . چنان چه در شکل زیر نشان داده شده است این اثر کاملاً برای پرتوهای با LET پایین چشم گیر است ( یونیزاسیون پراکنده ) ، در حالی که برای پرتوهای با LET بالا ( یونیزاسیون فشرده ) این مسئله خیلی کم تر بیان می شود .

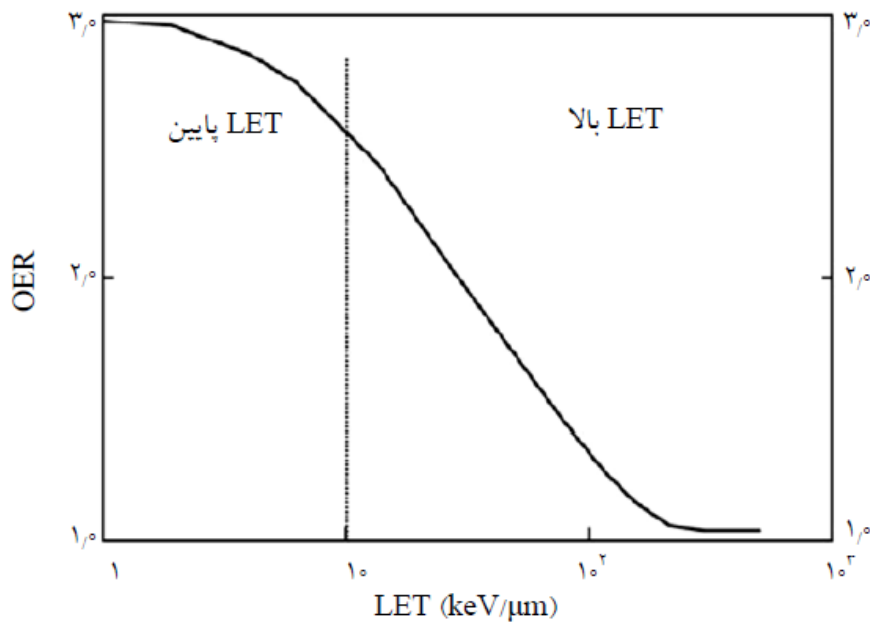


کسرهای بقای سلولی معمولی برای پرتوهای X، نوترون‌ها و ذرات  $\alpha$ : منحنی‌های با حروف خط‌چین برای سلول‌های به خوبی اکسیژن‌دار و منحنی‌های سیاه برای سلول‌های بدون اکسیژن هستند.

نسبت دزها با و بدون اکسیژن ( سلول‌های بی اکسیژن در مقابل سلول‌هایی که به اندازه ی کافی اکسیژن دارند ) برای تولید همان اثر بیولوژیک نسبت افزایش اکسیژن ( OER ) نامیده می شود .

$$\text{نسبت افزایش اکسیژن (OER)} = \frac{\text{دز برای ایجاد یک اثر معین بدون اکسیژن}}{\text{دز برای ایجاد همان اثر با اکسیژن}}$$

OER برای پرتوهای X و الکترون‌ها حدود ۳ در دزهای بالا است و برای دزهای ۱ – ۲ Gy به حدود ۲ کاهش پیدا میکند. OER با افزایش LET کاهش پیدا می کند و در حدود  $LET = 15 \text{ keV}/\mu\text{m}$  به  $OER = 1$  می رسد و در شکل زیر نشان داده شده است.



OER رسم شده در برابر LET. نقطه چین عمودی ناحیه‌ی با LET پایین را که در این جا  $LET < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  است از ناحیه‌ی با LET بالا جدا می کند. در این جا  $LET > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  است.

سلول هایی که در پیرامون بندهای تومور حول رگ های خونی رشد می کنند شدیداً بی اکسیژن می شوند که به دلیل مصرف بیشتر اکسیژن نزدیک رگ های خونی است . بسته شدن ناپایدار رگ های خونی می تواند بندهای تومور را برای چند دقیقه بی اکسیژن کند . باز ترکیبی اکسیژن مرحله ای است که در آن سلول هایی که بی اکسیژن هستند بعد از پرتوگیری اکسیژن دار می شوند .

#### اثر نسبی بیولوژیکی

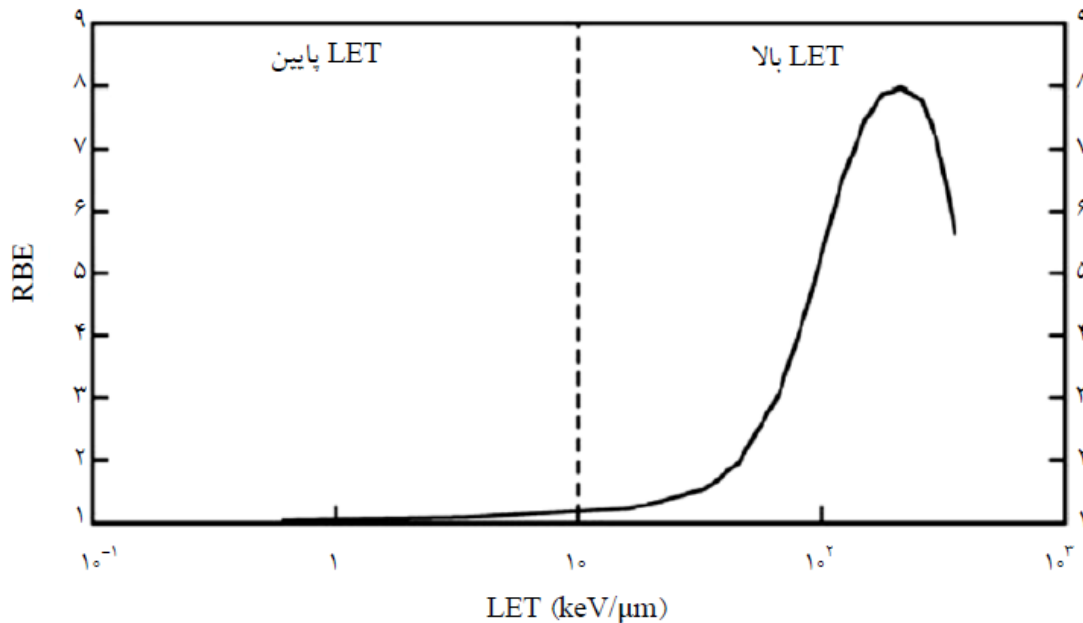
در صورتی که LET پرتوها افزایش پیدا کند قابلیت پرتوها برای تولید آسیب بیولوژیکی نیز افزایش پیدا می کند . اثر نسبی بیولوژیکی ( RBE ) دز پرتوهای آزمایشی را با دز پرتو استاندارد برای تولید همان اثر بیولوژیکی مقایسه می کند . پرتو استاندارد به صورت پرتو X 250 kVp به دلایل تاریخی در نظر گرفته می شود ؛ اما در حال حاضر توصیه می شود که پرتو گامای کبالت ۶۰ باشد . RBE با نسبت زیر تعریف می شود:

$$\text{دز پرتو استاندارد برای ایجاد اثر بیولوژیکی معین} = \frac{\text{اثر نسبی بیولوژیکی (RBE)}}{\text{دز پرتو آزمایش برای ایجاد همان اثر}}$$

RBE نه فقط با نوع پرتو بلکه با نوع سلول یا بافت ، اثر بیولوژیکی تحت مطالعه دز ، جریان دز و تقسیم دز تغییر می کند. معمولاً RBE با LET با رسیدن به بیش ترین مقدار RBE ، از ۳ الی ۸ ( وابسته به مرگ سلول ) در  $LET =$

200 keV/m افزایش پیدا می کند و سپس به دلیل قابلیت زیاد کشندگی انرژی چنان چه در شکل زیر نشان داده شده است ، کاهش پیدا می کند . افزایش در RBE خود به تنهایی مزیت درمانی خاصی را ارایه نمی دهد مگر اثر متمایزی وجود داشته باشد که با افزایش سطح نسبی مرگ سلولی

تومور و نسبت درمانی ، RBE را برای بافت سالم کوچک تر از بافت توموری کند .



RBE در برابر LET. خط عمودی نقطه چین ناحیه ی LET پایین با  $RBE \approx 1$  را از ناحیه ی LET بالا جدا می کند، جایی که RBE ابتدا با LET افزایش یافته و به قله ی حدود ۸ برای  $LET = 200 \text{ keV}/\mu\text{m}$  می رسد و سپس افزایش بیش تر LET کاهش می یابد.

#### آهنگ دز و تقسیم دز

برای دز پرتوهای یکسان ، پرتو داده شده در آهنگ دز پایین تر ممکن است مرگ سلولی کمتری را نسبت به پرتو داده شده در دز بالاتر به وجود آورد ، چون طی پرتوگیری طولانی بازسازی آسیب های غیرمهلک صورت می گیرد .

در صورتی که آهنگ دز کاهش پیدا کند ، شیب منحنی بقا سطحی تر می شود و قسمت دنباله ناپدید می شود ، اگرچه در صورتی که  $\beta \rightarrow 0$  تمایل یابد ، مدل درجه دوم خطی  $\alpha$  به صورت مشخصی تغییر نمی کند .

آهنگ های دز معمولی استفاده شده در درمان با پرتو این مراتب را دارند :

1 Gy/min درمان با پرتو استاندارد و براکی تراپی با آهنگ دز بالا (HDR) ،

0.1 Gy/min در TBI ،

0.01 Gy/min در براکی تراپی با آهنگ دز پایین (LDR).

تقسیم دز درمان که در دوره های چندین هفته به جای یک جلسه داده می شود ، منجر به نسبت درمانی بهتر می شود . هرچند برای دست یابی به سطح دلخواه آسیب بیولوژیکی ، دز کامل به صورت درمان تقسیم بندی باید بزرگ تر از دز درمان تک جلسه ای باشد .

پایه ی تقسیم بندی دز در پنج فاکتور بیولوژیکی ریشه دارد که پنج R پرتودرمانی نامیده می شود :

- حساسیت به پرتو: سلول های پستاندار حساسیت های متناوب دارند.
- ترمیم: سلول های پستاندار آسیب پرتو را ترمیم می کنند. این مرحله ی پیچیده شامل ترمیم آسیب غیرمهلک ، با روش های گوناگون ترمیم آنزیم ها و مسیرها است .
- بازتکثیری: سلول ها وقتی که دزهای تقسیم شده ی پرتو را دریافت می کنند ، تجدید می شوند.
- توزیع مجدد: توزیع مجدد در جمعیت سلولی کثیر در فازهای چرخه ی سلولی ، مرگ سلولی از درمان با تقسیم بندی دز را نسبت به درمان تک جلسه ای افزایش می دهد.
- بازترکیبی با اکسیژن: در سلول های بی اکسیژن طی مسیر تقسیم بندی شده در درمان بازترکیبی با اکسیژن رخ میدهد که آن ها را برای دزهای بعدی پرتو دهی به پرتو بیش تر حساس می کند.
- تقسیم بندی دز متداول به صورت زیر شرح داده می شود : تقسیم دز به چند جزء ، بافت های سالم را با ترمیم آسیب غیرمهلک بین کسرهای دز و بازتکثیری سلول ها حفاظت می کند . این قالب برای بافت های واکنش دهنده ی دیررس بزرگ تر از بافت های واکنش دهنده ی زودرس است . در تقسیم بندی دز ، آسیب تومور را با باز ترکیبی اکسیژن و توزیع مجدد سلول های تومور افزایش می دهد . یک تعادلی بین پاسخ تومور و بافت های سالم واکنش دهنده ی زودرس و دیررس به دست می آید . بین پاسخ تومور و بافت های نرمال واکنش دهنده ی زودرس و دیررس تعادل وجود دارد به طوری که دزهای کوچک در هر جلسه بر بافت های واکنش دهنده ی دیررس بی اثر بوده و یک برنامه ریزی زمانی منطقی اجازه ی بازتکثیری به بافت های واکنش دهنده ی زودرس داده و باعث بازترکیبی با اکسیژن می شود .

تقسیم بندی دز استاندارد رایج براساس پنج جلسه درمان در هفته و یک زمان درمان چندین هفته ای است . این رژیم درمانی بازتاب دهنده ی جنبه ی عملی انتقال دز به بیمار و باعث موفقیت در درمان بیماری و راحتی پرسنل برای اجرای درمان است .

دیگر شماهای تقسیم بندی دز با هدف بهبود نسبت درمانی مطالعه می شود . بعضی از این ها تقسیم بندی دز به مقدارهای کم در هر جلسه ، تقسیم بندی دز شتاب دار و چارت هستند .

( ۱ ) درمان توسط تقسیم بندی دز نسبت به یک جلسه درمان ، به دز کم در هر روز نیاز دارد ( کم تر از  $1/8$  Gy ) تا عوارض طولانی مدت کاهش یافته و دریافت جمع دز بالا را امکان پذیر کند .

( ۲ ) تقسیم بندی دز شتاب دار ، زمان درمان کلی را با کاهش بازتکثیری سلول تومور طی مسیر درمان کاهش می دهد .

( ۳ ) چارت ( درمان با پرتو شتاب دار با تقسیم بندی زیاد جلسات درمان پیوسته ) برنامه ای تجربی است که سه جلسه درمان در روز برای ۱۲ روز پیوسته را استفاده می کند .

حساس کننده به پرتو و محافظت کننده از پرتو

عناصر شیمیایی مختلف ممکن است پاسخ سلول به پرتوهای یونساز را با کاهش یا افزایش پاسخ سلول افزایش دهند . عناصر شیمیایی که پاسخ سلول به پرتو را کاهش دهند ، محافظت کننده از پرتو نامیده می شوند . آن ها معمولاً اثرات غیرمستقیم پرتو را با تضعیف کردن تولید رادیکال های آزاد ، تحت نفوذ خود قرار می دهند . فاکتور اصلاح دز ( DMF ) به صورت زیر تعریف می شود :

دز برای تولید یک اثر با محافظت کننده از پرتوها  
- فاکتور اصلاح دز (DMF)  
دز برای ایجاد همان اثر بدون محافظت کننده از پرتوها

عناصر شیمیایی که پاسخ سلول به پرتو را بالا می برند ، حساس کننده به پرتو نامیده می شوند و معمولاً اثرات مستقیم و غیرمستقیم پرتو را بالا می برند . مثال هایی از این نوع ، پریمیدین های هالوژنه شده که بین توده های DNA جا داده و مانع ترمیم می شوند ، و حساس کننده ی پرتو سلولی بدون اکسیژن هستند که مثل اکسیژن عمل می کنند .

نوع دیگر حساس کننده به پرتو مؤلفه هایی است شامل بور ، که اثرات درمان با پرتو نوترون حرارتی را بالا می برد . بور-۱۰ سطح مقطع بالایی برای برهم کنش با نوترون های بالاتر دارد ( انرژی جنبشی از مرتبه ی  $0.025$  eV ) و



وقتی که نوترون حرارتی با بور-۱۰ برهم کنش می کند ، هسته ی ناپایدار بور-۱۱ تشکیل می شود که متحمل شکافت می شود و ذرات  $\alpha$  تولید می کند که دز بالایی را بدون واسطه به ترکیب مجاور شامل بور انتقال می دهد . این درمان نوترون تسخیری بور ( BNCT ) از سال ۱۹۵۰ مورد تحقیق قرار گرفته است ، هر چند کاربردهای کلینیکی موفقیت آمیزی هنوز به دست نیامده است .

### ایمنی و حفاظت در برابر پرتوها در پرتودرمانی

پس از کشف پرتو های X توسط رونتگن در سال ۱۸۹۵ و رادیواکتیویته ی طبیعی به دست بکرل در سال ۱۸۹۶ ، معلوم شد که پرتوهای یونساز نه تنها برای تشخیص و درمان بیماری ها مفید هستند ، بلکه برای بافت های بدن خطرناک نیز هستند . از تحقیقات اولیه بر روی پرتو X و مواد رادیواکتیو مشخص شد که پرتوگیری سطوح بالای پرتو می تواند باعث آسیب بالینی بر روی بافت بدن شود . علاوه بر آن ، تحقیقات طولانی مدت اپیدمیولوژی بر روی جمعیت هایی که در معرض پرتو قرار گرفته اند ، به خصوص بازماندگان بمباران اتمی هیروشیما و ناکازاکی در ژاپن در سال ۱۹۴۵ ، بیانگر این مطلب است که پرتوگیری ، پتانسیل اثرات تاخیری نظیر القا بدخیمی یا آسیب به مواد ژنتیکی دارد .

پرتوهای یونساز و مواد رادیواکتیو یک جنبه ی دائمی و طبیعی از محیط اطراف هستند . بنابراین احتمال خطر پرتوگیری فقط محدود می شود ؛ ولی کاملاً حذف نمی شود . علاوه بر آن ، استفاده از مواد رادیواکتیو ساخت انسان در حال گسترش است . چشمه های پرتوهای یونساز در مراقبت بهداشتی مدرن ضروری است . ملزومات یک بار مصرف پزشکی که به وسیله ی پرتو شدید استریلایز می شوند عامل اصلی مبارزه با بیماری است . رادیولوژی و پزشکی هسته ای وسایل حیاتی تشخیصی هستند و پرتودرمانی قسمت معمول درمان تومورهای بدخیم است . کاربرد پرتوهای یونساز در صنعت ، کشاورزی ، پزشکی و در خیلی از جنبه های صنعتی و تحقیقاتی در حال افزایش است که مفید بشر است . پرتودهی در اطراف دنیا برای محافظت از مواد غذایی و کاهش ضایعات ، و برای تکنیک های استریلایزاسیون استفاده می شود تا حشرات بیماری زا و آفات را ریشه کن کند . رادیوگرافی صنعتی استفاده ی معمول داشته ، برای مثال در آزمایش جوشکاری ها ، تشخیص ترک خوردگی ها و کمک به پیشگیری از شکست ساختارهای مهندسی استفاده می شود .

مقبولیت در جامعه از احتمالات خطر همراه با پرتو ، مشروط به مزایای به دست آمده از پرتو است . با وجود این ، احتمالات خطر باید محدود شده و در مقابل کاربرد پرتو ، حفاظت های ایمنی استاندارد به دست آید . بنابراین ضروری است که فعالیت هایی که درگیر پرتوگیری هستند تحت کنترل استانداردهای ایمنی خاص قرار گیرند تا کسانی که

تحت پرتوگیری مربوط به شغل برای اهداف تشخیصی پزشکی یا درمانی یا اعضای جامعه ی عمومی هستند از پرتوها محافظت شوند .

#### اثرات پرتوها

پرتوگیری منجر به اثرات زیان بخش در سلامتی می شود و به دو گروه تقسیم می شود :

قطعی و تصادفی .

#### اثرات قطعی

در دزهای بالا اثرات پرتوها مانند تهوع ، قرمزی پوست یا در موارد جدی نشانه های حاد بالینی که بیانگر پرتوگیری شخصی در فاصله ی زمانی کم پس از پرتودهی هستند ، این اثرات قطعی نامیده می شوند ، زیرا این ها مطمئناً به دلیل افزایش دز از حد آستانه اتفاق افتاده اند .

اثرات قطعی نتیجه ی فرایندهای مختلفی هستند که مهم ترین آن ها مرگ سلولی یا تعویق تقسیم سلولی ناشی از پرتوگیری سطوح بالای پرتو است . این اثرات اگر به اندازه ی کافی شدید باشد به عملکرد بافت های پرتودیده آسیب می رسانند . جدی بودن اثر قطعی هنگام پرتوگیری شخصی با بالا بودن دز از حد آستانه برای بروز اثر افزایش می یابد .

#### اثرات تصادفی

پرتوگیری باعث القای اثرات تعویقی می شود ، نظیر تومورهای بدخیم که به منزله ی زمان نهفتگی بیان می شود و ممکن است به صورت اثرات جمعی در جمعیت دیده شود . این القا ، فرض می شود که پس از یک حد دز بدون سطح آستانه اتفاق می افتد . اثرات ارثی ناشی از پرتوگیری می تواند به صورت آماری در سایر جمعیت های پستاندار بررسی شده و فرض شود که در یک جمعیت انسانی نیز همانگونه باشد . این تشخیص همه گیرشناسی اثرات ( تومورهای بدخیم و اثرات ارثی ) بیانگر اثرات تصادفی بوده زیرا به صورت تصادفی اتفاق می افتند .

اثرات تصادفی ممکن است به جای کشتن سلول باعث تغییر در سلول پرتودیده شود . سلول تغییر یافته ممکن است پس از یک دوره وقفه به سلول سرطانی تبدیل شود . مکانیسم بازسازی بدن در مورد دزهای ( پرتو ) کم این اثر را خنثی می کند . در عین حال هیچ شواهدی از حدود پایین دز برای عدم به وجود آمدن سرطان در دسترس نیست . احتمال ایجاد سرطان با بالا رفتن دز افزایش می یابد ؛ اما خطر هرگونه سرطان بر اثر پرتو مستقل از دز است . اگر سلول آسیب دیده بر اثر پرتوگیری یک سلول اولیه باشد که عملکردش انتقال اطلاعات ژنتیکی به سلول فرزند است ، اثرات وراثتی متفاوتی ممکن است در نسل های بعد از فرد پرتودیده رخ دهد . فرض می شود که احتمال وقوع اثرات تصادفی با دز دریافتی متناسب است بدون این که حد پایینی برای آن مشخص شود .

بسیاری از جنبه های زیان آور در مفهوم پرتو باعث شده که انتخاب کمیت برای آن دلخواه نباشد . مفهوم زیان های پرتو که به وسیله ی ICRP برای اثرات تصادفی پیشنهاد شده است ، عبارت اند از احتمال سرطان کشنده به دلیل پرتوگیری ، افزایش احتمال ابتلا به سرطان غیرکشنده ، افزایش احتمال اثرات وراثتی جدی و کاهش طول عمر اگر این خطرات به وجود آید .

#### اثرات بر روی نطفه و جنین

علاوه بر اثرات قطعی و تصادفی بر سلامت افراد بزرگسال، ممکن است اثرات دیگری بر روی نوزادانی که در زمان جنینی پیش از هشت هفته یا پس از آن در معرض پرتو قرار گرفته اند روی دهد . این اثرات شامل افزایش بسیار زیاد احتمال سرطان خون ( اثر تصادفی ) و برای پرتوهای بالاتر از مقادیر متفاوت حد دز در طول دوره ی خاصی از حاملگی ممکن است عقب ماندگی ذهنی جدی و ناهنجاری های مادرزادی ( اثرات قطعی ) روی دهد . برای جزییات بیشتر در مورد اثرات پرتو بر روی جنین به مقاله ی ICRP 84 مراجعه شود .

#### انواع پرتوگیری ها

برخی حرفه های پزشکی و صنعتی خاص منجر به پرتوگیری با اندازه های پیش بینی شده ، البته با چند درجه عدم دقت ، می شوند که این پرتوهای قابل پیش بینی در BSS به منزله ی پرتوهای نرمال در نظر گرفته می شوند ( International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources ) .

علاوه بر آن ، می توان مواردی را در نظر داشت که ممکن است پتانسیل پرتوگیری داشته باشند ؛ اما قطعیتی در مورد وقوع آن ها وجود ندارد . این پرتوگیری های ناخواسته اما ممکن ، به جای پتانسیل های پرتوگیری شناخته می شوند . پتانسیل های پرتوگیری در موقعیت های غیرقابل انتظار باعث پرتوگیری عملی می شوند . برای مثال به دنبال خرابی دستگاه ، مشکلات طراحی یا خطاهای اجرایی اتفاق می افتد .

وسایلی که در BSS برای کنترل پرتوگیری های عادی مشخص شده اند دز انتقالی را محدود می کنند . در مورد پرتوگیری بیماران ، پرتوگیری فقط با انتقال دز لازم برای دست یابی به اهداف تشخیصی یا درمانی صورت می گیرد .

تمهیدات لازم برای کنترل پتانسیل های پرتوگیری با بهینه سازی طراحی نصب ، تجهیزات و فرایندهای عملکرد با اهداف ذیل صورت می گیرد :

□ محدود کردن احتمال وقوع حوادثی که منجر به پرتوگیری ناخواسته شود ،

□ محدود کردن شدت پرتوگیری در صورتی که این حوادث رخ دهد.

پرتوگیری به هر دو صورت طبیعی و بالقوه که شامل پرتوگیری های BSS است ، عبارت اند از :

□ کارکنانی که به دلیل شغلشان پرتوگیری می کنند (پرتوگیری شغلی) ،

□ بیمارانی که به دلیل تشخیصی یا درمانی پرتوگیری می کنند (پرتوگیری پزشکی) ،

□ افراد جامعه.

بنابراین پرتوگیری به سه گروه تقسیم می شود :

( ۱ ) پرتوگیری شغلی که شامل تمام پرتوگیری های کارکنانی است که به دلیل شغل خود دریافت می کنند ( به استثنا پرتوگیری هایی که توسط BSS مستثنی شده اند و پرتوگیری های ناشی از تمرین ها یا منابعی که توسط BSS معاف شده اند ) .

( ۲ ) پرتوگیری پزشکی شامل مواردی است که به صورت ذیل اتفاق می افتد :

□ توسط بیماران به عنوان بخشی از تشخیص پزشکی یا دندانپزشکی یا بیماری ،

□ توسط افرادی غیر از کسانی که به دلیل شغلشان پرتوگیری می کنند ، هنگامی که با اطلاع از پرتوگیری به صورت داوطلبانه برای کمک یا حمایت بیماران دریافت می کنند ،

□ توسط داوطلبان برنامه های تحقیقاتی بیوپزشکی که درگیر پرتوگیری می شوند.

( ۳ ) پرتوگیری افراد جامعه که به عنوان پرتوگیری افراد عمومی از چشمه های پرتویی شناخته می شود ، که پرتوگیری شغلی یا پزشکی و پرتوهای طبیعی زمینه محلی معمول مستثنی هستند ، اما شامل پرتوگیری از چشمه های مجاز و انجام کارها و ناشی از موقعیت های مداخله ای می باشد .

### چارچوب پایه برای حفاظت در برابر پرتو

قوانین حفاظت در برابر پرتو و ایمنی مطابق استانداردهای ایمنی پرتوها بر اساس قوانین تعمیم یافته در ICRP است . جزییات رابطه ها و قوانین در نشریه های ICRP آمده است و نمی توان آن ها را به راحتی بدون از دست دادن ماهیتشان تفسیر کرد . گرچه این قوانین به صورت مختصر و ساده شده در این بخش آمده است .

عملیاتی که شامل پرتو گیری است تنها زمانی باید انجام شود که فواید آن به اندازه ی کافی زیان وارده از پرتو یا احتمال زیان پرتوهای فردی یا جامعه را جبران کند ( یعنی عملیات باید قضاوت شود ) .

دزهای فردی ناشی از پرتوهای ترکیبی از تمام عملیات های وابسته نباید از مقدار دز محدود شده برای پرتو های شغلی و عمومی تجاوز کند ، محدودیت های دز برای پرتو های پزشکی قابل اعمال نیست . چشمه های پرتو ی و تأسیسات آن ها باید با بهترین اندازه گیری های حفاظتی و ایمنی در شرایط متداول همراه باشند تا این که بزرگی و احتمال پرتوها و تعداد پرتو گیری های فردی تا پایین ترین حد مقبول حاصل شود و فاکتورهای اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده و احتمال زیان دزهایی که انتقال می دهند محدود شود ( یعنی حفاظت و ایمنی باید بهینه شود ) :

□ در پرتوگیری های پزشکی تشخیصی ، بهینه سازی حفاظت با پایین نگه داشتن پرتو در حد کمینه ، لازم به دست یابی برای اهداف تشخیصی قابل دسترسی است ،

□ در پرتوگیری های پزشکی درمانی ، بهینه سازی با نگه داشتن پرتو بافت های عادی در حد سازگار با قانون ALARA (تا حد امکان پایین) با انتقال دز لازم به حجم هدف درمان (PTV) قابل دسترسی است (با توجه به نیازمندی های BSS در ضمیمه ی II).

چنان چه در قسمتهای بعدی خواهد آمد ، کارکنان باردار باید طوری حفاظت شوند که جنین کم تر از هشت هفته و بیش تر از هشت هفته همان حفاظت لازم برای اعضای جامعه عمومی را دریافت کند .

فرهنگ حفاظتی باید طوری تبیین شود تا رفتارها و طرز برخورد در رابطه با حفاظت و ایمنی تمام افراد و سازمان هایی که با چشمه های پرتوی درگیر هستند اصلاح شود . اندازه گیری های عمیق دفاعی باید در فرایندهای طراحی و عملکردی برای چشمه های پرتوی اجرا شوند تا پتانسیل های شکست در اندازه گیری های حفاظتی و ایمنی جبران شود و حفاظت و ایمنی با مهندسی و مدیریت خوب ، تضمین کیفیت ، آموزش ها و صلاحیت های کارکنان ، ارزیابی ایمنی جامع و توجه به دروس فراگرفته از تجربیات و تحقیقات باید اجرا شوند .

محدودیت های دز به پرتوهای پزشکی اعمال نمی شود و به کنترل پتانسیل های پرتو وابسته نیست ، همچنین به تصمیم گیری در مورد چگونگی در نظر گرفتن دخالت ها نیز وابسته نیست ؛ اما کارکنان درگیر در دخالت ها باید مطیع نیازمندی های وابسته در ضمیمه ی ۷ مربوط به BSS باشند . در جدول زیر مقادیر محدودیت های دز سالانه به صورت خلاصه آمده است .

خلاصه ی محدودیت های دز سالانه براساس جدول II گزارش BSS و گزارش ICRP شماره ی ۶۰ (جدول ۶، صفحه ی ۴۶).

پرتوگیری عمومی	پرتوگیری کارآموزهای سنین ۱۶-۱۸	پرتوگیری شغلی	دز مؤثر (کل بدن) (mSv)
۱، به صورت متوسط در ۵ سال متوالی و ۵ در یک سال**	۶	۲۰، به صورت متوسط در ۵ سال متوالی و ۵۰ در یک سال*	
۱۵	۵۰	۱۵۰	دز معادل (عدسی چشم) (mSv)
۵۰	۱۵۰	۵۰۰	دز معادل (دست ها، پاها، پرست) (mSv)

\*. دز مؤثر متوسط در طول ۵ سال متوالی نباید از ۱ mSv/a تجاوز کند.

\*\* دز مؤثر متوسط در طول ۵ سال متوالی نباید از مقدار ۱ mSv/a تجاوز کند.

#### قوانین دولتی و سازمان های ملی

سازمان BSS نیازمندی هایی را برای افرادی تعیین کرده است که مجوز قانونی برای کار با پرتوها یا دخالت در کاهش پرتوگیری دارند . این افراد قانونی مسئولیت های اولیه ی به کارگیری استانداردهای دولتی را دارند ، گرچه مسئولیت تأیید این قوانین معمولاً از طریق سیستمی است که صلاحیت قانونی دارد.

صلاحیت افراد قانونی برای اجرای عملیات ممکن است به شکل ثبت نام یا مجوز باشد . تفاوت بین ثبت نام و مجوز در این است که مجوز نیاز به ارزیابی ایمنی مشخص بیش تری دارد . بنابراین افراد مجاز قانونی به نام ثبت نامی و مجوز دار خوانده می شوند . در مورد پرتودرمانی اجازه ی قانونی معمولاً به شکل مجوز است .

علاوه بر این ، سازمان های ملی شامل خدمات خاصی نظیر دزیمتری شخصی ، خدمات کالیبراسیون و مقایسه ی داخلی تجهیزات اندازه گیری پرتوها هستند . تدارک این خدمات در سطح ملی باعث کاهش مسئولیت نهایی حفاظت در برابر پرتو و ایمنی افراد قانونی که مجوز دارند برای اجرای این عملیات ها نمی شود .

محدوده ی استانداردهای ایمنی پایه

در پاراگراف ۱-۳ از BSS ( نیازمندی های اساسی ، محدوده ) میان عبارت های دیگر ، بیان می کند :

« استانداردهایی که به عملیات ها اعمال می شود ، شامل هرگونه چشمه ای در عملیات ، و دخالت هایی که :

۱. به گونه ای اجرا می شود که بین قبول استانداردها یا هر نوع نیازمندی هایی که سازمان های مسئول برای اعمال استانداردها تأمین می کنند یکی را انتخاب می کند ،

۲. به گونه ای عهده دار مسئولیت با کمک FAO ، IAEA ، ILO ، PAHO یا WHO در پرتو قواعد و قوانین وابسته ی ملی باشد ،

۳. با مشارکت IAEA اجرا شود و درگیر استفاده از مواد ، خدمات ، تجهیزات ، امکانات و اطلاعات منتشر نشده ی قابل دسترس از IAEA باشد یا با تقاضای IAEA یا تحت نظارت یا کنترل IAEA باشد ... »

مسئولیت های به کارگیری نیازمندی های استانداردهای ایمنی پایه

در پاراگراف ۱-۶ از BSS ( نیازمندی های اساسی ، مسئولیت های طرفین ) گفته شده است :

« طرفین قانونی مسئولیت هایی برای اعمال استانداردها در مورد افراد زیر دارند :

۱. ثبت نام کننده ها یا دارندگان مجوز ، و

۲. کارکنان . »

در پاراگراف ۱-۷ از BSS ( نیازمندی های اساسی ، مسئولیت های طرفین ) گفته شده است :

« سایر طرفین ، مسئولیت های فرعی برای اعمال استانداردها دارند . این طرفین ممکن است در صورت مناسب شامل افراد ذیل باشند :

۱. فروشندگان ،

۲. کارکنان ،

۳. مسئولین حفاظت در برابر پرتو ،

۴. کارکنان پزشکی ،

۵. متخصصین سلامت ،

۶. کارشناسان واجد شرایط ،

۷. کمیته های بررسی اخلاق ،

۸. هرکسی که نماینده ی یکی از طرفین اصلی با مسئولیت های به خصوص باشد . «

ایمنی همراه با آزمون های مقبولیت، اجرا و عملکرد

پس از نصب تجهیزات ، آزمون های مقبولیت برای بررسی مطابقت مشخصه های تکنیکی با مقادیر داده شده در کارخانه و اجابت نیازمندی های ایمنی استاندارد IEC باید انجام شود . معمولاً تا زمانی که فرایند مقبولیت کامل شود تجهیزات متعلق به سازنده است . آزمون ها به وسیله ی نماینده ی کارخانه در حضور کارکنانی انجام می شود که نماینده ی استفاده کننده ( متخصص واجد شرایط در فیزیک پرتودرمانی ) هستند و در مورد مقبولیت تصمیم می گیرند . اولین آزمون در مقبولیت وسایل گسیلنده ی پرتوها بررسی دقیق محیط اطراف اتاق درمان که دستگاه گسیلنده ی پرتوها را دربر گرفته است .

آزمون هایی که شامل پروتکل مقبولیت هستند باید در شرایط خرید و قرارداد گنجانده شوند و وظایف سازنده به صورت واضح برای حل هرگونه عدم تطبیق در حین آزمون های مقبولیت مشخص شود . آزمون های سطح B و سطح C را که در استاندارد IEC برای دستگاه مشخص قید شده است ، می توان در نقش راهنما برای آماده سازی آزمون های پروتکل استفاده کرد .

پس از مقبولیت و قبل از شروع به کار ، کالیبراسیون چشمه های رادیواکتیو و باریکه های پرتوی به همراه عملکرد آن ها اجرا می شود . این مرحله برای ایمنی بیمار بسیار بحرانی است . چنان چه حوادث پرتوگیری نشان داده است و در برخی موارد تعداد بسیار زیادی از بیماران را درگیر کرده است ، در آن انجام کالیبراسیون یا صورت نگرفته یا به صورت ضعیف انجام شده است ( سری های گزارش ایمنی IAEA شماره ی ۱۷ را ببینید ) . در حین انجام آزمون متخصصین واجد شرایط در فیزیک پرتودرمانی تمام داده های لازم برای استفاده ی بالینی از دستگاه شامل داده های مورد استفاده در سیستم طراحی درمان ( TPS ) را اندازه گیری می کنند .



آزمون های مقبولیت و عملکرد تنها در مورد تجهیزات گسیلنده ی پرتوها یا چشمه ها اعمال نمی شود ؛ بلکه برای هر سیستمی که مستلزم ایمنی است مانند سیستم طراحی درمان ( TPS ) نیز اعمال می شود . عملکرد غیرمناسب سیستم طراحی درمان ( TPS ) موجب چندین حادثه ی پرتوگیری بیش از حد یا کم تر شده است که هر دو در خروجی درمان مؤثر بودند .

کنترل های کیفی نیازمند پیروی از پروتکل های کنترل کیفی ایجاد شده به شرح ذیل هستند :

□ به صورت دوره ای تحت شرایط عملکرد عادی ،

□ پس از نصب یا جایگزینی چشمه ،

□ پس از انجام تعمیر یا سرویس بر روی دستگاه درمان که امکان تغییر در خروجی پرتو را ایجاد کرده باشد.

تجهیزات باید مطابق مدارک تکنیکی عمل کنند و عملکرد آن ها از نظر وظایف محوله و ایمنی پرتوی باید رضایت بخش باشد . به خصوص دستورالعمل کارخانه و هرگونه فرایندهای اضافی باید طبق سیستم تضمین کیفی در ساختار ملی یا بین المللی که مسئول تأیید دستگاه های گسیلنده ی پرتوها است ، مورد تأیید قرار گیرد ) .

آزمون نشتی چشمه های بسته قبل از اولین استفاده و در دوره های منظم پس از آن طبق ISO ۹۹۷۸ باید انجام شود . آزمون نشتی باید توانایی تشخیص وجود آلودگی قابل رفع در حد  $0/2 \text{ kBq}$  از چشمه ی بسته را داشته باشد :

□ برای چشمه های دستی براکی تراپی روش معمول آزمون مستقیم زدودن رطوبت است.

□ برای پرتودرمانی باریکه ی خارجی و براکی تراپی کنترل از راه دور روش مورد استفاده ی آزمون زدودن غیرمستقیم از نزدیک ترین سطح قابل دسترسی است.

□ برای چشمه های رادن-۲۲۶ آزمون های برون دهی گاز و شناوری کافی هستند ، گرچه رادن-۲۲۶ باید هرچه زودتر با رادیونوکلیدهای دیگر جایگزین شود.

فرایند استرلیزاسیون در براکی تراپی باید مناسب بوده تا از خرابی چشمه و اپلیکاتورها که بر روی ایمنی اثرگذار است ، اجتناب شود .

#### ایمنی چشمه ها

در پاراگراف ۲-۳۴ از BSS ( نیازمندی های عملیات ها ، نیازمندی های تکنیکی ) آمده است :

« چشمه ها باید به صورت ایمن نگه داری شوند تا از خرابی و سرقت جلوگیری شود و هم چنین از دسترسی افراد غیر قانونی جلوگیری شود و برای اجرای عملیات های به خصوصی که در تعهدات عمومی برای عملیات استانداردها باید از موارد ذیل اطمینان حاصل شود :

۱. کنترل چشمه نباید قبل از مطابقت همه ی نیازمندی های مشخص شده در ثبت نام و مجوز ترک شود و اطلاعات مربوط به عدم کنترل ، گم شدن ، سرقت یا از دست دادن چشمه فوراً به مرجع قانونی اطلاع داده شود ،

۲. چشمه تا قبل از در اختیار داشتن مجوز معتبر به دریافت کننده نباید منتقل شود ، و

۳. لیست موجودی چشمه های منقول در وقفه های مناسب باید تهیه شود تا از قرار داشتن آن ها در مکان مقرر و ایمن اطمینان حاصل شود . »

هدف از ایمنی چشمه تضمین ادامه ی کنترل و ذی حسابی هر چشمه در تمام زمان ها است تا نیازمندی های گفته شده در پاراگراف ۲-۲۸ BSS حاصل شود . تدارکات مخصوص در شرایطی که منجر به از دست دادن کنترل در حوادث می شوند عبارت اند از :

□ ذخیره سازی چشمه ها قبل از نصب ،

□ توقف موقت یا دائم در استفاده ،

□ ذخیره سازی هنگام انتظار جهت تصمیم برای مرجوع کردن یا انهدام چشمه ،

□ چشمه های براکی تراپی باقی مانده در بیمار ، لباس ها ، ملحفه های تخت یا ناحیه ی درمان.

برای برآوردن این نیازمندی ها ، دارنده ی مجوز نیازمند گسترش فرایندهای تضمین ایمنی تبادل و انتقال چشمه های رادیواکتیو درون مؤسسه و ایجاد کنترل برای جلوگیری از سرقت ، مفقود شدن ، خارج کردن غیرقانونی یا خرابی چشمه ها ، یا ورود افراد غیرمجاز به محوطه ی کنترل است .

دارنده ی مجوز هم چنین نیازمند چک کردن تعداد چشمه های درون محفظه در هنگام جابه جایی و بازگشت چشمه ها است و باید لیست فیزیکی از موجودی تمام چشمه های بسته تهیه کند تا از حضور و ایمنی آن ها در مکان مقرر مطمئن شود . دارنده ی مجوز هم چنین باید وقایع انتقال چشمه با زمان انتقال ، نام بیمار و بازگشت چشمه را ثبت کند .

تجهیزات پرتودرمانی باید به سیستم های ایمنی مجهز شود که قادر به جلوگیری از استفاده افراد غیرمجاز باشد . کلیدی برای فعال کردن سیستم لازم است و دسترسی به آن باید محدود به کارکنان مجاز باشد . هرگونه از دست دادن چشمه باید فوراً به مسئول حفاظت در برابر پرتو گزارش شود که او نیز به مقام قانونی گزارش می دهد . تمام ملحفه ها ، پوشش ها ، لباس ها ، تجهیزات و ظروف پسماند باید درون اتاق براکی تراپی بیمار تا زمان انجام چک و سندیت دادن این که هیچ چشمه ای به آن ها نچسبیده باقی بمانند .

#### پرتوگیری های شغلی

جزئیات نیازمندی های حفاظت در برابر پرتوگیری های شغلی در BSS آمده است ، در حالی که توصیه های چگونگی دست یابی به این نیازمندی ها در راهنمای ایمنی در حفاظت در برابر پرتو گیری های شغلی IAEA ، سری های استاندارد ایمنی شماره ی RS-G-1.1 و راهنمای ایمنی IAEA در ارزیابی پرتوگیری های شغلی ناشی از چشمه های خارجی پرتوزا ، سری های استاندارد ایمنی شماره ی RS-G-1.3 آمده است .

#### مسئولیت ها و شرایط سرویس

طرفین مسئول برای حفاظت در برابر پرتوگیری های شغلی نه تنها فقط دارندگان مجوز نیستند ؛ بلکه کارفرماها نیز هستند . در برخی موارد کارفرما و دارنده مجوز شخصی قانونی است ؛ اما در سایر موارد ممکن است متفاوت باشند . برای مثال کارفرمای نگه داری و تعمیر مهندسی ممکن است شرکت نگه داری و تعمیر باشد ، در حالی که مهندسین تعمیر و نگه داری در اغلب بخش های پرتودرمانی کار می کنند و هرکدام تحت نظر دارنده ی مجوز متفاوتی هستند .

#### مراتب بررسی برای پرتوگیری کارکنان در پرتودرمانی

مراتب بررسی ابزاری هستند که برای ایجاد علائم هشدار در موارد نیاز به بازبینی فرایندها و کارایی استفاده می شوند و در مورد این که چه چیزی در حد انتظار کار نمی کند و مدت زمانی برای تصحیح عمل گرفته می شود ، بررسی می کنند . در پرتودرمانی ، کمیت مناسب برای استفاده در مرتبه ی بررسی ، دز مؤثر ماهانه است ؛ اما دز دست ها می توانند به عنوان یک کمیت مرتبه ی بررسی برای کارکنان در براکی تراپی دستی استفاده شوند . در بخش های پرتودرمانی که کارکنان گروه های مختلف برای یک کار یا وظیفه ی مخصوص اختصاص دارند ، مراتب بررسی متفاوتی برای وظایف متفاوت در نظر گرفته می شود . در ذیل مثال هایی از وظایفی در این مورد و سطوح آن ها که به ندرت از آن ها تجاوز می کنند و بنابراین می توانند به عنوان مراتب بررسی استفاده شوند ، آمده است :

□ کارکنانی که فقط با شتاب دهنده ها یا براکی تراپی کنترل از راه دور کار می کنند ، مرتبه ی بررسی ماهانه ی دز مؤثر 0.2 mSv است ،

□ کارکنانی که با پرتودرمانی باریکه ی خارجی کبالت-۶۰ ، پرستاران براکی تراپی و افرادی که چشمه های براکی تراپی دستی را وارد یا خارج می کنند ، مرتبه ی بررسی ماهانه ی دز مؤثر 0.4 mSv است.

#### حاملگی کارکنان

در پاراگراف I-16 از BSS ( ضمیمه ی I ، پرتوگیری های شغلی ، شرایط سرویس ) گفته شده است که :

« کارکنان مؤنث باید هنگام آگاهی از حاملگی کارفرما را مطلع کرده تا شرایط کار او در صورت لزوم تعدیل شود . »

در پاراگراف I-17 از BSS ( ضمیمه ی I ، پرتوگیری های شغلی ، شرایط سرویس ) گفته شده است که :

« اطلاع از حاملگی نباید دلیل محروم کردن کارمند مؤنث از کار باشد ، در حالی که کارفرمای کارمند مؤنث که از حاملگی مطلع شده باید شرایط کار را با توجه به پرتوگیری های شغلی طوری سازگار کند که اطمینان حاصل شود جنین یا نطفه از همان سطح حفاظتی لازم برای اعضای عمومی جامعه برخوردار است . »

این مسئله به خصوص در براکی تراپی دستی صادق است ، جایی که در شرایط عادی دز جنین برای برخی کارکنان ممکن است به دز حدی اعضای عمومی جامعه که در BSS گفته شده برسد ) .

خلاصه ی محدودیت های دز سالانه براساس جدول II گزارش BSS و گزارش ICRP شماره ی ۶۰ (جدول ۶، صفحه ی ۴۶).

پرتوگیری عمومی	پرتوگیری کارآموزهای سنین ۱۶-۱۸	پرتوگیری شغلی	
۱، به صورت متوسط در ۵ سال متوالی و ۵ در یک سال**	۶	۲۰، به صورت متوسط در ۵ سال متوالی و ۵۰ در یک سال*	دز مؤثر (کل بدن) (mSv)
۱۵	۵۰	۱۵۰	دز معادل (عدسی چشم) (mSv)
۵۰	۱۵۰	۵۰۰	دز معادل (دست ها، پاها، پرست) (mSv)

\*. دز مؤثر متوسط در طول ۵ سال متوالی نباید از ۱ mSv/a تجاوز کند.

\*\* دز مؤثر متوسط در طول ۵ سال متوالی نباید از مقدار ۱ mSv/a تجاوز کند.

طبقه بندی ناحیه ها

نواحی وابسته به کار را می توان به صورت کنترل شده یا تحت نظارت با توجه به BSS ( پاراگراف ۲۵-۱-۲۱-۱ ) طبقه بندی کرد .

ناحیه ی کنترل شده به ناحیه ای گفته می شود که اندازه گیری های حفاظتی مخصوص پیش بینی های ایمنی برای کنترل پرتو عادی و اجتناب از پرتوگیری های احتمالی لازم است . در کارهای پرتودرمانی ، نواحی نیازمند به اندازه گیری های حفاظتی مخصوص ( نواحی کنترل شده ) عبارت اند از :

- تمام اتاق های پرتو برای پرتودرمانی باریکه ی خارجی ،
- اتاق های درمان براکی تراپی کنترل از راه دور پس از بارگذاری ،
- اتاق های عمل که در حین فرایند براکی تراپی از چشمه های واقعی استفاده می کنند ،
- اتاق های بیماران براکی تراپی ،
- همه ی نواحی انبار کردن و کار با چشمه های رادیواکتیو.

بهتر است که نواحی کنترل شده در مرز فیزیکی نظیر دیوارها یا سایر موانع فیزیکی یا با علامت های ناحیه ی پرتوزا مشخص شود .

ناحیه ی تحت نظارت ناحیه ای است که حتی اگر اندازه گیری های حفاظتی مخصوص و پیش بینی های ایمنی به صورت عادی برای آن لازم نباشد ، باید تحت بازبینی قرار داشته باشد . نواحی تحت نظارت ممکن است شامل نواحی نیازمند بازدید مرتب از شرایط رادیولوژیکی باشند تا تعیین شود آیا در آن جا از کارافتادگی در کنترل فرایند وجود دارد . نواحی تحت نظارت ممکن است نواحی پیرامون اتاق های بیماران براکی تراپی یا اطراف انبار چشمه ی رادیواکتیو و نواحی کار باشند .

نواحی که به منزله ی ناحیه ی کنترل یا تحت نظارت طراحی نشده اند باید طوری باشند که افراد آن جا از سطح حفاظتی اعضای عمومی جامعه برخوردار باشند .

## پایش فردی و ارزیابی پرتودهی

هدف از پایش و ارزیابی پرتودهی جمع آوری و فراهم آوردن اطلاعات از پرتوگیری واقعی کارکنان و تثبیت شیوه ی کار خوب به همراه اطمینان مجدد و انگیزه است . BSS به پایش فردی برای هر یک از کارکنانی که به صورت عادی در نواحی کنترل شده استخدام شده اند و کسانی که پرتو شغلی قابل توجهی دریافت می کنند نیازمند است.

دست اندر کاران پرتودرمانی که بیش تر به پایش فردی احتیاج دارند عبارت اند از :

سرطان شناس های پرتوی ، متخصصین واجد شرایط در فیزیک پرتودرمانی ، متصدیان حفاظت پرتوی ، کارشناسان پرتودرمانی ، جابه جاکندگان چشمه ، کارکنان تعمیر و نگه داری و هر پرستار یا کارمندی که باید زمانی را با بیماری که شامل چشمه های رادیواکتیو است سپری کند .

پایش شامل مواردی بیش تر از اندازه گیری و تعیین دز معادل صرف است ، پایش شامل تفسیر و ارزیابی نیز است . دزهای خارجی فردی با وسایل اندازه گیری فردی نظیر دزیمترهای ترمولومینسانس ( TLD ) یا فیلم بج ها انجام می گیرند که معمولاً در قسمت جلو و بالای نیم تنه وصل می شوند ( در اغلب فرایندهای پرتودرمانی فرض می شود که پرتوی همه ی بدن تقریباً یکنواخت است ) .

در بخش پرتودرمانی دزیمترهای شخصی در زمان های معین که نباید بیش تر از سه ماه باشد تعویض شوند . علاوه بر این گزارش های دزیمترهای خوانده شده باید هرچه زودتر که نباید بیش از سه ماه پس از تعویض باشد در دسترس قرار گیرد . تأخیر در سنجش دزیمتر ممکن است منجر به از دست دادن اطلاعات شود .

اگر دزیمتر شخصی مفقود شود ، دارنده ی مجوز باید دز شخصی دریافت شده را ارزیابی

و ثبت کند و آن را به سابقه ی دز کارمند اضافه کند . معمولاً روش مورد اطمینان غالب برای تخمین دز شخصی استفاده از سوابق کارمند در دوره ی زمانی است که هیچ اتفاق غیرمعمولی نداشته است . وسایل پایش فردی باید کالیبره شوند و این کالیبراسیون باید در آزمایشگاه های استاندارد دزیمتری ردیابی شود .

## پایش مکان کار

بر طبق BSS دارندگان مجوز باید با کارفرماها در توسعه ی برنامه های پایش مکان کار همکاری کنند ( پاراگراف ۴۰-۱-۳۷ ) . پایش اولیه باید بلافاصله پس از نصب تجهیزات جدید و پس از تعویض چشمه های تله تراپی و چشمه های براکی تراپی کنترل از راه دور اجرا شود . پایش اولیه باید شامل اندازه گیری های نشتی پرتوها از تجهیزات در آزمون های قابل قبول و پایش ناحیه ای که فضای اطراف اتاق های درمان را اشغال کرده باشد .

پایش سطوح پرتوی باید با استفاده از نمایشگرهای محیطی در اتاق های تله تراپی و آهنگ دز بالا ( HDR ) انجام شود . پایش انبارهای چشمه و نواحی کار با دزسنج محیطی بلافاصله پس از جابه جایی یا بازگشت چشمه های براکی تراپی به انبار انجام می شود .

پایش باید به همراه فرایند براکی تراپی انجام شود . خیلی زود پس از کاشت چشمه ها ، ارزیابی از آهنگ های پرتوها در اطراف بیمار باید انجام شود . پس از خارج کردن چشمه های براکی تراپی از بیمار ارزیابی برای تأیید خروج چشمه از بیمار و بازگشت همه ی چشمه ها به حفاظ باید انجام شود . محفظه ی انتقال باید قبل و بعد از فرایند براکی تراپی ارزیابی شود .

پایش بسته هایی که شامل چشمه های رادیواکتیو هستند باید از طریق دارنده ی مجوز پس از دریافت چشمه صورت گیرد . همه ی دزسنج های محیطی که برای پایش مکان کار استفاده می شوند باید کالیبره بوده و در آزمایشگاه های استاندارد دزیمتری ردیابی شوند .

## بررسی سلامت

در پاراگراف ۴۱-۱ از BSS (ضمیمه ی ۱ ، پرتوگیری شغلی ، بررسی سلامت ) آمده است :

« کارفرماها و دارندگان مجوز باید ترتیبی برای بررسی سلامت بر طبق قوانین مطرح شده از مراجع قانونی را اتخاذ کنند » .

هدف اصلی از بررسی پزشکی ارزیابی اولیه و ادامه ی قابلیت کارکنان در وظایف محوله به آنان است .

برنامه های بررسی سلامت باید بر پایه ی مقررات عمومی سلامت شغلی باشد . هیچ بررسی سلامت خاصی در رابطه با پرتوهای یونساز برای کارکنان مشغول در کارهای پرتودرمانی لازم نیست . فقط هنگام پرتوگیری بیش از حد کارکنان در دزهای خیلی بالاتر از حد دز معادل ( یعنی ۰,۲-۰,۵ Sv یا بالاتر ) تحقیقات خاص دزیمتری بیولوژیکی و تشخیص های گسترده ی بیش تر و درمان پزشکی لازم است .

مشاوره برای کارکنان نظیر زنانی که باردار هستند یا نوزاد شیرده دارند یا کارکنانی که تحت پرتوگیری قابل توجهی بالاتر از دز حدی قرار می گیرند و کارکنانی که در مورد پرتوگیری نگران هستند ، باید در دسترس باشد . این مورد به خصوص برای زنان باردار و زنانی که ممکن است باردار شوند نظیر کارشناسان زنی که در پرتودرمانی کار می کنند و پرستارانی که در محوطه ی براکی تراپی کار می کنند لازم است .

## طراحی درمان

در هر بیمار ، طراحی درمان برای محافظت بافت های سالم تا حد امکان انجام می شود . بیمار باید قبل از شروع دوره رادیو تراپی در جلسه طرح درمان شرکت کند . بیماری که با رادیو تراپی تحت درمان قرار می گیرد باید طرح درمان منحصر به فردی داشته باشد . به دلیل تنوع روش های پرتو دهی طراحی درمان یک گام اولیه و مهم برای درمان هر بیمار تحت پرتو درمانی است . قبل از پرتو درمانی گروه رادیوتراپی میزان و نوع پرتو را مشخص خواهند کرد . اگر بیمار باید تحت پرتو درمانی خارجی قرار گیرد رادیوتراپیست از روشی به نام Simulation ( شبیه سازی ) برای مشخص کردن هدف پرتویی استفاده می کند . در طول انجام Simulation ، بیمار به حالت آرام بر روی تخت قرار می گیرد و محدوده درمان توسط Simulation مشخص می شود . شبیه سازی همچنین ممکن است شامل CT یا سایر روش های تصویر برداری برای کمک به پرتوکار در جهت طراحی پرتو دهی باشد . Simulation ممکن است باعث تغییراتی در طراحی درمان و در نتیجه محافظت بیشتر بافت سالم از تشعشعات شود. نواحی که باید تحت پرتو دهی قرار گیرند توسط یک مارکر دائمی یا موقتی ( تاتوی کوچک ) مثل خالکوبی مشخص می شود . این نشانه ها در اولین جلسه درمان برای تعیین محل دقیق پرتو دهی به کار می رود . بسته به نوع پرتو درمانی ، پرتوکار ممکن است از Mold یا وسایل دیگر برای بی حرکت نگه داشتن بیمار در طول درمان استفاده کند . این وسایل معمولاً از فوم ، پلاستیک یا گچ ساخته می شوند . در بعضی موارد پرتوکار شیلدهایی را به منظور جلوگیری از نفوذ پرتو به ارگان و بافت های اطراف محل درمان مورد استفاده قرار می دهد . زمانی که شبیه سازی کامل شد تیم رادیوتراپی برای تصمیم گیری درباره مقدار دوز مورد نیاز و چگونگی رساندن آن به محل مورد نظر و درمان هایی که درباره بیمار باید انجام گیرد تصمیم گیری می کند .

## طراحان درمان در پرتو درمانی

مجموعه کارکنان هر مرکز رادیوتراپی به طراحی و درمان بیمار کمک می کنند . تیم پرتو درمانی شامل رادیوتراپیست ، دوزیمتریست ( شخصی که دوز کامل و دقیق پرتو را مشخص می کند ) ، فیزیست ( فردی که کنترل دستگاه برای انتقال مقدار صحیح پرتو به محل تومور در بدن را انجام می دهد ) و پرتوکار می باشد . معمولاً پرتو درمانی یک قسمت از درمان بیمار را شامل می شود در درمان تکمیلی معمولاً از شیمی درمانی استفاده می شود . رادیوتراپیست



Radiation Oncologist ، از همکاری با متخصص سرطان شناس اطفال ، جراح و رادیولوژیست ( پزشک متخصص در تهیه و تفسیر گرافی های اندام های بدن ) پاتولوژیست ( پزشک متخصص آسیب شناسی ) سود می برد .  
( به یاری خداوند ، ادامه مجموعه اصول پرتودرمانی در دوره یا دوره های بعدی ارائه خواهد شد . )

- ۱ - Podgorsak ، ، اروین. ب . پودگورشاك ، ۲۰۰۵ . مترجمین : لیلا مقدم بنائم ، كوكب موسوی خامنه .  
B. Radiation Oncology Physics - A Handbook for Teachers and Students . E. :مolf
- ۲ - The Physics of Radiation Therapy, Faiz M Khan, Lippincott Williams & Wilkins, 3 edition, 2003
- ۳ - Radiobiology for the Radiobiologist. Eric Hall. 2006. 6ED. ISBN 0-7817-4151-3 pp.5 .۱
- ۴ - اصول پرتودرمانی - دكتر علی یعقوبی جویباری ۱۳۹۲
- ۵ - انكولوژی پرتوی - دكتر حسینپور فیضی ، دكتر جلیل پیرایش اسلامیان
- ۶ - اصول پرتودرمانی - كانون سرطان استان همدان -  
<http://hcc.umsha.ac.ir/index.aspx?fkeyid=&siteid=173&pageid=21551>
- ۷ - پرتودرمانی - دانشنامه آزاد Wikipedia
- ۸ - رادیو داروها - <https://www.iaea.org/topics/diagnostic-radiopharmaceuticals#:~:text=Radiopharmaceuticals%20are%20radioisotopes%20bound%20to,for%20the%20therapy%20of%20diseases>