جمهوری اسلامی ایران
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی
مرکز سلامت محیط و کار

راهنمای اندازه‌گیری و ارزیابی
پرتوها در محیط کار

OEL – R - 9506

بسم الله الرحمن الرحیم

جمهوری اسلامی ایران
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی
مرکز سلامت محیط و کار

راهنمای اندازه‌گیری و ارزیابی

پرتوها در محیط کار

کد

OEL - R - 9506

۱۳۹۵

شماره کتابشناسی ملی : ۴۵۶۰۱۳۶
سرشناسه : علی‌آبادی، محسن، ۱۳۵۹
عنوان و نام پدیدآور : راهنمای اندازه‌گیری و ارزیابی پرتوها در محیط کار مجری طرح قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای کشور؛ [برای] وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی مرکز سلامت محیط و کار.
مشخصات نشر : همدان: انتشارات دانشجو، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری : ۱۶۰ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک : 978-964-543-105-9 : ۹۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
یادداشت : کتابنامه: ص. ۱۵۷.
موضوع : تشعشع -- اندازه‌گیری
موضوع : Radiation -- Measurement
موضوع : تشعشع -- جنبه‌های بهداشتی
موضوع : Radiation -- Health aspects
موضوع : محیط کار -- پیش‌بینی‌های ایمنی
موضوع : Work environment -- Safety measures
شناسه افزوده : ایران. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی. مرکز سلامت محیط و کار
رده بندی کنگره : QC۷۹۵/۴۲/ع۸ر۲ ۱۳۹۵
رده بندی دیویی : ۵۳۹/۷۷

نام کتاب: راهنمای اندازه‌گیری و ارزیابی پرتوها در محیط کار
ناشر: مرکز سلامت محیط و کار، وزارت بهداشت درمان و آموزش پزشکی – انتشارات دانشجو
تلفن: ۸۱۴۵۴۱۹۳-۰۲۱-۸۱۴۵۴۱۲۰، نمابر: ۰۲۱-۸۱۴۵۴۴۶۴
http:// markazsalamat.behdasht.gov.ir
مجری طرح: قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای کشور
تلفن: ۰۸۱-۳۸۳۸۰۰۲۵ نمابر: ۰۸۱-۳۸۳۸۰۵۰۹ http://ceoh.umsha.ac.ir
مولف: دکتر محسن علی‌آبادی
نوبت چاپ: اول ۱۳۹۵
تیراژ: ۵۰۰ جلد وزیری
فیلم زینک: لیتوگرافی روشن
چاپ و صحافی: روشن
مرکز پخش: همدان، انتشارات دانشجو تلفن: ۰۸۱-۳۸۳۷۸۰۱۰
شابک: ۹-۱۰۵-۵۴۳-۹۴۶-۹۷۸
قیمت: ۹۰۰۰۰ ریال

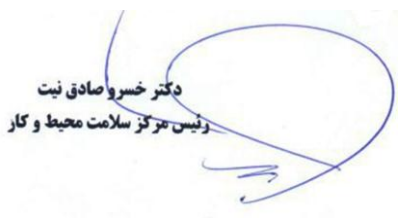
مقدمه

در حال حاضر بیش از نیمی از جمعیت جهان در مشاغل مختلف در معرض طیف وسیعی از عوامل زیان‌آور و آلاینده‌های محیط‌کار قرار دارند که این امر پیامدهای بهداشتی ناگواری را به‌همراه داشته و امکان ابتلا به بیماری‌های شغلی را افزایش خواهد داد.

با توجه به ضرورت برخورداری شاغلین از محیط‌کار سالم و نیاز مبرم کشور به حدود و معیارهایی برای تمایز محیط‌های کاری سالم و ناسالم، ویرایش چهارم کتاب حدود مجاز مواجهه شغلی در مرکز سلامت محیط و کار تدوین شد و با امضاء وزیر محترم بهداشت، درمان و آموزش پزشکی ابلاغ گردید.

با عنایت به ماده ۸۵ قانون کار که رعایت حدود مندرج در کتاب مذکور را برای صاحبان صنایع، کارفرمایان الزام آور نموده است و بر اساس بازخوردهای واصله از کاربران مختلف این کتاب از سراسر کشور، اعم از کارشناسان بهداشت حرفه‌ای و متخصصان طب کار، اعضاء محترم هیأت علمی و کارشناسان صنایع، بر آن شدیم تا با کمک اساتید مجربی که در کمیته تدوین حدود مجاز همکاری نموده‌اند، راهنماهای فنی هر بخش از این کتاب را در ۹ جلد با موضوعات مختلف، به منظور تسهیل استفاده کاربران تدوین نماییم تا کاربران به کمک توضیحات تکمیلی و مثال‌های عنوان شده در این راهنماها، با توان بیشتری نسبت به تفسیر حدود مجاز مندرج در این کتاب و به‌کارگیری نتایج حاصل از آن اهتمام ورزند و از محدودیت‌هایی که ممکن است پدید آید آگاهی داشته باشند و بیش از پیش بتوانند تفسیر صحیحی از مقایسه این حدود مجاز با وضعیت مواجهات آسیب‌رسان محیط‌کار به‌دست آورند.

لازم به ذکر است، به‌منظور دسترسی بیشتر کاربران، این راهنماها بر روی تارنماهای وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی (وبدا)، معاونت بهداشتی و مرکز سلامت محیط و کار قرار خواهد گرفت. در انتها وظیفه خود می‌دانم از زحمات ارزشمند جناب آقای دکتر محسن علی‌آبادی که در تألیف و خانم مهندس فاطمه صادقی و خانم مهندس فریده سیف‌آقایی که در نظارت و تدوین این راهنما همکاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.



فهرست مطالب **صفحه**

مقدمه	۳
پرتو فرابنفش	۵
منابع طبیعی و مصنوعی	۶
اثرات بهداشتی پرتو فرابنفش	۷
کمیت بیان پرتو فرابنفش	۱۲
حدود مجاز مواجهه	۱۳
وسایل و روش‌های اندازه‌گیری	۱۹
حفاظت در مواجهه با پرتو فرابنفش	۲۲
پرتو مادون قرمز	۲۷
اثرات بهداشتی پرتو مادون قرمز	۲۸
حدود مجاز مواجهه	۲۹
وسایل و روش‌های اندازه‌گیری	۳۴
حفاظت در مواجهه با پرتو مادون قرمز	۳۵
پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی	۳۷
منابع مایکروویو و رادیو فرکانسی	۳۹
میدان‌های انتشار امواج	۴۳
اثرات بیولوژیکی پرتوها	۴۷
روش‌های اندازه‌گیری پرتوها	۵۰
کمیت‌های بیان شدت امواج	۵۲
وسایل اندازه‌گیری پرتوها	۵۵
اندازه‌گیری میدان‌های با فرکانس خیلی پایین VLF	۶۳
اندازه‌گیری میدان‌های با فرکانس فوق‌العاده پایین ELF	۶۵
اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی پایا	۶۸
حدود مجاز مواجهه پرتوها	۶۹
حفاظ گذاری پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی	۸۰

پرتو لیزر	۸۴
انواع لیزر	۸۶
تقسیم‌بندی لیزر بر اساس سطح مخاطره زایی	۸۸
روش اندازه‌گیری پرتو لیزر	۹۲
انواع وسایل رادیومتری	۹۲
حدود مجاز مواجهه لیزر	۹۶
اصول حفاظت در مواجهه با پرتوهای لیزری	۱۱۱
پرتوهای یون‌ساز	۱۱۷
اثرات بهداشتی پرتوهای یون‌ساز	۱۲۱
کمیت‌های بیان پرتوهای یون‌ساز	۱۲۳
آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز	۱۲۷
حدود مجاز مواجهه	۱۴۸
اصول حفاظت در مقابل پرتوهای یون‌ساز	۱۴۹
منابع	۱۵۷

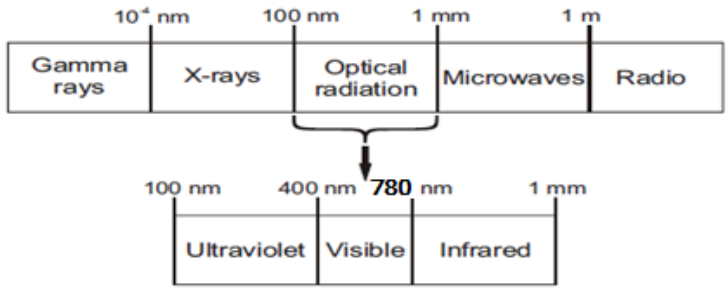
مقدمه

پرتو شکلی از انرژی است که به‌صورت موج یا ذره در خلاء یا در محیط مادی منتشر می‌گردد. کاربرد گسترده پرتوها در حوزه‌های مختلف صنعت، تحقیقات، پزشکی و ارتباطات باعث شده تا کاربران در معرض عوارض بهداشتی قابل ملاحظه‌ای قرار گیرند. به‌طور مثال با پیشرفت فن‌آوری، استفاده از طیف امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی به‌عنوان بخش عمده پرتوهای الکترومغناطیس غیر یون‌ساز در حال گسترش روزافزون است. پرتو از جمله عوامل فیزیکی مخاطره‌آمیز شایع در محیط‌های کار می‌باشد که سلامت کارگران در مواجهه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

به‌طور کلی از لحاظ ماهیت پرتوها به دو دسته عمده پرتوهای با ماهیت ذره‌ای و پرتوهای با ماهیت الکترومغناطیسی تقسیم می‌شوند. مواد رادیواکتیو به‌عنوان ایزوتوپ‌های ناپایدار عناصر ، منشاء پرتوهای ذره‌ای حمل کننده انرژی است. مواد رادیواکتیو همچنین می‌تواند منشأ پرتوهای الکترومغناطیسی از جمله پرتو گاما باشد. پرتوهای الکترومغناطیس از طریق برهم‌کنش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی انرژی را در بستر موج منتقل می‌کنند. علاوه بر این پرتوها از لحاظ میزان انرژی و قدرت یون‌سازی به دو گروه پرتوهای یون‌ساز و پرتوهای غیر یون‌ساز طبقه‌بندی می‌شوند. درصورتی‌که ذرات موجود در ساختمان اتم مانند الکترون‌ها، نوترون‌ها و پروتون‌ها با سرعت اولیه از ساختمان اتم خارج شوند، پرتو ذره‌ای نامیده می‌شود که به دو دسته پرتوهای ذره‌ای باردار و بدون بار تقسیم می‌گردند.

پرتوها به دو صورت طبیعی و مصنوعی تولید می‌گردند، پرتوهای طبیعی از منابع موجود در محیط زیست ساطع می‌گردند مانند پرتوهای خورشیدی. منابع و تجهیزات ساخت بشر نیز تولید کننده پرتوهای مصنوعی هستند. در حال حاضر تعداد بسیاری پرتوکار در سطح کشور در شاخه‌های مختلف با پرتوها در یک گستره وسیع مواجهه دارند و در معرض مخاطرات سلامتی ناشی از نوع فعالیت شغلی خود می‌باشند. همچنین افراد عادی جامعه نیز ممکن است به دلیل عدم اطلاعات و آموزش کافی،در معرض این پرتوها قرار گرفته و اثرات ناشی از این اشعه‌ها باعث بروز عوارض سلامتی گردد.بر این اساس ضروری است کارشناسان و مسئولین واحدهای بهداشت حرفه‌ای توانمندی‌های لازم در خصوص شناخت ماهیت پرتوها و اثرات بهداشتی آن‌ها، روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی مواجهه‌های شغلی را کسب نمایند.

بخشی از طیف پرتوهای الکترومغناطیسی که انرژی آن‌ها برای یونیزاسیون ماده کافی نیست، پرتوهای غیر یون‌ساز[1] نامیده می‌شود. انرژی هر فوتون این پرتوها کمتر از ۱۲/۴ الکترون ولت که کمترین انرژی لازم برای یونیزاسیون مواد زیست شناختی است، می‌باشد. این پرتوها با توجه سطح انرژی فوتون‌های خود تنها قادر به جابجایی الکترون‌ها در مدارهای الکترونی اطراف هسته می‌باشند که به این پدیده تحریک یا تهییج اتم گفته می‌شود. پرتوهای غیریون‌ساز پرتوهایی هستند که طول موج آن‌ها بلندتر از ۱۰۰ نانومتر و فرکانس آن‌ها کمتر از ۳×۱۰^{۵} هرتز می‌باشد. بر اساس طول موج و فرکانس، پرتوهای غیریون‌ساز به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل ۱ - محدوده طول موج انواع پرتوهای الکترومغناطیس

مکانیسم‌های تقابل انواع پرتوهای الکترومغناطیسی با بافت بدن مطابق با شکل ۲ شامل موارد زیر است.

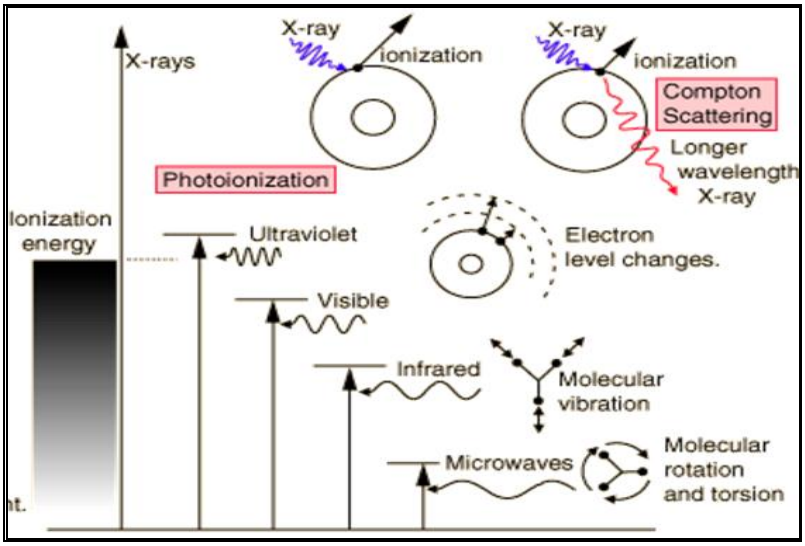
-پرتوهای نوری(نور مریی و فرابنفش): تهییج اتم[2]

- پرتوهای نوری (مادون قرمز): نوسان و لرزش مولکولی[3]

- پرتوهای مایکروویو : چرخش مولکولی[4]

-پرتوهای رادیو فرکانسی: جابجایی مولکولی[5]

1 Non – Ionizing Radiation
2 Excitation
3 Molecular vibration
4 Molecular rotation
5 Molecular translation



شکل۲- مکانیسم‌های تقابل انواع پرتوهای الکترومغناطیسی با بافت بدن

پرتو فرابنفش[1]

پرتوهای الکترومغناطیس غیر یون‌ساز با طول موج ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر، پرتوهای فرابنفش نامیده می‌شوند. پرتو فرابنفش مطابق با شکل ۳ به سه طیف تقسیم می‌گردد.

ناحیه نزدیک

طول موج آن ۳۱۵ تا ۴۰۰ نانومتر می‌باشند از لحاظ زیست شناختی دارای قدرت نفوذ بیشتر در پوست و چشم هستند و از خورشید به‌عنوان منبع طبیعی به شکل فراوان دریافت می‌گردد. علاوه بر این منابع مصنوعی از جمله فرایندهای داغ و لامپ‌های روشنایی انتشار دهنده آن هستند. این طیف با $UV_{(A)}$ نشان داده می‌شود.

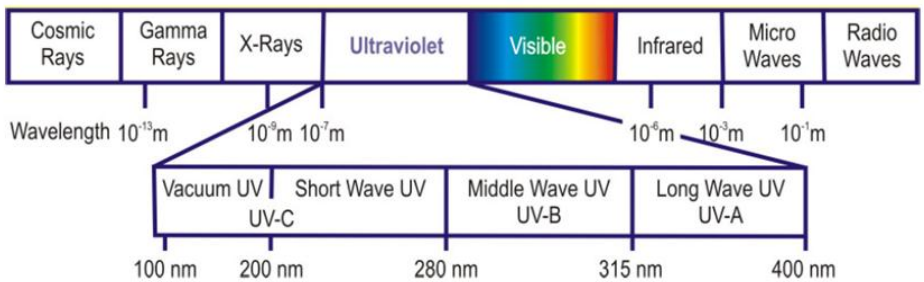
ناحیه متوسط

طول موج آن ۲۸۰ تا ۳۱۵ نانومتر است و از نظر آسیب‌های زیست شناختی بسیار فعال می‌باشد. به‌طور طبیعی از خورشید به زمین می‌رسد. علاوه بر این منابع مصنوعی مختلف انتشاردهنده آن هستند. این طیف با $UV_{(B)}$ نشان داده می‌شود.

1 -Ultraviolet radiation

ناحیه دور

طول موج آن بین ۱۰۰ تا ۲۸۰ نانومتر است و کاربرد آن در ضدعفونی نمودن و از بین بردن باکتری‌ها می‌باشد. البته طول موج کمتر از ۱۸۰ نانومتر را اصطلاحاً ناحیه خلأ گویند. زیرا بلافاصله در هوا جذب می‌گردد و از نظر آسیب‌های زیست شناختی ارزش مطالعه ندارد. این طیف با $UV_{(C)}$ نشان داده می‌شود.

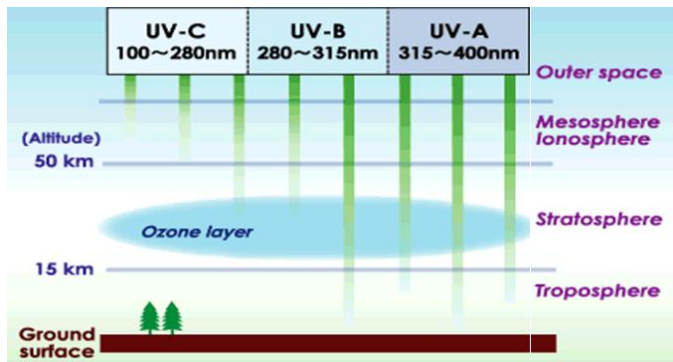


شکل۳- محدوده طول موجی پرتو فرابنفش

منابع طبیعی و مصنوعی پرتو فرابنفش

منبع طبیعی

خورشید مهم‌ترین منبع طبیعی پرتو فرابنفش محسوب می‌گردد. ٪۹۰ پرتو فرابنفش دریافتی از خورشید، پرتو نوع A و ٪۱۰ پرتو دریافتی از نوع B می‌باشد. ٪ ۹۰ پرتو نوع B توسط مولکول‌های اکسیژن و ازن جذب می‌گردد و به سطح زمین نمی‌رسد. پرتو فرابنفش نوع C به‌صورت ٪ ۱۰۰ جذب‌شده و از خورشید به سطح زمین نمی‌رسد.



شکل۴ – نحوه دریافت پرتو فرابنفش خورشیدی در سطح زمین

میزان دریافت پرتو فرابنفش در سایه تقریباً ٪ ۵۰ درصد نسبت به مواجهه مستقیم کاهش می‌یابد. بیشترین میزان دریافت روزانه پرتو فرابنفش خورشید در اوقات ظهر بین ساعت ۱۰ الی ۱۴ می‌باشد. پرتو فرابنفش به‌راحتی از ابرهای سبک عبور نموده و دریافت می‌گردد که اثر عوامل مختلف در میزان دریافت پرتو فرابنفش از خورشید در شاخص UV Index بیان شده است.

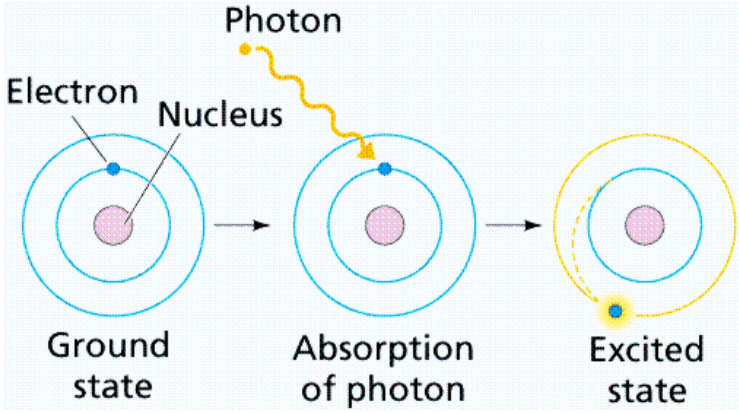
منابع مصنوعی

پرتو فرابنفش به‌طور مصنوعی نیز در بسیاری از وسایل و تجهیزات تولید می‌گردد و کاربران ممکن است مواجهه عمومی و شغلی با این نوع پرتوها داشته باشند. از جمله منابع مصنوعی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

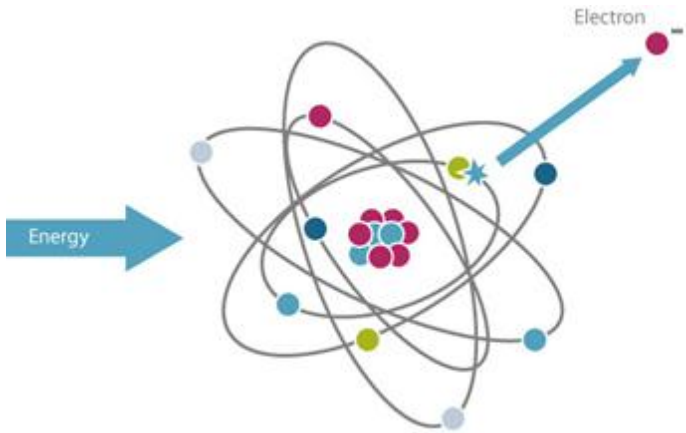
- لامپ‌های روشنایی تخلیه در گاز
- انواع لامپ‌های فرابنفش
- تجهیزات پلیمریزاسیون دندانپزشکی
- مواد مذاب ملتهب در صنایع
- انواع جوشکاری قوس الکتریکی
- تجهیزات فتوکپی
- تجهیزات لیزر فرابنفش

اثرات بهداشتی پرتو فرابنفش

مکانیسم‌های اثرگذاری پرتو فرابنفش در شکل ۵و۶ نشان داده شده است. مکانیسم اصلی اثر فرابنفش ایجاد تهییج اتم‌ها است. با این حال فوتون‌های با انرژی نزدیک به فوتون‌های اشعه ایکس قادر به یون‌سازی نیز می‌باشند. سه اندام هدف پرتو فرابنفش شامل پوست، چشم و سیستم ایمنی بدن می‌باشد.



شکل۵- نحوه تهییج اتم توسط پرتوهای فرابنفش



شکل۶- اثر یون‌سازی فوتون‌های پر انرژی تر پرتو فرابنفش بر اتم‌های بافت بدن

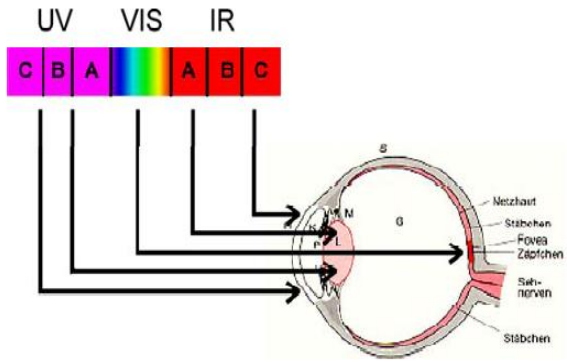
اثر فوتوشیمیایی پرتو فرابنفش، واکنش شیمیایی است که بر مبنای اثر فوتون‌های فرابنفش جهت ایجاد برانگیختگی اتم‌ها رخ می‌دهد. در نتیجه برانگیختگی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مولکول دچار تغییر می‌گردد. فوتون‌های پرانرژی تابش فرابنفش می‌تواند موجب سوختگی در پوست شود و نهایتاً در مواجهه بیش از حد مجاز و طولانی‌مدت منجر به ایجاد سرطان پوست گردد. چشم‌ها نیز می‌توانند به‌وسیله اثرات فوتوشیمیایی دچار آسیب گردند. قرنیه و عدسی در اثر تابش فرابنفش و شبکیه به‌واسطه

تابش نور مرئی دچار صدماتی بر مبنای اثر فوتوشیمیایی می‌گردند. آسیب‌های ایجاد شده بر مبنای اثر فوتوشیمیایی به تعداد فوتون‌های جذب شده در بافت بستگی دارد. (در واحد سطح یا در واحد حجم؛ به ترتیب معادل انرژی حرارتی یا دانسیته انرژی). آسیب فوتوشیمیایی ماهیت تجمعی و افزاینده دارد. صدمات ایجاد در اثر مواجهه متناوب در مقایسه با مواجهات پیوسته و مداوم با انرژی حرارتی مشابه به دوره زمانی طولانی‌تری برای ایجاد همان اندازه اثرات نیاز دارد. بر این اساس، حد مواجهه در پیشگیری از آسیب فوتوشیمیایی به‌صورت یک مقدار انرژی حرارتی ثابت یا دز دریافتی بیان می‌شود که به طول مدت مواجهه بستگی ندارد.

اثرات روی چشم

اثرات بیولوژیک پرتو فرابنفش بسیار به طول موج تابشی وابسته است. به‌طور کلی هرقدر طول موج پرتو فرابنفش افزایش یابد میزان نفوذ آن به چشم افزایش می‌یابد. UVC و بخشی از UVB که عمدتاً در اثر جوشکاری‌های برق تابش می‌گردد می‌تواند در مواجهه حاد به قرنیه صدمه زده و منجر به التهاب قرنیه[1] شود که به‌طور عامیانه به آن برق‌زدگی چشم می‌گویند. این عارضه منجر به التهاب دردناک قرنیه می‌گردد که همراه با التهاب ملتحمه چشم نیز می‌باشد. علائم ۴ الی ۱۲ ساعت پس از مواجهه بروز می‌کند و می‌تواند چندین روز به طول انجامد. احساس شن در چشم، نور ترسی و کدورت دید از علائم آن است. UVA و بخشی از UVB می‌تواند از قرنیه عبور نماید و به عدسی چشم رسیده، جذب گردد و ایجاد آب مروارید نماید. ایجاد آب مروارید می‌تواند در مواجهه مزمن و یا مواجهه حاد به‌طور مثال پرتو لیزر فرابنفش بروز نماید. علاوه بر این مواجهه مزمن با پرتو فرابنفش UVB می‌تواند منجر به ایجاد ناخنک[2] در چشم گردد که بافت گوشتی است از گوشه چشم رشد می‌کند و سطح قرنیه را می‌پوشاند و از ورود نور به چشم جلوگیری می‌کند. پرتوهای با طول موج بلندتر می‌تواند به شبکیه چشم برخورد کرده و احتمال بروز کوری وجود دارد.

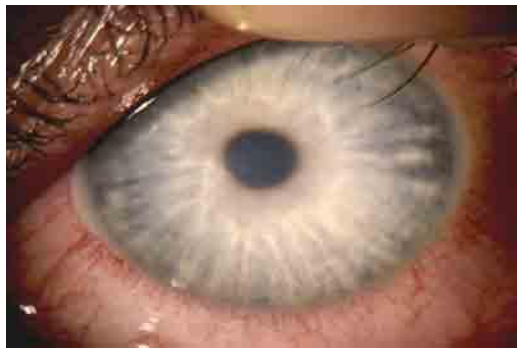
1 *Photokeratitis*
2 Pterygium



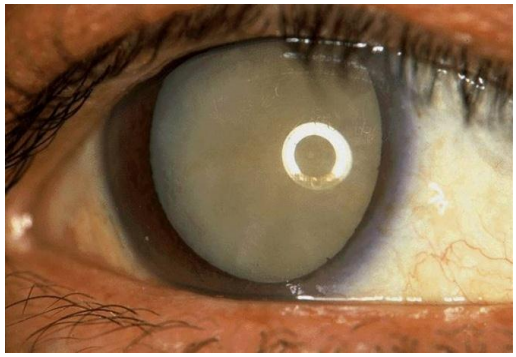
شکل۷- قدرت نفوذ انواع طیف پرتوهای نوری در چشم

جدول۱- اندام هدف پرتوهای نوری بر اساس محدوده طول موجی

نوع پرتو	اندام هدف
UVC, UVB(Partly)	قرنیه/ ملتحمه
UVA, UVB(Partly)	عدسی چشم
VISIBLE	شبکیه چشم
IRA(Partly)	شبکیه چشم/ زجاجیه
IRA(Partly)	عدسی چشم
IRB, IRC	قرنیه/ ملتحمه



شکل ۸– التهاب قرنیه در اثر مواجهه با تابش پرتو فرابنفش



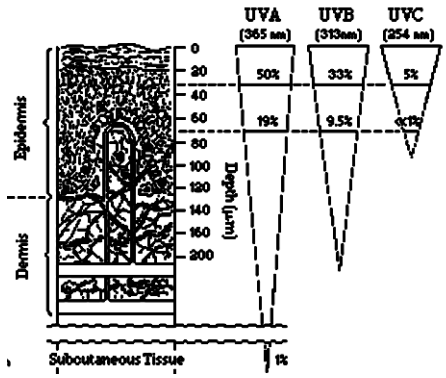
شکل۹- آب مروارید در اثر مواجهه با تابش پرتو فرابنفش

اثرات پوستی

کل طیف پرتو فرابنفش می‌تواند به فیبرهای کلاژن در پوست صدمه زده و منجر به تسریع پیر شدن پوست گردد.در این راستا UVA نقش اساسی را در ایجاد چروک‌های پوستی دارد. UVB عمدتاً مسئول ایجاد اثر آکتینیک[1](اثر فوتوشیمیایی تأخیری) می‌باشد و ایجاد اریتما و تظاهرات تیره شدن پوست[2] می‌نماید. البته UVC نیز ایجاد اریتما می‌نماید . ایجاد اریتما در پوست به جنس و میزان رنگ‌دانه‌های پوستی وابسته است. بین مواجهه و بروز علائم اریتما بین ۴ الی ۸ ساعت طول می‌کشد و می‌تواند به‌صورت قرمزی ساده تا سوختگی شدید نمایان گردد. تیرگی پوست و افزایش ضخامت پوست می‌تواند در مواجهات بعدی نقش حفاظتی داشته باشد. سه طیف پرتو فرابنفش در مواجهه طولانی مدت و مزمن ایجاد سه نوع سرطان پوست به نام‌های سرطان سلول‌های بازال، سلول‌های فلسی و ملانوما نمایند. نوع ملانوما سرطان بسیار خطرناکی است که در ۵۰ درصد موارد منجر به مرگ بیمار می‌گردد. حساسیت‌های پوستی به پرتو فرابنفش نیز می‌تواند در تماس پوست با مواد شیمیایی از جمله قطران ، مشتقات نفتی ،رنگ‌ها و حلال‌ها بروز نماید . مصرف داروهای خاص و همچنین بیماری‌های زمینه‌ای خاص نیز می‌تواند ایجاد حساسیت‌های پوستی نمایند.

1 *Actinic*

2 *Tanning*



شکل۱۰- قدرت نفوذ طیف پرتو فرابنفش در پوست

کمیت‌های بیان پرتو فرابنفش

مقدار تابیدگی(E)[1]

درواقع معادل توان یا انرژی پرتو فرابنفش دریافتی در سطح مشخص(شدت پرتو) است و برحسب وات بر متر مربع بیان می‌گردد.

دز مواجهه(H)[2]

میزان انرژی پرتو فرابنفش دریافتی در یک دوره زمانی مشخص است. درواقع دز دریافتی در یک دوره مواجهه است و برحسب ژول بر متر مربع بیان می‌گردد.

بین مقدار تابیدگی (E) و دز پرتو (H) رابطه زیر برقرار است.

$H=E\times t$

1 Irradiance

2 Radiant Exposure

مثال: اگر شدت پرتو فرابنفش در سطح میز جوشکاری برابر ۰/۰۱وات بر مترمربع باشد و جوشکار در طول روز به مدت یک ساعت عملیات جوشکاری انجام دهد، دز مواجهه روزانه جوشکار را محاسبه نمایید.

$H=0.01\times3600 = 36\ j/m^2$

حدود مجاز مواجهه با پرتو فرابنفش

مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی با پرتو فرابنفش (UV) در ناحیه طیفی بین ۱۸۰ و ۴۰۰ نانومتر نشان دهنده شرایطی است که تحت آن شرایط شاغلین ممکن است به‌طور مکرر پرتوگیری نمایند بدون آنکه اثرات زیان‌آوری بر سلامتی آنان عارض شود. این مقادیر برای پرتوگیری چشم یا حساس‌ترین پوست کاربرد دارد. مقادیر تعیین‌شده برای افراد حساس به نور که پرتوگیری فرابنفش دارند و یا افرادی که همراه با پرتوگیری در مواجهه با عوامل حساس‌کننده به نور قرارگرفته‌اند کاربرد ندارد. مقادیر تعیین‌شده به منزله راهنما جهت کنترل پرتوگیری از منابع تابش فرابنفش باید به کار رود ولی نباید به‌عنوان مرز مشخصی بین ایمنی و خطر تلقی گردد. مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی برای پرتوگیری شغلی از تابش فرابنفش که بر چشم یا پوست می‌تابد درحالی‌که مقادیر چگالی شار تابشی (تابندگی)[1] معلوم بوده و زمان پرتوگیری نیز کنترل شده است به ترتیب زیر می‌باشد.

بخش اول- منبع با پهنای فرکانسی فرابنفش (۱۸۰ الی ۴۰۰ نانومتر)

الف- در شرایط اندازه‌گیری چگالی شار تابشی طیفی

اولین مرحله در ارزیابی منابع اشعه فرابنفش تعیین تابیدگی مؤثر آن‌ها است. برای تعیین چگالی شار تابشی مؤثر با در نظر گرفتن منحنی اثربخشی طیفی (۲۷۰ نانومتر) از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$E_{eff} = \sum E_{\lambda} S_{(\lambda)} \Delta_{\lambda}$$

1 - Irradiance

در رابطه فوق، E_{eff} چگالی شار تابشی مؤثر مربوط به منبع تک رنگی با طول موج *nm* ۲۷۰ برحسب W/cm^2 ، E_λ چگالی شار تابشی طیفی با طول موج λ برحسب $W/(cm^2.nm)$ ، $S_{(\lambda)}$ اثربخشی طیفی نسبی (بدون واحد) و $\Delta\lambda$ پهنای باند برحسب نانومتر است. رابطه مذکور در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دستگاه اندازه‌گیری بتواند چگالی شار تابشی را در پهنای فرکانسی اندازه‌گیری نماید. بر اساس نتایج اندازه‌گیری آن می‌توان چگالی شار تابشی مؤثر را با استفاده از رابطه بالا و مقادیر اثربخشی طیفی اشاره شده در جدول ۲ محاسبه نمود. با این‌حال در عمل چگالی شار تابشی مؤثر می‌تواند به‌صورت مستقیم با استفاده از رادیومترهای اشعه فرابنفش با لحاظ نمودن اثربخشی طیفی اندازه‌گیری گردد. میزان مواجهه مجاز روزانه با اشعه فرابنفش بر مبنای تابیدگی مؤثر برابر با j/cm^2 ۰/۰۰۳ است که بر این اساس حداکثر زمان پرتوگیری مجاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{\max} = 0.003 / E_{eff}$$

در رابطه فوق، t_{max} حداکثر زمان پرتوگیری مجاز برحسب ثانیه و E_{eff} تابیدگی مؤثر نسبت به یک منبع تک رنگ در طول موج *nm* ۲۷۰ برحسب W/cm^2 است.

جدول ۲ بیان‌کننده حد مجاز مواجهه شغلی با پرتوهای فرابنفش بر مبنای طول موج و اثربخشی طیفی نسبی آن‌ها می‌باشد. جدول ۳ مدت مجاز مواجهه با پرتوهای UV در ناحیه طیفی اکتینیک (۱۸۰ الی ۴۰۰ نانومتر) را برحسب تابندگی مؤثر نشان می‌دهد.

نکته: جهت استفاده از جدول ۳ می‌بایست نتایج حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از رادیومتر با قابلیت اندازه‌گیری چگالی تابشی مؤثر در محدوده طیفی اکتینیک (۱۸۰ الی ۴۰۰ نانومتر) با مقادیر داخل جدول ۳ مقایسه گردد.

جدول ۲- حد مجاز مواجهه شغلی با پرتوهای فرابنفش و اثربخشی طیفی نسبی

*طول موج (nm)	حد مجاز مواجهه شغلی		اثربخشی طیفی نسبی S(λ)
	j/m²	mj/cm²	
۱۸۰	۱۶۰۰	۱۶۰	۰/۰۱۲
۱۹۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۹
۲۰۰	۵۹۰	۵۹	۰/۰۳۰
۲۰۵	۴۰۰	۴۰	۰/۰۵۱
۲۱۰	۳۲۰	۳۲	۰/۰۷۵
۲۱۵	۲۵۰	۲۵	۰/۰۹۵
۲۲۰	۲۰۰	۲۰	۰/۱۲۰
۲۲۵	۱۶۰	۱۶	۰/۱۵۰
۲۳۰	۱۳۰	۱۳	۰/۱۹۰
۲۳۵	۱۰۰	۱۰	۰/۲۴۰
۲۴۰	۸۳	۸/۳	۰/۳۰۰
۲۴۵	۷۰	۷/۰	۰/۳۶۰
۲۵۰	۶۰	۶/۰	۰/۴۳۰
**۲۵۴	۵۸	۵/۸	۰/۵۰۰
۲۵۵	۴۶	۴/۶	۰/۵۲۰
۲۶۰	۳۷	۳/۷	۰/۶۵۰
۲۶۵	۳۰	۳/۰	۰/۸۱۰
۲۷۰	۳۱	۳/۱	۱/۰۰۰
۲۷۵	۳۴	۳/۴	۰/۹۶۰
**۲۸۰	۳۹	۳/۹	۰/۸۸۰
۲۸۵	۴۷	۴/۷	۰/۷۷۰
۲۹۰	۵۶	۵/۶	۰/۶۴۰
۲۹۵	۶۵	۶/۵	۰/۵۴۰
**۲۹۷	۱۰۰	۱۰	۰/۴۶۰
۳۰۰	۲۵۰	۲۵	۰/۳۰۰
**۳۰۳	۵۰۰	۵۰	۰/۱۲۰
۳۰۵	۱۲۰۰	۱۲۰	۰/۰۶۰
۳۰۸	۲۰۰۰	۲۰۰	۰/۰۲۶
۳۱۰	۵۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۱۵

*طول موج (nm)	حد مجاز مواجهه شغلی		اثربخشی طیفی نسبی S(λ)
	j/m²	mj/cm²	
**۳۱۳	۱/۰ ×۱۰⁴	۱/۰ ×۱۰³	۰/۰۰۶
۳۱۵	۱/۳×۱۰⁴	۱/۳×۱۰³	۰/۰۰۳
۳۱۶	۱/۵×۱۰⁴	۱/۵×۱۰³	۰/۰۰۲۴
۳۱۷	۱/۹ ×۱۰⁴	۱/۹ ×۱۰³	۰/۰۰۲۰
۳۱۸	۲/۵ ×۱۰⁴	۲/۵ ×۱۰³	۰/۰۰۱۶
۳۱۹	۲/۹×۱۰⁴	۲/۹×۱۰³	۰/۰۰۱۲
۳۲۰	۴/۵×۱۰⁴	۴/۵×۱۰³	۰/۰۰۱۰
۳۲۲	۵/۶×۱۰⁴	۵/۶×۱۰³	۰/۰۰۰۶۷
۳۲۳	۶/۰×۱۰⁴	۶/۰×۱۰³	۰/۰۰۰۵۴
۳۲۵	۶/۸×۱۰⁴	۶/۸×۱۰³	۰/۰۰۰۵۰
۳۲۸	۷/۳×۱۰⁴	۷/۳×۱۰³	۰/۰۰۰۴۴
۳۳۰	۸/۱×۱۰⁴	۸/۱×۱۰³	۰/۰۰۰۴۱
۳۳۳	۸/۸×۱۰⁴	۸/۸×۱۰³	۰/۰۰۰۳۷
۳۳۵	۱/۱ ×۱۰⁵	۱/۱ ×۱۰⁴	۰/۰۰۰۳۴
۳۴۰	۱/۳×۱۰⁵	۱/۳×۱۰⁴	۰/۰۰۰۲۸
۳۴۵	۱/۵×۱۰⁵	۱/۵×۱۰⁴	۰/۰۰۰۲۴
۳۵۰	۱/۹ ×۱۰⁵	۱/۹ ×۱۰⁴	۰/۰۰۰۲۰
۳۵۵	۲/۳ ×۱۰⁵	۲/۳ ×۱۰⁴	۰/۰۰۰۱۶
۳۶۰	۲/۷×۱۰⁵	۲/۷×۱۰⁴	۰/۰۰۰۱۳
۳۶۵	۳/۲×۱۰⁵	۳/۲×۱۰⁴	۰/۰۰۰۱۱
۳۷۰	۳/۹×۱۰⁵	۳/۹×۱۰⁴	۰/۰۰۰۰۹۳
۳۷۵	۴/۷×۱۰⁵	۴/۷×۱۰⁴	۰/۰۰۰۰۷۷
۳۸۰	۵/۷×۱۰⁴	۵/۷×۱۰⁴	۰/۰۰۰۰۶۴
۳۸۵	۶/۸×۱۰⁵	۶/۸×۱۰⁴	۰/۰۰۰۰۵۳
۳۹۰	۸/۳×۱۰⁵	۸/۳×۱۰⁴	۰/۰۰۰۰۴۴
۳۹۵	۱/۰×۱۰⁶	۱/۰×۱۰⁵	۰/۰۰۰۰۳۶
۴۰۰			۰/۰۰۰۰۳۰

** طول موج های انتخابی، برای سایر طول موج ها باید درون‌یابی انجام شود.*

$1\ mJ/cm^2 = 10\ J/m^2\ \Delta$

ب- در شرایط اندازه‌گیری چگالی شار تابشی در سه طیف اصلی

در صورت عدم وجود نتایج اندازه‌گیری چگالی شار تابشی طیفی با در اختیار داشتن نتایج چگالی شار تابشی در هر طیف اشعه فرابنفش B،A و C نیز به‌طور جایگزین می‌توان از حدود زیر مندرج در جداول ۴، ۵ استفاده نمود. برای استفاده از حدود مجاز اشاره شده در جدول ۵ می‌بایست رادیومتر قابلیت اندازه‌گیری چگالی تابشی مؤثر در محدوده فرابنفش A ،B و C را به‌طور مجزا داشته باشد. این حدود از مقادیر ارائه‌شده در جدول ۲ بر مبنای اثربخشی طیفی استخراج گردیده است. بر این اساس میزان حداکثر مواجهه مجاز با اشعه فرابنفش نزدیک A بر مبنای تابیدگی مؤثر برابر ۱۰ Kj/m^2 اشاره شده است.

جدول۳- حد مجاز مواجهه با فرابنفش در ناحیه اکتینیک برحسب چگالی شار تابشی مؤثر

طول زمان پرتوگیری در روز	چگالی شار تابشی مؤثر E_{eff} ($\mu W/cm^2$)
۸ ساعت	۰/۱
۴ ساعت	۰/۲
۲ ساعت	۰/۴
۱ ساعت	۰/۸
۳۰ دقیقه	۱/۷
۱۵ دقیقه	۳/۳
۱۰ دقیقه	۵
۵ دقیقه	۱۰
۱ دقیقه	۵۰
۳۰ ثانیه	۱۰۰
۱۰ ثانیه	۳۰۰
۱ ثانیه	۳۰۰۰
۰/۵ ثانیه	۶۰۰۰
۰/۱ ثانیه	۳۰۰۰۰

بنا بر این حداکثر مدت زمان مجاز مواجهه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{\max} = 10(kj/m^2)/E_{eff}$$

در رابطه فوق، t_{max} حداکثر زمان پرتوگیری مجاز برحسب ثانیه و E_{eff} تابیدگی مؤثر برحسب W/m^2 است.

جدول ۴- حد مجاز مواجهه شغلی پرتو فرابنفش در طیف‌های مختلف بر مبنای دز تابشی

نوع پرتو	j/m^2	mj/cm^2
UVA	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰
UVB	۳۴	۳/۴
UVC	۳۰	۳

جدول ۵ - مدت مجاز مواجهه شغلی با پرتوهای فرابنفش بر مبنای چگالی شار تابشی مؤثر

طول زمان پرتوگیری در روز	UVA($\mu W/cm^2$)	UVB($\mu W/cm^2$)	UVC($\mu W/cm^2$)
۸ ساعت	۳۴/۷۲	۰/۱۲	۰/۱۰
۴ ساعت	۶۹/۴	۰/۲۳	۰/۲۰
۲ ساعت	۱۳۸/۹	۰/۴۷	۰/۴۰
۱ ساعت	۲۷۷/۸	۰/۹۴	۰/۸۰
۳۰ دقیقه	۵۵۵/۵	۱/۸۸	۱/۷۰
۱۵ دقیقه	۱۱۱۱/۱	۳/۷۷	۳/۳۰
۱۰ دقیقه	۱۶۶۶/۷	۵/۶۶	۵
۵ دقیقه	۳۳۳۳/۳	۱۱/۳۳	۱۰
۱ دقیقه	۱۶۶۶۶/۷	۵۶/۶۶	۵۰
۳۰ ثانیه	۳۳۳۳۳/۳	۱۱۳/۳۳	۱۰۰
۱۰ ثانیه	۱۰۰۰۰۰	۳۴۰	۳۰۰
۱ ثانیه	۱۰۰۰۰۰۰	۳۴۰۰	۳۰۰۰
۰/۵ ثانیه	۲۰۰۰۰۰۰	۶۸۰۰	۶۰۰۰
۰/۱ ثانیه	۱۰۰۰۰۰۰۰	۳۴۰۰۰	۳۰۰۰۰

بخش دوم - منبع با پهنای فرکانسی باریک

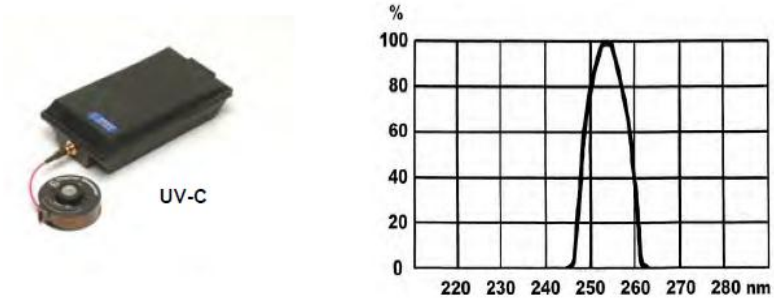
منابع با پهنای باند باریک معمولاً حاوی یک طول موج یا پهنای باریکی از طول موج‌ها هستند که حد مجاز آن از جدول ۲ قابل تعیین است.

وسایل اندازه‌گیری پرتو فرابنفش

جهت اندازه‌گیری مواجهه شغلی با پرتوهای فرابنفش سه نوع وسیله اندازه‌گیری وجود دارد که شامل موارد زیر است.

الف- رادیومتر پرتو فرابنفش

رادیومتر مطابق با شناسنامه فنی معمولاً قابلیت اندازه‌گیری چگالی تابشی مؤثر در محدوده فرابنفش A، B و C را به‌طور مجزا دارند. برای اندازه‌گیری مواجهه کارگران با انواع پرتوهای فرابنفش دستگاه سنجش در ایستگاه کاری کارگر نزدیک به سطح بدن نگاه داشته می‌شود و مقدار مواجهه برحسب W/m^2 یا $\mu W/cm^2$ ثبت می‌گردد. جهت ارزیابی مواجهه لازم است مدت زمان مواجهه روزانه نیز ثبت گردد و با مراجعه به جداول فوق‌الذکر حد مجاز مواجهه جهت ارزیابی سطح مواجهه با پرتو تعیین نمود.



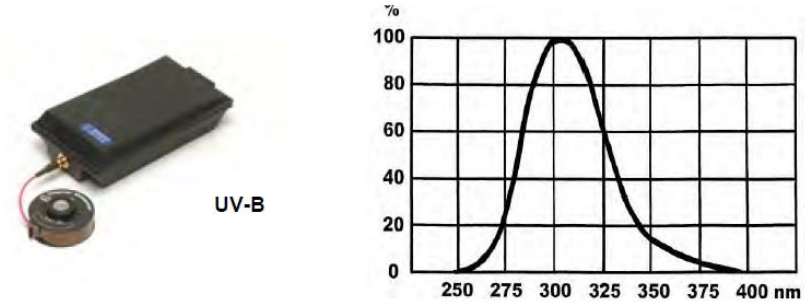
شکل ۱۱- منحنی حساسیت رادیومتر فرابنفش در محدوده UVC

مثال: شدت پرتو فرابنفش اندازه‌گیری شده در محدوده طیف اکتینیک در مجاورت لامپ مخصوص تولید اشعه فرابنفش در فاصله یک متری ۰/۰۵ mW/cm^2 است. مدت زمان مجاز مواجهه با چشم غیرمسلح به لامپ را تعیین نمایید؟

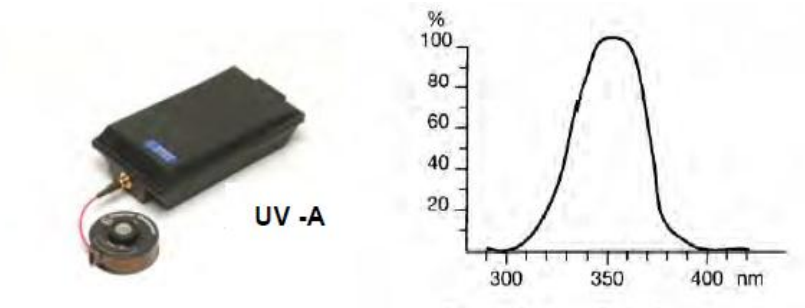
پاسخ: بر مبنای چگالی شار تابشی مؤثر اندازه‌گیری شده، مدت مجاز مواجهه شغلی با پرتوهای فرابنفش لامپ حداکثر ۶۰ ثانیه تعیین گردید.

$$t_{\max} = \frac{0.003}{0.05 \times 10^{-3}}$$

t_{max}= 60 s



شکل۱۲- منحنی حساسیت رادیومتر فرابنفش در محدوده UVB

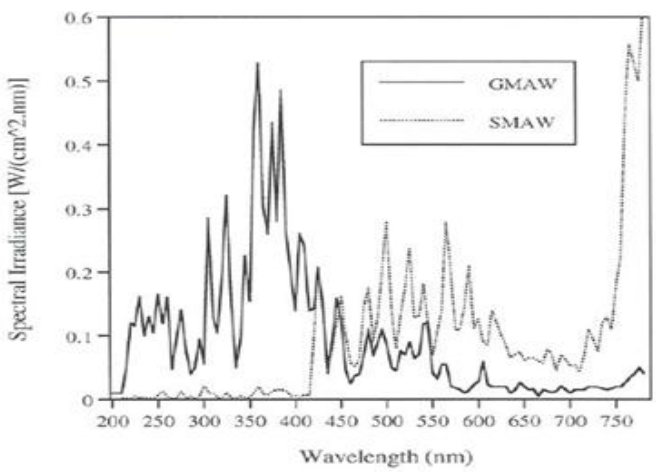


شکل۱۳- منحنی حساسیت رادیومتر فرابنفش در محدوده UVA

ب- اسپکترو رادیومتر پرتو فرابنفش

رادیومترهایی هستند که قابلیت اندازه‌گیری چگالی تابشی مؤثر در محدوده طیفی اکتینیک را دارند و مقادیر چگالی شار تابشی (شدت پرتو) را در تک‌تک طول موج‌ها اندازه‌گیری می‌کنند.

شکل ۱۴- نمونه دستگاه اسپکترو رادیومتر فرابنفش



شکل۱۵- تجزیه طیفی انواع جوشکاری برق با استفاده از اسپکترو رادیومتر

ج- دزیمتر پرتو فرابنفش

دزیمتر پرتو فرابنفش وسیله‌ای است که می‌تواند مقدار یا دز پرتو دریافتی در طول زمان مواجهه را برحسب j/m^2 تعیین نماید. این وسیله می‌بایست به لباس کارگر قبل از شروع فعالیت و مواجهه با پرتو نصب گردد و در پایان کار جهت تعیین دز تحویل گرفته شود.

شکل۱۶- دزیمتری پرتو فرابنفش با استفاده از فیلم Polysuphone

میزان تغییرات فوتوشیمیایی ایجاد شده در فیلم متناسب با شدت مؤثر پرتو جذب شده می‌باشد. تعیین سطح تغییرات ایجاد شده روی فیلم در آزمایشگاه انجام می‌گیرد.

حفاظت در مواجهه با پرتو فرابنفش

اصول حفاظت در مواجهه با پرتوهای فرابنفش بر مبنای کنترل‌های فنی مهندسی ،مدیریتی و حفاظت فردی استوار است. در کنترل‌های فنی بر روی تجهیزات خاص با انجام محصورسازی و عایق‌بندی مناسب یا استفاده از موانع از جنس پلاستیک و شیشه از تابش ناخواسته پرتو جلوگیری می‌گیرد. در جوشکاری‌ها استفاده از پرده‌ها در اطراف ایستگاه کار از مواجهه سایرین پیشگیری می‌کند. استفاده از قفل‌های درگیر شونده[1] برای تجهیزات خاص توصیه می‌گردد. کنترل‌های مدیریتی شامل آموزش، محدود کردن دسترسی افراد ،

1- *Interlock*

استفاده از علائم و هشدارها در محیط کار است. حفاظت فردی نیز شامل استفاده از وسایل مناسب جهت حفاظت از پوست چشم در حین مواجهه با پرتو فرابنفش می‌باشد. استفاده از دستکش و لباس‌های مناسب، عینک و ماسک‌های صورت و همچنین کرم‌های حفاظتی از جمله روش‌های حفاظت فردی است.

تعیین قدرت حفاظت دهی لباس

قدرت حفاظت دهی لباس در مواجهه با فرابنفش جهت محافظت پوست تحت عنوان فاکتور UPF[1] بیان می‌گردد که در خصوص لباس جوشکاری می‌بایست توصیه گردد. بر اساس استاندارد EN 13758-1:2007 این فاکتور نشان دهنده درصد پرتو فرابنفش عبوری از لباس است که با سطح پوست تماس پیدا می‌کند. میزان قدرت حفاظت دهی لباس بر مبنای فاکتور UPF مطابق با جدول ۶ است.

جدول ۶- میزان قدرت حفاظت دهی لباس بر مبنای فاکتور UPF

حفاظت دهی فرابنفش لباس	میزان UPF	درصد جذب UV
متوسط	۱۰ الی۱۹	۱۰ الی ۵/۱
بالا	۲۰ الی ۲۹	۵ الی ۳/۴
خیلی بالا	۳۰ الی ۴۹	۳/۳ الی ۲
فوق‌العاده بالا	بیشتر از ۵۰	کمتر از ۲

در مواجهه با پرتو فرابنفش ساطع شده از خورشید میزان UPF معادل ۳۰ توصیه شده است که حفاظت دهی مناسبی خواهد داشت. با این حال در خصوص مواجهه پوستی با پرتوهای فرابنفش جوشکاری با توجه به‌شدت بالای پرتو میزان UPF معادل ۵۰ توصیه‌شده است. میزان UPF معادل ۵۰ نشان دهنده آن است که کمتر از ۲ درصد از پرتو در مواجهه قابلیت عبور از لباس را دارا می‌باشد. از جمله عوامل مؤثر بر UPF لباس می‌توان به جنس لباس ، فشردگی بافت یا دانسیته ، رنگ لباس، گشاد بودن یا تنگی لباس و

1 -Ultraviolet Protection Factor

خشکی یا خیس بودن لباس اشاره کرد. با توجه به موارد توصیه‌شده در منابع علمی، استفاده از پارچه با جنس کتان خالص و بافت فشرده و رنگ‌های روشن‌تر جهت دوخت لباس کار جوشکاران می‌تواند حفاظت دهی مطلوبی را ایجاد نماید. با این حال لزوم وجود برچسب قدرت حفاظت دهی فرابنفش برای لباس‌های کار موجود در بازار کشور نیز ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این با توجه به اهمیت حفاظت سطح پوست در مواجهه مداوم با پرتو UV استفاده از ماسک‌های جوشکاری با درجه تیرگی مناسب جهت حفاظت چشم و پوست صورت به‌طور هم‌زمان می‌تواند جایگزین استفاده از عینک حفاظتی گردد.

شکل۱۷ – استفاده از کلاه در مواجهه با پرتوهای خورشیدی

تعیین درجه تیرگی[1] لنز ماسک‌ها یا عینک‌های حفاظتی

درجه تیرگی SN بر اساس نسبت شدت پرتو عبوری از لنز عینک به‌شدت پرتو برخوردی به لنز بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد. T در این رابطه کسر عبوری است.

$$SN = \frac{7}{3}\log(\frac{1}{T}) + 1$$

مثال: اگر کسر پرتو عبوری از لنز عینک حفاظتی جهت استفاده در شغل جوشکاری برابر ۰/۰۰۰۱ باشد درجه تیرگی عینک را تعیین نمایید؟

$$SN = \frac{7}{3}\log(\frac{1}{0.0001}) + 1 \Rightarrow SN = 10.3$$

1- Shade Number

نکته: در جوشکاری برق بهتر است که از ماسک‌های جوشکاری بجای عینک استفاده شود چون می‌تواند سطح صورت را نیز پوشش داده از مواجهه مستقیم پوست صورت با پرتو جلوگیری نماید.

شکل۱۸- جوشکاری با وسایل حفاظتی کامل برای پوست و چشم

تعیین درجه حفاظت کرم‌های حفاظتی

درجه حفاظت کرم‌ها در واقع کسر پرتو عبوری از ضخامت جرمی ۲ mg/cm^2 است. به عبارت دیگر می‌توان درصد پرتو جذبی به دلیل استفاده از کرم را بر اساس رابطه ذیل تعیین نمود:

$$ABS(\%) = \frac{SPF - 1}{SPF} \times 100$$

مثال: اگر درجه حفاظت کرم جهت حفاظت از پوست در مواجهه با پرتوهای فرابنفش در مشاغل روباز برابر با ۴۰ باشد درصد حفاظت دهی و جذب فرابنفش را محاسبه نمایید.

$$ABS(\%) = \frac{40 - 1}{40} \times 100 \Rightarrow ABS(\%) = 97.5$$

نکته: کرم‌های حفاظتی می‌بایست حداقل ۱۵ الی ۳۰ دقیقه قبل از مواجهه استفاده گردند . بر روی تمامی سطوح در مواجهه با پرتو می‌بایست کرم استفاده گردد. هر ۲ ساعت یک‌بار می‌بایست مجدد استفاده گردد. در صورت تعریق زیاد فرد در محیط می‌بایست سریع‌تر

تجدید گردد. متناسب با نوع جنس پوست از کرم با قدرت حفاظت دهی SPF مناسب استفاده شود. لازم به ذکر است در مواجهه با پرتوهای خورشیدی حضور در سایه و یا استفاده از کلاه مناسب می‌تواند تا حدود ۵۰٪ مواجهه را کاهش دهد.

افراد در مواجهه دائم با پرتوهای فرابنفش می‌بایست در صورت مشاهده هرگونه تیرگی یا لک در سطح پوست بدن به پزشک مراجعه نموده و از علت آن اطمینان حاصل نمایند. تشخیص علائم بروز سرطان پوست در مراحل اولیه می‌تواند در روند درمان آن بسیار مؤثر باشد.

شکل۱۹- استفاده از کرم بر روی سطح پوست بدون پوشش در مواجهه با آفتاب

شکل۲۰- بررسی مداوم پوست بدن در افراد در مواجهه دائم با پرتو

تعیین شاخص فرابنفش UV index

یک شاخص بین‌المللی که نشان دهنده شدت پرتو فرابنفش دریافتی از خورشید در یک مکان مشخص و در یک زمان مشخص است. این شاخص بدون بعد محاسبه می‌گردد و

برای اطلاع جامعه از دریافت پرتو فرابنفش خورشید در یک منطقه جغرافیایی و زمان مشخصی از سال به همراه اطلاعات هواشناسی اعلام می‌گردد.

جدول ۷- شاخص UV Index بر اساس توصیه WHO در سال ۲۰۰۰

سطح مواجهه	محدوده شاخص UV Index
پایین	کمتر از ۲
متوسط	۳-۵
زیاد	۶-۷
خیلی زیاد	۸-۱۰
فوق‌العاده زیاد	بیشتر از ۱۱

پرتو مادون‌قرمز[1]

از جمله منابع مهم طبیعی تولید پرتو مادون‌قرمز (IR) به‌خصوص در محدوده نزدیک خورشید است. سطوح داغ در فرایندهای صنعتی از جمله گرم‌کن‌ها، کوره‌ها، خشک‌کن‌ها، صنایع فولاد، شیشه‌سازی نیز ساطع‌کننده امواج مادون قرمز هستند. بر اساس قانون جابجایی وین، طیف غالب تابش امواج مادون‌قرمز در محدوده‌های مختلف بستگی به دمای سطوح دارد. هرچقدر دمای سطوح افزایش یابد ،پیک تابش مادون قرمز به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر می‌باشد.

پرتوهای الکترومغناطیسی غیریون‌ساز با طول موج ۷۸۰ تا $۱۰^{۶}$ نانومتر(۱ میلی‌متر)، پرتوهای مادون قرمز نامیده می‌شوند. پرتوهای مادون قرمز به سه طیف تقسیم می‌گردد.

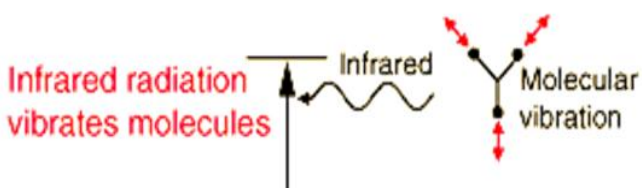
- ✓ ناحیه نزدیک $IR_{(A)}$: دارای طول موج ۷۸۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر می‌باشند.
- ✓ ناحیه متوسط $IR_{(B)}$: طول موج آن ۱۴۰۰تا ۳۰۰۰ نانومتر است.
- ✓ ناحیه دور $IR_{(C)}$: طول موج آن بین ۳۰۰۰ تا $۱۰^{۶}$ نانومتر است.

1 - *Infrared radiation*

از سطح همه اجسام در هر دمایی امواج تابشی گسیل می‌شود. تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن طول‌موج‌های مادون قرمز، مرئی و ماوراءبنفش به‌صورت یک طیف پیوسته وجود دارد. در دمای پایین مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشتر تابش گسیل شده دارای طول‌موج‌هایی در ناحیه مادون قرمز است به همین دلیل نمی‌توان با چشم وجود تابش را تشخیص داد. ولی تابش گرمای آن احساس می‌شود. هرچه دمای جسم بالاتر رود طول‌موج‌هایی که بیش از همه تابش می‌شود به‌تدریج از طول‌موج‌های بلند به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر هدایت می‌شود و درنتیجه به طیف نور مرئی نزدیک می‌شوند و وقتی دمای جسم به اندازه کافی بالا رود از آن نور قرمز رنگی گسیل می‌شود. هر جسم بخشی از انرژی دریافتی بر سطح خود را جذب می‌کند و یا از خود عبور می‌دهد و بقیه را بازتاب می‌نماید.

اثرات بهداشتی مادون قرمز

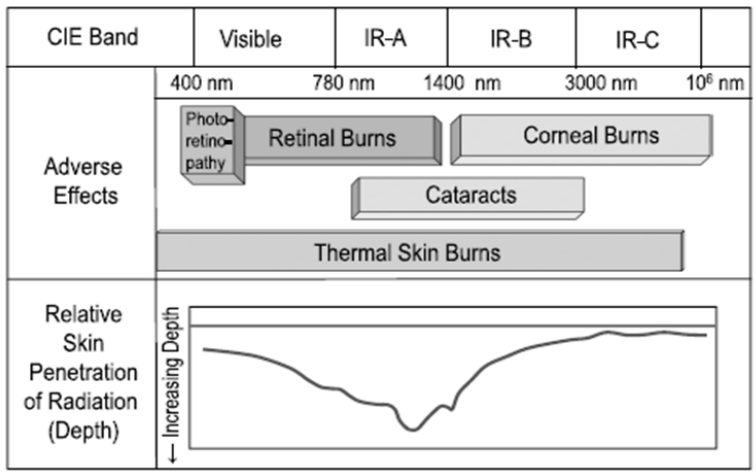
مکانیسم‌های اثرگذاری پرتو مادون قرمز در شکل ۲۱ نشان داده شده است. مکانیسم اصلی اثر مادون قرمز به‌صورت ایجاد لرزش مولکولی است که منجر به تولید حرارت می‌گردد. با این حال فوتون‌های با انرژی بیشتر قادر به ایجاد تهییج اتم نیز می‌باشند. دو اندام هدف پرتو مادون قرمز شامل پوست و چشم می‌باشد.



شکل ۲۱- مکانیسم اصلی اثرگذاری پرتو مادون قرمز

پرتوهای مادون قرمز عمدتاً بر مبنای مکانیسم حرارتی منجر به آسیب پوست و چشم می‌شود. با این حال ایجاد سرطان در مواجهه با پرتوهای نوری در غیاب پرتوهای فرابنفش

تاکنون ذکر نشده است. قدرت نفوذ پرتو مادون قرمز در بافت بدن از چند میلی‌متر در اثر پرتو IRA تا جذب سطحی IRC می‌باشد. در مواجهه حاد با پرتوهای مادون قرمز احتمال سوختگی پوست وجود دارد. حرارت ایجاد شده در بخش‌های مختلف چشم در اثر تابش پرتو می‌تواند بسیار مخاطره‌آمیز باشد. کارگران در مواجهه تابش پرتو مادون قرمز در کارخانه فولاد ، شیشه‌سازی و ذوب‌آهن دچار آب مروارید می‌گردند. مواجهه طولانی مدت با پرتوهای مادون قرمز می‌تواند ایجاد خال یا لکه قرمز یا قهوه‌ای رنگ روی پوست نماید.



شکل۲۲- اثرات سلامتی و قدرت نفوذ پرتو مادون قرمز در پوست و چشم

حدود مجاز مواجهه مادون قرمز نزدیک و نور مرئی

این حدود مجاز به مقادیری برای پرتوهای مرئی و مادون قرمز نزدیک در محدوده طول موجی ۳۰۵ الی ۳۰۰۰ نانومتر اشاره دارد که کارگران می‌تواند بدون هیچ‌گونه عارضه سلامتی و بهداشتی مواجهه داشته باشد. این حدود بر مبنای اطلاعات در دسترس از نتایج مطالعات تجربی ارائه شده است. حدود مجاز مواجهه شغلی چشم با باند پهن پرتوهای نور مرئی و مادون قرمز نزدیک برای ۸ ساعت کار قابل کاربرد است. در مرحله اول می‌بایست تعیین گردد که آیا منبع مورد نظر دارای طیف نور مریی با درخشندگی کافی است تا به‌عنوان منبع نور مریی شناخته شود.

- اگر درخشندگی بالاتر از یک کاندلا بر سانتی‌متر مربع باشد، حدود مجاز ارائه شده در بخش اول و دوم می‌بایست لحاظ گردد. اگر منبع شامل به‌طور قابل ملاحظه‌ای دارای طیف نور آبی زیادی است حدود مجاز ارائه شده در بخش دوم می‌بایست لحاظ گردد. همچنین اگر طیف تابشی منبع عمدتاً در ناحیه مادون قرمز نزدیک قرار دارد ،حدود مجاز ارائه شده در بخش سوم و چهارم می‌بایست لحاظ گردد.

بخش اول: حفاظت در مقابل آسیب حرارتی شبکیه ناشی از منبع تابش نور مرئی

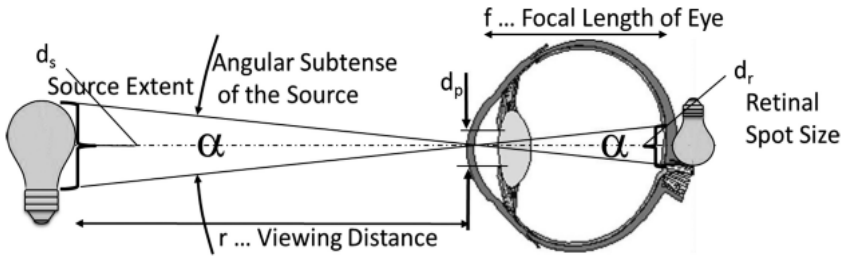
ابتدا می‌بایست تابندگی مؤثر لامپ L_R برحسب $W/cm^2.sr$ با تلفیق تابندگی طیفی L_λ برحسب $W/(cm^2.sr.nm)$ توزین شده از طریق تابع مخاطره حرارتی R_λ از رابطه زیر یا با استفاده از دستگاه سنجش دارای فیلتر R_λ تعیین شود.

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda . R_{(\lambda)} \Delta_\lambda$$

در رابطه فوق، L_λ تابندگی طیفی با طول موج λ برحسب $W/(cm^2.sr.nm)$ و $R_{(\lambda)}$ اثربخشی طیفی نسبی (بدون واحد) و Δ_λ پهنای باند برحسب نانومتر است.

برای منبع دایره‌ای شکل مثل لامپ‌های روشنایی، وتر زاویه‌ای α برحسب رادیان برابر با قطر لامپ تقسیم بر فاصله تا چشم دریافت‌کننده است.

$$\alpha(rad) = \frac{ds}{r}$$



شکل ۲۳- مفهوم وتر زاویه‌ای در مواجهه با منبع دایره‌ای

برای منابع مستطیل شکل α ،میانگین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بعد منبع تقسیم بر فاصله تا چشم دریافت کننده است.

$$\alpha(rad) \le \frac{l+w}{2r}$$

منابع تابشی بزرگ معمولاً منابعی با ضریب α بزرگ‌تر از ۱ رادیان می‌باشند. برای این منابع رابطه ۱ ، ۲ و ۳ جهت حفاظت شبکیه چشم بر مبنای مدت زمان مواجهه چشم (مدت زمان رؤیت)استفاده می‌شود.

- ✓ برای مدت زمان رؤیت از ۱ میکروثانیه الی ۰/۰۰۰۶۳ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$L_R(W/(cm^2.sr) \le \frac{640}{t^{0.25}}$$

- ✓ برای مدت زمان رؤیت از ۰/۰۰۰۶۳ ثانیه الی ۰/۲۵ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$L_R(W/(cm^2.sr) \le \frac{16}{t^{0.75}}$$

- ✓ برای مدت زمان رؤیت بیشتر از ۰/۲۵ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$L_R(W/(cm^2.sr) \le 45$$

منابع تابشی کوچک معمولاً منابعی با وتر زاویه کوچک‌تر از ۰/۱ رادیان می‌باشند. برای این منابع اگر مدت زمان رؤیت از ۱ میکروثانیه الی ۰/۰۰۰۶۳ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه ۱ تعیین می‌گردد.

- ✓ برای مدت زمان رؤیت از ۰/۰۰۰۶۳ ثانیه الی ۰/۲۵ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$with\ \alpha < \alpha_{\max} = 0.2.t^{0.5} rad$$

$$L_R(W/(cm^2.sr) \le \frac{3.2}{\alpha \times t^{0.25}}$$

- ✓ برای مدت زمان رؤیت بیشتر از ۰/۲۵ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$with \quad \alpha < \alpha_{\max} = 0.1 \quad rad$$

$$L_R(W/(cm^2.sr) \le \frac{45}{\alpha}$$

بخش دوم: حفاظت در مقابل آسیب فوتوشیمیایی شبکیه ناشی از مواجهه مزمن با نور آبی

ابتدا می‌بایست تابندگی مؤثر منبع نور L_B برحسب $W/cm^2.sr$ با تلفیق تابندگی طیفی L_λ برحسب $W/(cm^2.sr.nm)$ توزین شده از طریق تابع مخاطره حرارتی B_λ از رابطه ذیل با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری دارای فیلتر B_λ تعیین شود:

$$L_B = \sum_{305}^{700} L_\lambda . B_{(\lambda)} \Delta_\lambda$$

در رابطه فوق، L_λ تابندگی طیفی با طول موج λ برحسب $W/(cm^2.sr.nm)$ ، و $B_{(\lambda)}$ اثربخشی طیفی نسبی (بدون واحد) و $\Delta\lambda$ پهنای باند برحسب نانومتر است.

- ✓ برای مدت زمان رؤیت کمتر از ۱۰۰۰۰ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$L_B(W/(cm^2.sr) < \frac{100\left[J/(cm^2.sr)\right]}{t(s)}$$

- ✓ برای مدت زمان رؤیت بیشتر از ۱۰۰۰۰ ثانیه حدود مجاز مواجهه از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$L_B(W/(cm^2.sr) \le 0.01$$

بخش سوم – حفاظت قرنیه و عدسی در مواجهه با پرتو مادون‌قرمز نزدیک:

برای اجتناب از صدمات قرنیه و اثرات احتمالی بر عدسی چشم (بیماری آب مروارید) پرتوگیری از اشعه فروسرخ (۷۷۰nm < λ <۳μm) در محیط‌های خیلی گرم در مدت زمان طولانی (۱۰۰۰ ثانیه و بالاتر) باید به ۱۰ mW/cm^2 محدود شود.

- ✓ برای پرتوگیری‌های در مدت زمان کمتر از۱۰۰۰ ثانیه میزان پرتوگیری مجاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{770}^{3000} E_\lambda . \Delta\lambda \le 1.8 t^{-0.75} \text{W/cm}^2$$

- ✓ برای پرتوگیری‌های در مدت زمان بیشتر از۱۰۰۰ ثانیه میزان پرتوگیری مجاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{770}^{3000} E_\lambda . \Delta\lambda \le 0.01 \text{ W/cm}^2$$

بخش چهارم – حفاظت شبکیه در مواجهه با پرتو مادون قرمز نزدیک(Near IR):

برای لامپ حرارتی فروسرخ یا هر منبع فروسرخ نزدیک (near IR) که خارج از طیف نور مرئی قرار دارد (با درخشندگی کمتر از ۱۰ $^{-۲}$ cd/m^2)، مقدار تابش IR-A یا فروسرخ نزدیک (۷۷۰nm < λ <۱۴۰۰nm) که به چشم می‌رسد در محدوده رابطه ذیل برای مدت زمان مواجهه کمتر از ۸۱۰ ثانیه قابل قبول است.

$$\sum_{770}^{1400} L_\lambda . R\lambda . \Delta\lambda \le \frac{3.2}{\alpha \times t^{.0.25}}$$

این حد بر اساس قطر مردمک ۷ mm تعیین شده است (درصورتی‌که به دلیل فقدان نور کافی مردمک تا این اندازه باز نمی‌شود) و آشکارساز زاویه میدان دید ۱۱ mrad داشته باشد. برای مدت زمان مواجهه بیشتر از ۸۱۰ ثانیه رابطه زیر برقرار است.

$$\sum_{770}^{1400} L_\lambda . R\lambda . \Delta\lambda \le \frac{0.6}{\alpha}$$

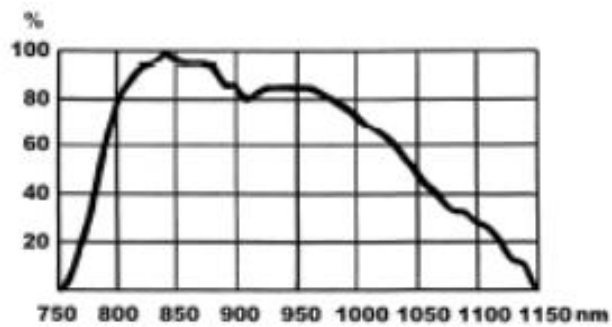
لازم به ذکر است برای منبع دایره‌ای شکل مثل لامپ‌های روشنایی، ضریب α برحسب رادیان برابر با قطر لامپ تقسیم بر فاصله تا چشم دریافت‌کننده است. برای منابع مستطیل شکل α برابر با میانگین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بعد منبع تقسیم بر فاصله تا چشم دریافت کننده است.

$$\alpha(rad) \leq \frac{l+w}{2r}$$

روش‌های اندازه‌گیری پرتو مادون‌قرمز

رادیومتر مطابق با شناسنامه فنی معمولاً قابلیت اندازه‌گیری چگالی تابشی مؤثر را دارند. برای اندازه‌گیری مواجهه کارگران با پرتو مادون‌قرمز دستگاه سنجش در ایستگاه کاری کارگر نزدیک به سطح بدن و فوتوسل آن رو به منبع نگاه داشته می‌شود و مقدار مواجهه برحسب W/m^2 یا $\mu W/cm^2$ ثبت می‌گردد.

شکل۲۴ – نمونه رادیومتر اندازه‌گیری پرتو مادون قرمز نزدیک



شکل ۲۵- منحنی حساسیت و پاسخ دستگاه رادیومتر به طیف پرتوهای مادون‌قرمز

حفاظت در مواجهه با پرتو مادون قرمز

اصول حفاظت در مواجهه با پرتوهای مادون قرمز بر کنترل‌های فنی ، مدیریتی و حفاظت فردی استوار است. کاهش مدت زمان مواجهه و آموزش از جمله اقدامات مدیریتی است. از روش‌های دیگر کاهش مواجهه با گرمای تابشی، استفاده از وسایل حفاظت فردی بازتاب کننده است. با این حال در محیط‌های کار کنترل فنی می‌تواند در کاهش مواجهه با پرتو مادون قرمز بسیار مؤثرتر باشد.

پرتو تابشی مادون قرمز از هوا بدون گرم کردن آن عبور می‌کنند و تنها اجسامی را که در مسیر عبور گرمای تابشی را جذب می‌نماید، گرم می‌کنند. در محیط‌های کاری پرتوهای تابشی را می‌توان از طریق کاهش دمای سطوح یا گسیلندگی آن‌ها کاهش داد. دمای سطوح را می‌توان با کاهش گرمای ورودی به منبع و یا با به‌کارگیری عایق‌های حرارتی کاهش داد. گسیلندگی سطوح را نیز می‌توان با پوشش دادن سطوح با ورق‌ها یا فویل‌های آلومینیومی یا حتی استفاده از رنگ‌های آلومینیومی کاهش داد.

میزان گرمای تابشی را می‌توان با استفاده از حفاظ گذاری بین محل کار کارگر و منبع تابش گرما نیز کاهش داد. عوامل مؤثر بر حفاظ گذاری شامل نوع حفاظ، محل قرارگیری و نحوه نگهداری از آن می‌باشد. حفاظ می‌بایست تمامی مسیر دریافت تابش را پوشش دهد بدون اینکه در تهویه طبیعی جریان هوا ایجاد اختلال کند. در مورد حفاظ‌هایی که کارایی آن‌ها بستگی به ضریب گسیلندگی دارد، لازم است برنامه تمیزکاری و نگهداری حفاظ تهیه و اجرا شود. حفاظ‌های مورد استفاده به‌صورت کلی بر چهار نوع هستند: بازتابشی، جاذب، شفاف و قابل انعطاف که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند:

انواع حفاظ‌های تابش مادون قرمز

سطوح آلومینیومی، فولاد زنگ نزن (استیل)، مواد با سطح براق و درخشان از جمله حفاظ‌های بازتابشی گرما هستند. سطوح استیل و آلومینیومی ۹۵ ٪ از گرمای تابشی را بازتاب می‌کنند. فویل‌های آلومینیومی و کاغذهای دیواری و مواد عایق حاوی

فایبرگلاس و پشم‌شیشه نیز می‌توانند ۹۵٪ بازتاب داشته باشند. استفاده از رنگ‌های آلومینیومی نیز می‌تواند تا ۶۵ ٪ بازتاب داشته باشد. لازم به ذکر است که ضخامت حفاظ‌های آلومینیومی به کار رفته جهت کنترل گرمای تابشی دارای اهمیت نیست. حفاظ‌های آلومینیومی نباید رنگ‌آمیزی شوند و توجه شود که آلودگی‌هایی مثل روغن، دوده و سایر مواد پوششی، میزان کارایی آن‌ها را کاهش می‌دهد. در صورتی که حفاظ بر روی جدار کوره‌ها و اجاق‌ها یا گرم‌کن‌ها استفاده می‌شود باید با فاصله کمی از جداره نصب گردند. فضای ایجاد شده بین جداره و حفاظ نقش دودکش انتقال حرارت را خواهد داشت.

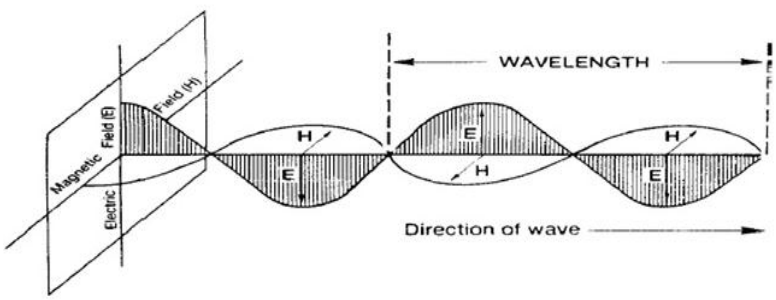
حفاظ‌های جاذب که به خنک شونده با آب نیز موسوم هستند شامل آهن اکسید شده یا استیل با سطح سیاه می‌باشند که از داخل با آب خنک می‌شود. این مواد به راحتی تابش‌های مادون قرمز را جذب می‌کنند، سپس گرما از طریق ایجاد جریان آب بین دو صفحه حفاظ بر اساس مکانیسم رسانش حذف می‌گردد. در صورتی که از ورقه‌های آلومینیومی در سمت خنک‌تر حفاظ استفاده شود میزان تابش به حداقل ممکن خواهد رسید.

شیشه‌های مخصوص، زنجیرهای معلق و مش‌های فلزی معلق از این دسته می‌باشند. شیشه‌های مورد استفاده انتقال تابش‌های مادون قرمز را کاهش می‌دهند. نوعی از این شیشه‌ها جاذب تابش هستند. استفاده از این شیشه در پنجره اتاق‌های کنترل نزدیک به منابع گرمازا کاربرد دارد. زنجیرها و مش‌های فلزی سال‌های طولانی در کارخانه‌های فولاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ویژگی بازتاب‌کنندگی حلقه‌های زنجیره میزان گرمای تابشی دریافتی کارگران را کاهش می‌دهد و به کارگر اجازه می‌دهد فعالیت کاری خود را به‌صورت دینامیک بدون هیچ محدودیتی در محدوده حفاظ انجام دهد.

حفاظ قابل انعطاف شامل پارچه‌های بافته شده با آلومینیوم و آزبست، کاغذ دیواری یا لایه‌های مشابه می‌باشند. از پارچه‌های بافته شده با آلومینیوم برای ساخت لباس‌های حفاظت فردی در مقابل گرمای تابشی ازجمله پیش‌بند، دستکش استفاده می‌شود.

پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی

طبق نظریه ماکسول یک میدان الکتریکی متغیر همواره با یک میدان مغناطیسی متغیر همراه است. همچنین یک میدان مغناطیسی متغیر نیز همواره با یک میدان الکتریکی متغیر همراه می‌باشد. این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی که با یکدیگر مرتبط هستند. یک موج الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند. یک موج الکترومغناطیس ممکن است با شتاب دادن به یک ذره باردار تولید شود، در این صورت بخشی از انرژی ذره باردار به‌صورت موج الکترومغناطیس منتشر می‌گردد. مطابق با شکل۲۶ در خصوص یک موج الکترومغناطیس، میدان‌های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) عمود بر یکدیگر و همچنین در جهت انتشار موج می‌باشند. انرژی امواج الکترومغناطیس به شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل دهنده آن بستگی دارد. سرعت تمام امواج الکترومغناطیس در هوا یا خلأ برابر سرعت نور معادل ۳×۱۰^{۸} متر بر ثانیه است.



شکل ۲۶- انتشار موج الکترومغناطیس و برهم‌کنش میدان‌های الکتریکی(E) و مغناطیسی(H)

در امواج الکترومغناطیس انرژی از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی انتقال می‌یابد. این امواج قابل انتشار در محیط خلأ نیز هستند. یک موج الکترومغناطیس بر اساس تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی شناخته می‌شود. معمولاً شدت میدان الکتریکی برحسب واحد ولت بر متر (V/m) و شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر (A/m) بیان می‌شود. معادلات کامل ریاضی بیان ارتباط بین میدان مغناطیسی و الکتریکی امواج بسیار پیچیده است. با این وجود روابط ساده‌تری برای بیان انتقال انرژی امواج الکترومغناطیس در فضای آزاد وجود دارد که به شرح زیر است.

$E = H \times 377$

E : شدت میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر

H : شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر

377 : ثابت امپدانس ویژه فضای آزاد برحسب اهم

در شرایط موج صفحه‌ای در میدان دور از منبع تابش امواج، امپدانس فضای آزاد (Z) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

در رابطه فوق μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ε ضریب نفوذپذیری الکتریکی است که برای فضای آزاد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Z = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.854 \times 10^{-12}}} = 377\Omega$$

میزان انرژی امواج الکترومغناطیس انتشاریافته تحت عنوان کمیت چگالی توان تابشی امواج برحسب وات بر مترمربع (W/m^2) طبق رابطه زیر به شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی امواج وابسته است.

$$S = E \times H = \frac{E^2}{377} = 377H^2$$

S : چگالی توان تابشی برحسب وات بر مترمربع

E : شدت میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر

H : شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر

لازم به ذکر است این رابطه تنها در میدان دور از منبع تابش امواج الکترومغناطیس صدق می‌کند. در میدان دور شرایط موج صفحه‌ای برقرار است و میدان الکتریکی و مغناطیسی بر هم عمود بوده و نسبت بین میدان الکتریکی و مغناطیسی ثابت و برابر ۳۷۷ اهم است. این مقدار ثابت به‌عنوان امپدانس فضای آزاد شناخته می‌شود. در محدوده میدان دور، جهت تعیین چگالی توان تابشی تنها کافی است میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شود و با استفاده از رابطه فوق‌الذکر، میزان چگالی توان تابشی محاسبه شود. با توجه به اینکه مربع میدان مغناطیسی و الکتریکی متناسب با میزان چگالی توان تابشی

است، معمولاً تجهیزات اندازه‌گیری مربعات میدان‌های الکتریکی E^2 و مغناطیسی H^2 را اندازه‌گیری می‌کنند. ضرایب تبدیل کمیت‌های مختلف میدان مغناطیسی در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- ضرایب تبدیل کمیت‌های مختلف میدان مغناطیسی

کمیات	$T(Wb/m^2)$	G	A/m	Oe
$T(Wb/m^2)$	۱	$۱۰^۴$	$۷/۹۶ \times ۱۰^۵$	$۱۰^۴$
G	$۱۰^{-۴}$	۱	۷۹/۶	۱
A/m	$۱/۲۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۵۶ \times ۱۰^{-۲}$	۱	$۱/۲۵۶ \times ۱۰^{-۲}$
Oe	$۱۰^{-۴}$	۱	۷۹/۶	۱

T: تسلا (وبر بر متر مربع) G : گوس A/m: آمپر بر متر Oe: اورستد

همان‌طور که در جدول ۹ قابل مشاهده است، مهم‌ترین عامل در به‌کارگیری امواج برای مصارف مختلف، فرکانس یا محدوده فرکانسی امواج است. لازم به ذکر است از جنبه اثرات بهداشتی، نحوه اندازه‌گیری و ارزیابی و همچنین اصول حفاظتی نیز مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده فرکانس امواج می‌باشد.

منابع پرتوهای مایکروویو و رادیو فرکانسی

در جدول ۱۰ منابع مصنوعی ساطع کننده امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی در محدوده‌های فرکانسی مختلف و کاربرد هر یک از آن‌ها ارائه شده است، در ادامه این بخش کاربردهای مهم امواج در محدوده‌های فرکانسی مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این بخش سعی بر آن است که بیشتر منابع مصنوعی شغلی شامل تجهیزات و فرایندهای مختلف که امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی تولید می‌کنند مورد بررسی قرار گیرند. علامت 00 : نشان‌دهنده محدوده فرکانس پایه، که در کاربرد ذکرشده به‌طور متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد. علامت 0 : نشان‌دهنده در کاربرد ذکرشده می‌توانند از فرکانس‌های دیگری نیز استفاده نمایند.

جدول۹- تقسیم‌بندی طیف امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی

گروه	فرکانس	طول موج	نام‌گذاری	نمونه منابع انتشار امواج
	>300 GHz	<1mm	مادون قرمز	-
مایکروویو	300 GHz -30 GHz	1mm-1cm	فرکانس بی‌نهایت بالا (EHF)	ارتباطات ماهواره‌ای
	30 GHz -3 GHz	1cm-10cm	فرکانس فوق‌العاده بالا (SHF)	ارتباطات ماهواره‌ای، تجهیزات مختلف رادار از جمله دوربین‌های سرعت‌سنج پلیس
	3 GHz -300 MHz	10cm-1m	فرکانس بسیار بالا (UHF)	فرستنده‌های تصویری ارتباطات، تاکسی‌های بی‌سیم، رادارها، گرم‌کن‌ها، شبکه‌های تلفن سلولی
رادیو فرکانسی	300 MHz -30 MHz	1m-10m	فرکانس خیلی بالا (VHF)	فرستنده‌های تصویری رادیویی، سیستم‌های اعلام حریق، سیستم‌های ارتباطات پلیسی، پزشکی (دیاترمی)
	30 MHz -3 MHz	10m-100m	فرکانس بالا (HF)	امواج رادیویی، دیاترمی
	3 MHz -300 KHz	100m-1Km	فرکانس متوسط (MF)	امواج رادیویی، سیستم‌های ارتباطات دریایی
	300 KHz -30 KHz	1Km-10Km	فرکانس پایین (LF)	سیستم‌های ارتباطات دریایی و زیر دریایی
	30 KHz -3 KHz	10Km-100Km	فرکانس خیلی پایین (VLF)	ارتباطات با محدوده بلند، نیروی دریایی،گرمایش القایی، نمایشگرهای تصویری
زیر رادیو فرکانسی	3 KHz -300 Hz	100Km-1000Km	فرکانس بسیار پایین (ULF)	گرمایش القایی
	300 Hz -3 Hz	1000 Km – 0 Km	فرکانس فوق‌العاده پایین (ELF)	ارتباطات زیر دریایی، گرمایش القایی ،انتقال و توزیع نیروی برق، لوازم الکتریکی
	0 Hz	-	پایا (Static)	میدان مغناطیسی طبیعی زمین، تصویر برداری تشدید مغناطیسی، الکترولیز صنعتی

جدول ۱۰- مواجهه شغلی و عمومی با منابع رایج تولید امواج رادیوفرکانسی و مایکروویو

منابع تولید امواج	امواج مرتبط با منبع مورد نظر			
	Static	ELF	(IF) MF	RF/MW
گرمایش القایی		00	0	
عمل جراحی و فیزیوتراپی			00	00
گرمایش دی الکتریک				00
جوشکاری قوس الکتریکی	00	00	0	
جوشکاری نقطه‌ای	0	00	0	
واکنش‌های الکتروشیمیایی				00
واکنش‌های الکترولیز	0	00		
اجاق‌های مایکروویو صنعتی				00
تصویربرداری تشدید مغناطیسی	00	00		00
وسایل نقلیه الکتریکی (قطار، مترو)	0	0		
سامانه‌های رادار				0
امواج رادیویی و تلویزیونی		0	0	0
ایستگاه‌های تلفن همراه				00
شبکه‌های محلی بی‌سیم				00
تلفن‌های بی‌سیم				0
بلوتوث				00
شبکه‌های انتقال و توزیع نیروی الکتریسیته	0	00		
لوازم الکتریکی		0		
آهنرباهای صنعتی بزرگ (جرثقیل‌ها)	0	00		

امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی که دارای کاربردهای فوق‌العاده گسترده است. در این بخش منابعی که باعث ایجاد مواجهه عمومی و شغلی با امواج مایکروویو می‌گردند، تشریح می‌گردد. در جدول ۱۱ کاربردهای عمومی امواج مایکروویو بر اساس محدوده فرکانسی توصیف شده است.

جدول ۱۱ -کاربردهای عمومی امواج مایکروویو بر اساس محدوده فرکانسی

نوع کاربرد	محدوده فرکانس	نام محدوده فرکانسی
دزدگیر، کنترل از راه دور	در حدود 40 MHz	VHF
تلفن‌های بی‌سیم متداول	40 - 50 MHz	VHF
هواپیماهای کنترل از راه دور	در حدود 72 MHz	VHF
ماشین‌های اسباب‌بازی کنترلی	در حدود 75 MHz	VHF
بلوتوث	2.4 GHz	UHF
شبکه‌های بدون سیم (WiFi)	2.45 and 5.3GHz	UHF and SHF
گرم کن مایکروویو	2.45GHz	UHF
رادارهای کنترل ترافیک هوایی	960 - 1215 MHz	UHF
سیستم‌های موقعیت یاب جهانی	1227 - 1557 MHz	UHF
تلفن‌های همراه	900 MHz /1800MHz	UHF

میدان‌های انتشار امواج

در اطراف منابع ساطع کننده امواج (آنتن‌ها) محدوده‌ها یا میدان‌هایی قابل تعریف است که در آن‌ها انتشار امواج دارای خصوصیات خاص خود می‌باشد.

میدان نزدیک[1]

در نزدیکی آنتن مطابق با شکل ۱۷ ناحیه‌ای وجود دارد که به آن میدان نزدیک گفته می‌شود. میدان نزدیک به فاصله تقریبی کمتر از یک برابر طول موج پرتو اطلاق می‌شود. خصوصیات امواج الکترومغناطیسی در این فاصله دارای تفاوت‌هایی با میدان دور است. در این میدان برخلاف میدان دور تناسب ریاضی بین مقادیر چگالی توان تابشی و مقادیر شدت میدان الکتریکی یا مغناطیسی وجود ندارد. جهت انجام ارزیابی‌های بهداشتی در این محدوده می‌بایست شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی به‌طور مجزا اندازه‌گیری و با حدود مجاز مقایسه گردد.

1 -Near field

بخشی از میدان نزدیک، ناحیه واکنشی نامیده شده است و انرژی در این بخش ذخیره و بازیابی شده و مجدداً ساطع می‌شود. در میدان نزدیک، میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی برهم عمود نیستند و جهت دقیق این میدان‌ها از یک نقطه به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این موضوع باعث ایجاد اختلاف در طول مسیر امواج، اختلاف فاز و ایجاد اختلالات در امواج الکترومغناطیس می‌شود. نتیجه نهایی این اختلالات ایجاد شدت‌های حداقل و حداکثر امواج از نقطه‌ای به نقطه دیگر است. محدوده فاصله‌ای میدان نزدیک از منبع تولید امواج با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$R_{nf} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

D: بزرگ‌ترین بعد خطی صفحه بازتاب‌کننده سهمی آنتن برحسب متر

λ: طول موج امواج تابشی برحسب متر

میدان میانی[1]

بین محدوده میدان نزدیک و میدان دور از منبع تابش امواج، ناحیه‌ای دیگری تحت عنوان میدان میانی تعریف شده است. در این میدان نیز هنوز نسبت بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برقرار نیست. در میدان میانی شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی به‌صورت خطی با افزایش فاصله بر اساس رابطه 1/r کاهش می‌یابد.

میدان دور[2]

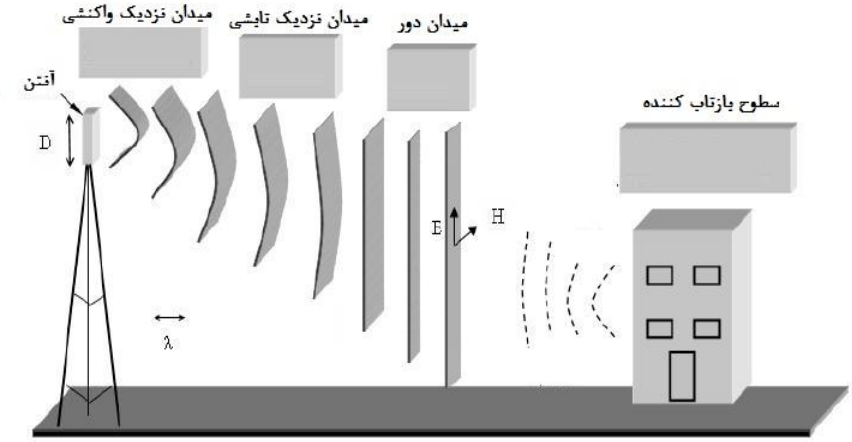
در این ناحیه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نسبت به هم عمود هستند و اندازه‌گیری چگالی توان تابش قابل انجام است. چگالی توان تابشی امواج با افزایش فاصله از منبع تولید بر اساس قانون عکس مجذور فاصله $1/r^2$ کاهش می‌یابد.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_2^{\ 2}}{R_1^2}$$

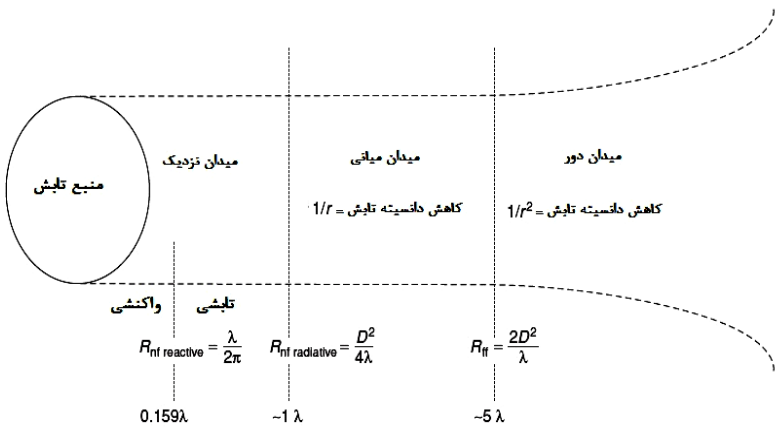
1- Intermediate field

2- Far field

در این میدان میزان انرژی را می‌توان بر مبنای کمیت چگالی توان تابشی[1] برای کل موج بیان نمود و یا بر اساس شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌صورت مجزا بیان گردد.



شکل۲۷- نحوه انتشار امواج مایکروویو از یک نمونه آنتن ارتباطی



شکل ۲۸- میدان‌های قابل تصور در فواصل مختلف از منبع تولید امواج

محل شروع میدان دور بستگی به قطر آنتن و طول موج امواج ساطع شده دارد. هرچند مکان دقیق برای محدوده میدان‌ها قابل تعیین نمی‌باشد، برای اهداف ارزیابی امواج مکان

1 -Power density

شروع میدان دور بر اساس رابطه زیر قابل تعیین است. طبق قاعده سر انگشتی محدوده شروع میدان دور تقریباً معادل بیش از ۱۰ برابر طول موج امواج ساطع‌شده می‌باشد.

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

مثال: در چه فاصله‌ای از آنتنی با قطر ۲ متر که امواج مایکروویو با فرکانس ۳۰۰۰ مگاهرتز را تابش می‌کند میدان دور شروع می‌گردد؟

$$R_{ff} = \frac{2\times(2m)^2}{0.1m} = 80m$$

میانگین چگالی توان تابش در دهانه یک آنتن با تابش یکنواخت با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$S_0 = \frac{P}{A} \ , A = 4\pi r^2$$

S_0: چگالی توان تابش برحسب وات بر مترمربع

P: توان خروجی منبع تابش برحسب وات

A: سطح مقطع منبع برحسب مترمربع

در میدان نزدیک حداکثر چگالی توان تابش چهار برابر میانگین چگالی توان تابش در دهانه آنتن می‌باشد که به‌صورت زیر قابل‌بیان است.

$$S_{nf} = \frac{4P}{A} = 4S_0$$

در میدان میانی چگالی توان تابش به‌صورت خطی با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. چگالی توان تابش در ناحیه میانی در فاصله R از آنتن به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$S_{if} = S_{nf}\frac{R_{nf}}{R} = 4S_0\frac{R_{nf}}{R}$$

در میدان دور در فاصله R از آنتن با سطح مقطع A و بهره آنتن G بدون در نظر گرفتن بازتاب‌های سطح زمین، میزان چگالی توان تابش از رابطه زیر برآورد می‌شود.

$$S_{ff} = G\times\frac{P}{A} = \frac{AP}{\lambda^2 R^2}$$

مثال: جهت ارزیابی مخاطرات بهداشتی آنتن دو قطبی که امواج مایکروویو با توان ۱۰۰۰ وات و فرکانس ۳۰۰۰ مگاهرتز از یک بازتاب‌کننده سهمی دایره‌ای شکل با قطر ۰/۷۵ متر ساطع می‌کند، موارد زیر را محاسبه نمایید.

الف- میانگین چگالی توان تابش در دهانه آنتن

ب-حداکثر چگالی توان تابش در میدان نزدیک آنتن

ج-محدوده مکانی شروع میدان دور از آنتن

د-چگالی توان تابش در فاصله ۲۵۰متری از آنتن

ه-فاصله ای که در آن چگالی توان تابش برابر با ۱۰ میلی وات بر سانتی‌مترمربع است؟

الف) $S_0 = \frac{P}{A} = \frac{1000W}{\frac{\pi}{4}(0.75m)^2} = 2236\frac{w}{m^2} = 226.3\frac{mw}{cm^2}$

ب) $S_{nf} = 4S_0 = 4\times 226.3\frac{mw}{cm^2} = 905\frac{mw}{cm^2}$

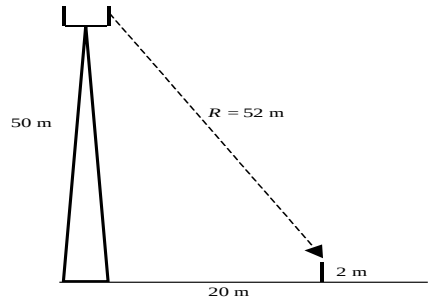
ج) $S_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2(0.75m)^2}{0.1m} = 11.25m$

د) $S_{ff} = \frac{AP}{\lambda^2 R^2} = \frac{\left[\frac{\pi}{4}(0.75m)^2\right]\times 1000w}{(0.1m)^2\times(250m)^2} = 0.71\frac{w}{m^2}$

ه) $R = \sqrt{\frac{AP}{\lambda S_{ff}}} = \sqrt{\frac{\left[\frac{\pi}{4}\times(0.75)^2\times 1000w\right]}{(0.1m)^2\times 100\frac{w}{m^2}}} = 21m$

تعیین فاصله مؤثر بین محل آنتن و محل اندازه‌گیری امواج، اگر به‌طور مثال ارتفاع آنتن برابر ۵۰ متر و فاصله افقی از آنتن برابر ۲۰ متر باشد و ارتفاع محل اندازه‌گیری ۲ متر باشد، به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$R = \sqrt{48^2 + 20^2} = 52m$



شکل ۲۹- تعیین فاصله مؤثر بین محل آنتن و محل اندازه‌گیری امواج

اثرات بیولوژیکی پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی

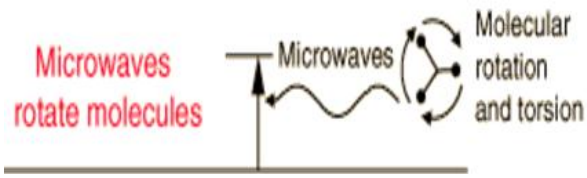
بر اساس مطالعات انجام‌شده تا به اکنون اثرات بیولوژیکی متعددی در خصوص امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی شناخته‌شده و ارائه گردیده‌اند. زمانی که اثرات بیولوژیک عمدتاً ناشی از ایجاد حرارت در بافت بدن است به آن اثرات حرارتی گفته می‌شود و در شرایطی که اثرات بیولوژیک با ایجاد حرارت مرتبط نباشد به آن اثر غیرحرارتی گفته می‌شود. در این بخش اثرات حرارتی و غیرحرارتی امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی توصیف می‌گردد.

الف- اثرات حرارتی

یک توافق کلی در خصوص مهم‌ترین اثر فراوان امواج بر بدن انسان در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ کیلوهرتز که اثرات حرارتی ناشی از انتقال و جذب انرژی امواج الکترومغناطیس در بدن است وجود دارد. بخش اعظمی از بدن انسان در قالب بافت‌های مختلف از مولکول‌های آب تشکیل شده است که این مولکول‌های قطبی مستعد تأثیرپذیری از امواج الکترومغناطیس احاطه‌کننده هستند. اثرات امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی بر بافت‌های بدن به‌صورت تأثیر بر سیکل و جهت قطبش مولکول‌های قطبی در راستای میدان الکترومغناطیسی خارجی است. به علت عدم توانایی مولکول‌های قطبی برای پیروی از این تغییرات، چرخش و نوسان در آن‌ها ایجاد می‌شود که منجر به کسب و دریافت انرژی از میدان به‌صورت گرما شده و دمای بافت افزایش می‌یابد. با توجه به

استفاده گسترده از گرم‌کن‌های مایکروویو جهت گرم کردن و پخت مواد غذایی مثل گوشت اغلب افراد آگاهی لازم در خصوص اثرات حرارتی این امواج بر بدن را کسب نموده‌اند. علاوه بر این در صورت مواجهه موضعی، امواج می‌تواند دمای موضعی بافت‌های در مواجهه را افزایش دهند.

در بدن انسان سالم سیستم تنظیم حرارت معمولاً بر حرارت جذب‌شده غلبه می‌کند. در اثر افزایش دمای بدن به نقطه‌ای خاص، این سیستم قادر به حفظ دمای بدن در شرایط طبیعی نیست و ادامه روند افزایشی دمای بدن تا دمای ۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌تواند صدمات غیرقابل جبرانی را به بافت‌های بدن وارد نماید.



شکل ۳۰- مکانیسم اصلی اثر حرارتی پرتوهای مایکروویو بر ماده

ب- اثرات غیرحرارتی

در سال‌های اخیر اثرات بیولوژیکی غیرحرارتی امواج مورد توجه زیادی قرار گرفته است، با این حال تا به امروز هنوز به‌طور شفاف تشریح نشده‌اند. در این راستا در مطالعات مختلف سعی شده است اثرات امواج در سطح سلولی مورد بررسی قرار گیرد. این تحقیقات جهت تعیین اثرات احتمالی غیرحرارتی امواج بر بدن تحت شرایطی که دمای فیزیولوژیک بدن علیرغم مواجهه با امواج با شدت‌های پایین‌تر توسط سیستم کنترلی بدن در شرایط طبیعی حفظ شده است، تمرکز دارد. مطابق با استاندارد C95.3 ، اثرات غیرحرارتی شامل هرگونه اثرات ناشی از جذب امواج الکترومغناطیس است که وابسته به ایجاد حرارت و افزایش دمای قابل اندازه‌گیری در بدن نباشد. هرچند انرژی فوتون‌های این امواج به‌اندازه‌ای بزرگ نیست که بتواند عامل یونیزاسیون اتم‌ها باشد، با این حال اثرات غیرحرارتی می‌تواند در همین محدوده از انرژی امواج رخ دهد. یکی از مکانیسم‌های مهم بروز اثرات غیرحرارتی،

ایجاد جریان یونی است که به‌صورت حرکت یون‌های کلسیم تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی متناوب خارجی بیان می‌گردد. با این حال حرکت این یون‌ها به‌شدت از طریق ویسکوزیته مایعات مجاور محدود و کاهش می‌یابد. مکانیسم بعدی شامل پلاریزاسیون سلول‌ها در حضور میدان الکتریکی است. به علت القاء بار بر سطح سلول‌ها، سلول‌ها دوقطبی الکتریکی شده ، سلول‌های پلاریزه شده مشابه را جذب می‌کنند و در ادامه جابجایی و چرخش سلول‌ها نیز رخ می‌دهد. اثرات بیولوژیکی مرتبط با غشاء سلولی نیز می‌تواند تحت تأثیر امواج رخ دهد. مطالعات سلولی نشان می‌دهد ساختار غشاء و عملکرد آن در مواجهه با امواج تغییر می‌کند. مهم‌ترین اثراتی که می‌تواند منجر به آسیب کلی DNA شده و زمینه‌ساز بروز احتمالی سرطان گردد. شامل موارد زیر است.

۱- مطالعات متعدد نشان داده‌اند که امواج الکترومغناطیس در شدت‌های پایین، پیوند یون‌های کلسیم را از غشاء سلول‌های زنده حذف می‌کنند و در نتیجه باعث ایجاد منافذ و نشت می‌شوند.

۲- مطالعات نشان داده‌اند تراوش آنزیم تخریب‌کننده DNA از طریق غشاء لیزوزوم که منجر به تکه‌تکه شدن DNA می‌شود در سلول‌های در معرض امواج مایکروویو مشاهده شده است. تغییر ساختار و عملکرد DNA می‌تواند بسترساز بروز سرطان باشد. زمانی که این پدیده در سلول‌های جنسی رخ می‌دهد باروری را کاهش داده و صدمات ژنتیکی را در نسل‌های بعدی به دنبال دارد.

۳- نشت یون‌های کلسیم به سیتوزول به‌عنوان یک محرک متابولیسم عمل می‌کند که می‌تواند باعث افزایش ریسک بروز سرطان در بدن گردد.

۴- نشت یون‌های کلسیم به سلول‌های مغزی تولید پالس‌های عصبی می‌کند که می‌تواند باعث درد و علائم عصبی در افراد حساس گردد.

۵- تولید رادیکال‌های آزاد درون سلول که باعث مرگ سلولی از طریق صدمه به ماکرو مولکول‌هایی مثل DNA پروتئین‌ها و غشاء سلولی می‌گردد.

نکته مهم: حدود مجاز مواجهه فعلی در خصوص پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی بر مبنای اثرات حرارتی تدوین شده و گزارش شده است که اثرات غیرحرارتی به‌عنوان اثرات احتمالی به دوز وابسته نیست و در کمترین مقادیر دوز مواجهه هم ممکن است ایجاد شود. با این حال افزایش شدت مواجهه با افزایش ریسک ایجاد اثرات غیرحرارتی متناسب است.

روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی

انتخاب تجهیزات اندازه‌گیری می‌بایست بر اساس مشخصات و ماهیت امواج صورت گیرد. از جنبه بهداشتی هدف اصلی اندازه‌گیری امواج، تعیین سطح مواجهه در مقایسه با استانداردها و راهنماهای بهداشتی است. از جنبه کاربردی وسایل اندازه‌گیری می‌بایست دارای ویژگی‌های سهولت حمل‌ونقل، کاربری مناسب و وزن کم باشند. با این حال وسایل اندازه‌گیری نیز وجود دارند که به دلیل حجم و وزن زیاد به راحتی قابل جابجایی نیستند و به‌صورت ثابت استفاده می‌شوند. علاوه بر این پایش گرهای فردی شامل تجهیزاتی است که یا به کارگر نصب می‌شود و یا در محل استقرار افراد برای هشدار دهی در خصوص حد آستانه مجاز مواجهه با امواج نصب می‌گردد. مهم‌ترین روش‌های توصیه‌شده توسط موسسه مهندسین برق و الکترونیک[1] IEEE انستیتوی استاندارد ملی آمریکا[2] ANSI جهت اندازه‌گیری و ارزیابی امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی ارائه شده است.

اهداف اندازه‌گیری

یکی از مهم‌ترین مراحل در اندازه‌گیری و ارزیابی امواج تعیین اهداف اندازه‌گیری است که روش اندازه‌گیری و تجهیزات مورد نیاز را مشخص می‌کند. اندازه‌گیری امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی می‌تواند با اهداف زیر صورت گیرد.

الف- اندازه‌گیری موضعی به منظور تعیین نشت امواج از دستگاه‌ها و منابع مختلف

ب- اندازه‌گیری موضعی به منظور تعیین میزان مواجهه فردی در محیط انتشار امواج

ج- اندازه‌گیری محیطی به منظور تعیین نحوه توزیع و انتشار امواج در سطح محیط

اولین اقدام در فرایند اندازه‌گیری، جمع‌آوری اطلاعات لازم در خصوص محیط مورد مطالعه و نحوه مواجهه افراد است. بدین منظور می‌بایست مشخصات فنی منابع و همچنین مشخصات امواج انتشاریافته از منابع به ویژه از لحاظ فرکانسی، مدت زمان مواجهه، تعداد افراد در مواجهه و محل‌های تردد و ایستگاه‌های کاری مشخص گردیده و در داخل برگه‌های مخصوص ثبت گردد.

1- Institute of Electrical and Electronics Engineers
2- American National Standards Institute

روش موضعی

در روش موضعی در صورتی که هدف اندازه‌گیری تعیین میزان نشت امواج در اطراف منبع مورد نظر باشد، می‌بایست در ایستگاه‌های مختلف اطراف دستگاه در فاصله مناسب با توجه به ماهیت دستگاه، اندازه‌گیری صورت گیرد. تعیین محل اندازه‌گیری در این شرایط می‌تواند حدود مجاز در خصوص میزان نشت قابل‌قبول با توجه به فاصله استاندارد توصیه‌شده از دستگاه باشد. در مورد گرم‌کن‌های مایکروویو طبق توصیه مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا[1] OSHA میزان مجاز نشت برای فاصله ۵ سانتی‌متری از درب دستگاه ارائه شده است. در صورتی که هدف اندازه‌گیری تعیین میزان مواجهه افراد باشد، محل اندازه‌گیری، ایستگاه کاری یا محل تردد افراد خواهد بود. در اندازه‌گیری موضعی می‌بایست پروب دستگاه اندازه‌گیری حداقل ۵ سانتی‌متر از منبع تولید امواج فاصله داشته باشد. همچنین در ارزیابی مواجهه فردی، پروب دستگاه اندازه‌گیری می‌بایست با بدن فرد اندازه‌گیری کننده حداقل ۵۰ سانتی‌متر فاصله داشته باشد. علاوه بر این پروب دستگاه اندازه‌گیری می‌بایست حداقل ۲۰ سانتی‌متر از سطوح بازتاب‌کننده امواج در محیط مورد نظر فاصله داشته باشد.

روش محیطی

اگر هدف بررسی تعیین توزیع انتشار امواج در سطح محیطی باشد که افراد به‌طور مداوم در این محیط در حال حرکت و تردد هستند، روش اندازه‌گیری محیطی مناسب‌تر است. در این روش محیط به نواحی شطرنجی با ابعاد یکسان متناسب با مساحت محیط کار تقسیم‌بندی شده و مرکز هر ناحیه یک ایستگاه اندازه‌گیری خواهد بود. در این راستا ابتدا می‌بایست نقشه شبکه‌بندی مربعی یا مستطیل شکل از محیط کار تهیه گردد. ابعاد ایستگاه‌ها برای محیط‌های تا مساحت ۲۰ مترمربع به‌صورت ۱در۱ متر، برای محیط‌های تا مساحت ۱۰۰ مترمربع به‌صورت ۱ در۲ متر و برای محیط‌های با مساحت بزرگ‌تر از ۱۰۰

1- Occupational Safety and Health Administration

مترمربع به‌صورت ۲ در۳ متر توصیه شده است. بعد از انجام اندازه‌گیری مقادیر امواج می‌تواند روی نقشه محیط مورد مطالعه ثبت شود و یا اینکه در جدول جداگانه با در نظر گرفتن کد مشخص برای هر ایستگاه روی نقشه نوشته شود. تهیه نقشه خطوط هم‌اندازه یکی از روش‌های متداول ترسیمی در بیان نتایج ارزیابی توزیع محیطی امواج در محیط است. استفاده از نرم‌افزارهایی مثل Surfer و Arc View در این زمینه کاربرد گسترده‌ای دارد.

کمیت‌های بیان شدت امواج

شدت لحظه‌ای: در این روش یک اندازه‌گیری لحظه‌ای به‌طور مثال حداقل یک ثانیه در محل مواجهه فرد انجام می‌گیرد. از این کمیت در بررسی‌های توزیع محیطی امواج بیشتر استفاده می‌شود.

شدت میانگین وزنی زمانی: در این روش مطابق با توصیه کمیته ICNIRP یک میانگین وزنی از میزان مواجهه شغلی در یک مقطع زمانی به‌طور مثال ۱ یا ۳ دقیقه و حداکثر ۶ دقیقه جهت مقایسه با حدود مجاز استاندارد با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ثبت می‌گردد.

جهت تعیین میزان مواجهه شغلی کلیه اندازه‌گیری‌های میدان‌های الکترومغناطیسی می‌بایست در یک دوره زمانی ۶ دقیقه‌ای یا یک‌دهم ساعت صورت گیرد. به‌عنوان مثال اگر حد مجاز ممکن مواجهه برای منبع خاصی برابر ۱۰ وات بر سانتی‌مترمربع در دوره زمانی ۶ دقیقه باشد، میانگین وزنی زمانی شدت مواجهه در دوره زمانی ۶ دقیقه نباید بیشتر از ۱۰ میلی وات بر مترمربع باشد. فاکتور زمانی ۶ دقیقه می‌تواند به‌عنوان ثابت زمانی حرارتی در نظر گرفته شود. مدت زمان مواجهه ۶ دقیقه یا بیشتر می‌تواند اجازه دهد که مکانیسم‌های رسانش یا هدایت، گردش خون و تنظیم حرارت، افزایش دما در بخشی از بدن را تحت تأثیر قرار دهند.

اکثر وسایل اندازه‌گیری قابلیت اندازه‌گیری میانگین وزنی زمانی ۶ دقیقه را دارند. در صورتی که وسایل چنین قابلیتی را نداشته باشد می‌توان از روابط زیر میانگین وزنی زمانی را برای شدت میدان الکتریکی، مغناطیسی و چگالی توان تابشی امواج محاسبه نمود.

$$E = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^{n} E_i^{\,2} \cdot \Delta t_i \right]^{1/2}$$

$$H = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^{n} H_i^{\,2} \cdot \Delta t_i \right]^{1/2}$$

$$W = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{n} W_i \cdot \Delta t_i$$

شدت میانگین فضایی: ریشه میانگین مربعات شدت امواج در نواحی معادل سطح مقطع عمودی بدن افراد، بیان‌کننده میانگین فضایی امواج می‌باشد. بدین منظور اندازه‌گیری در خط عمودی بدن تا ارتفاع ۲ متر توصیه شده است. جهت اندازه‌گیری می‌بایست مقادیر به فواصل ۲۰ سانتی‌متری در طول بدن اندازه‌گیری و قرائت گردد. با توجه به اینکه مواجهه با امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی می‌تواند به‌صورت تمام بدن و یا بخشی از بدن باشد، میانگین فضایی دارای اهمیت زیادی است. استاندارد C95.1 اولین نقطه اندازه‌گیری را ۰/۲ متر از سطح زمین توصیه نموده است. روابط محاسبه میانگین فضایی شدت میدان الکتریکی E، مغناطیسی H و چگالی توان تابشی پرتو W به‌صورت زیر است.

$$E = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_i^{\,2} \right]^{1/2}$$

$$H = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} H_i^{\,2} \right]^{1/2}$$

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} W_i$$

n: تعداد نقاط اندازه‌گیری در سطح بدن

E_i: شدت میدان الکتریکی در هر نقطه اندازه‌گیری

H_i: شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه اندازه‌گیری

W_i: چگالی توان تابشی در هر نقطه اندازه‌گیری

مثال: میانگین فضایی مواجهه با میدان الکتریکی بر اساس نتایج اندازه‌گیری فضایی شدت مؤثر میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر در سطح بدن یک کارگر در ایستگاه پست انتقال نیرو به‌صورت زیر است.

نقطه اندازه‌گیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شدت میدان V/m	۲۰	۵	۳	۳۰	۳۵	۳۰	۶۰	۷۰	۶۰

راه حل:

$$E=\left[\frac{1}{9}(20^2+5^2+3^2+30^2+35^2+30^2+60^2+70^2+60^2)\right]^{1/2}=41.6 \quad V/m$$

تعیین کمیات قابل اندازه‌گیری

بر اساس استاندارد توصیه‌شده C95.1 با توجه به فرکانس امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی و مکان اندازه‌گیری (محدوده میدان دور و نزدیک)، کمیت‌های اندازه‌گیری جهت ارزیابی مواجهه با امواج در مقایسه با حدود مجاز مرتبط مطابق با جدول ۱۲ است.

جدول ۱۲-کمیت‌های قابل اندازه‌گیری جهت ارزیابی امواج در فرکانس‌های مختلف

محدوده فرکانسی		میدان الکتریکی	میدان مغناطیسی	چگالی توان
کمتر از ۳۰۰ مگاهرتز		√	√	-
بیش از ۳۰۰ مگاهرتز	میدان دور	√	√	√
	میدان نزدیک	√	√	-

در شرایطی که ارتباط خطی بین شدت‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی مثل محدوده میدان دور برقرار است، چگالی توان تابشی می‌تواند بر اساس داشتن مقادیر میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی محاسبه شود. در مواجهه‌های شغلی در کنار یک دستگاه

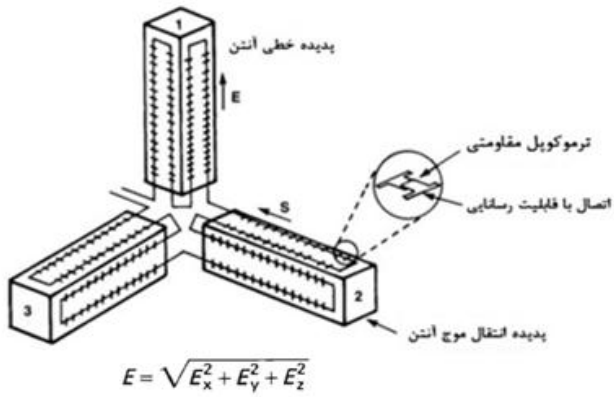
گرم‌کن مایکروویو، کارگر معمولاً در محدوده میدان نزدیک دستگاه در فاصله کمتر از یک طول موج امواج ساطع‌شده قرار می‌گیرد. در این شرایط بهتر است که میدان الکتریکی و مغناطیسی به‌طور مجزا اندازه‌گیری و با حد مجاز مقایسه گردد. از لحاظ علمی صحیح نیست که کمیت چگالی توان تابشی برای توصیف کمی امواج در محدوده میدان نزدیک منابع به کار گرفته شود. جهت اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی یا مغناطیسی پروب‌های متناسب با این میدان‌ها بر روی تجهیزات اندازه‌گیری ارائه‌شده و قابل نصب و جایگزینی است.

وسایل اندازه‌گیری

وسایل اندازه‌گیری میدان الکتریکی معمولاً دارای دو جزء هستند. یک پروب یا آنتن کوچک حساس به میدان الکتریکی و یک آشکارساز که سیگنال را به مقادیر دلخواه تبدیل می‌کند. آنتن معمولاً یک دوقطبی کوچک است که از دو قطعه سیم نازک تشکیل شده است که به شکل‌های مختلف مطابق با شکل ۳۱ ساخته می‌شود.

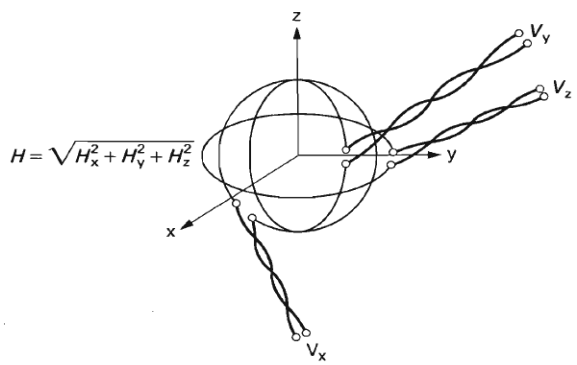
شکل۳۱- آنتن دوقطبی کوچک به‌عنوان پروب میدان الکتریکی

آشکارساز نیز معمولاً یک دیود یا سنسور حرارتی (ترموکوپل) است که سیگنال را به ولتاژ یا جریان مستقیم پایدار تبدیل می‌کند. نکته مهم اینکه خطوط میدان الکتریکی عبوری از پروب دارای اهمیت زیادی است بدین جهت بهتر است که از پروب‌های متعامد استفاده شود. شدت مؤثر میدان الکتریکی معادل برآیند شدت میدان در سه جهت مطابق با شکل۳۲و ۳۳ می‌باشد.



شکل ۳۲- پروب متعامد اندازه‌گیری میدان الکتریکی امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی

پروب میدان مغناطیسی یک حلقه است که می‌بایست خطوط میدان به‌صورت عمود از آن عبور نمایند. میدان مغناطیسی متناوب یک جریان را روی حلقه ایجاد می‌کند که با سطح مقطع حلقه و فرکانس میدان مغناطیسی متناسب است. بنابر این در فرکانس‌های پایین حلقه می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند میدان‌های ضعیف را نیز اندازه‌گیری کند. پروب‌های جدید معمولاً به‌صورت متعامد هستند و در تمام جهت دارای حساسیت یکسان بوده و اندازه‌گیری را با اعتبار بالاتر انجام می‌دهند. شدت مؤثر میدان مغناطیسی برابر برآیند شدت میدان در سه جهت مطابق با اشکال زیر می‌باشد.



شکل ۳۳- پروب متعامد میدان مغناطیسی دارای حساسیت تمام جهت به میدان مغناطیسی

پوشش فرکانسی پروب

پوشش فرکانسی یکی از مهم‌ترین عوامل انتخاب پروب دستگاه اندازه‌گیری است. وسایل تجاری اختصاصی در دسترس، پوشش‌دهنده چگالی توان تابشی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در بخش‌هایی از طیف امواج تا فرکانس ۵۰ گیگاهرتز هستند. به‌کارگیری این نوع تجهیزات شامل هزینه‌های فراوانی است که بستگی به نیازهای کاربر دارد. به‌طور مثال سازنده‌های دستگاه‌های گرم‌کن مایکروویو تنها به تجهیزات اندازه‌گیری نیاز دارند که فرکانس دستگاه‌های گرم‌کن(۲۴۵۰مگاهرتز یا ۹۱۵ مگاهرتز)را پوشش دهد. در ارتباط با بررسی میزان امواج در زمینه ارتباطات و امواج تجهیزات رادار ممکن است به دستگاه‌های پوشش‌دهنده طیف گسترده‌تر به‌طور مثال فرکانس‌های ۳۰ KHz الی فرکانس‌های فوق‌العاده بالا ۵۰ GHz نیاز باشد. برای اندازه‌گیری امواج در فرکانس‌های پایین، استانداردها توصیه کرده‌اند که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری شوند و چگالی توان تابشی در اندازه‌گیری لحاظ نشود. بنا بر این پروب‌های جداگانه معمولاً برای اندازه‌گیری این میدان‌ها در محدوده فرکانسی مذکور نیاز است.

مشخصه‌های اندازه‌گیری پروب

از زمانی که دستگاه‌های دیجیتال امکان ایجاد گزینه‌ها و مقیاس‌های مختلف دستگاه‌های اندازه‌گیری را ایجاد نموده است خیلی از محدودیت‌های دستگاه‌ها در تعیین مقادیر امواج حذف گردیده است. با این وجود برای کاربران دستگاه‌ها ، شناخت میدان‌های اندازه‌گیری و ویژگی‌های آن‌ها دارای اهمیت زیادی است. چگالی توان تابشی در اغلب وسایل برحسب mW/cm^2 یا W/m^2 تعیین مقدار می‌شود. مقیاس چگالی توان تابشی از طریق ارتباطات موج صفحه‌ای کالیبره شده است. در شرایطی که پروب میدان الکتریکی استفاده می‌شود، معادله کالیبراسیون برابر رابطه زیر است.

$S(w/m^2)=E^2(v/m)/377$

$S(mw/cm^2)=E^2(v/m)/3770$

در شرایطی که پروب میدان مغناطیسی استفاده می‌شود، معادله کالیبراسیون برابر رابطه زیر است.

$S(w/m^2)=H^2(A/m)\times377$
$S(mw/cm^2)=H^2(A/m)\times3770$

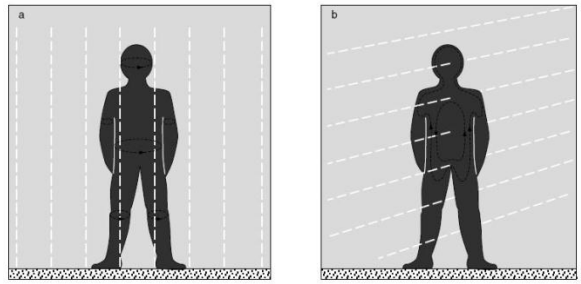
پایشگرهای فردی

پایش گرهای فردی معمولاً انواع بج‌های قابل نصب بر روی لباس افراد در محیط به منظور اعلام هشدار در خصوص سطح تابش امواج می‌باشد. پایشگرهای فردی، تجهیزات پیشرفته‌ای هستند که از سنسورهای پایه یکسانی استفاده می‌کنند و حد مجاز را می‌توان روی این دستگاه‌ها تنظیم نمود تا در صورت ایجاد شرایط مواجهه بالاتر از حد مجاز، هشداردهی لازم صورت گیرد.

شکل۳۴-پایشگرهای فردی امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی

سنجش جریان‌های القایی

جریان‌های داخلی در بدن انسان زمانی که بخشی یا تمام بدن در میدان‌های رادیو فرکانسی قرار می‌گیرد، القاء می‌شود. موضوع جریان‌های القایی روی بدن به‌صورت کلی برای فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز و به ویژه فرکانس‌های کمتر از ۳۰ مگاهرتز مطرح است. اغلب اوقات ارزیابی میزان جریان القایی در میدان نزدیک منبع رادیو فرکانسی صورت می‌گیرد. هدف از ارزیابی و مقایسه با حدود مجاز توصیه‌شده در این خصوص پیشگیری از بروز شوک و سوختگی در افراد مواجهه یافته می‌باشد.



شکل ۳۵- جهت مواجهه با میدان‌های مغناطیسی متناوب برای اندازه‌گیری جریان القایی

وسایل مختلفی برای اندازه‌گیری جریان‌های القایی وجود دارد که شامل مبدل‌های نوع حلقه‌ای برای اندازه‌گیری جریان در قوزک یا ساق پا و مبدل صفحه موازی برای اندازه‌گیری در حالت ایستاده که جریان عبوری از پاها به زمین را تعیین می‌نماید، می‌باشد.

جریان‌های القایی روی پاها در یک فرد بزرگ‌سال در مواجهه با میدان رادیوفرکانسی می‌تواند مقدار جذب ویژه بزرگی را در محل‌هایی که سطح تماس مؤثر کوچک است ایجاد نماید. از این رو چگالی جریان برحسب آمپر بر مترمربع در مقایسه با شرایط طبیعی که با توجه به سطح مقطع واقعی در آن محل مورد انتظار است بیشتر خواهد بود. زانو و قوزک پا مثال‌هایی از نواحی بدن هستند که می‌بایست از لحاظ میزان جذب ویژه مورد توجه بیشتری قرار گیرند. مطالعات نشان داده است که میزان جریان القایی در شرایطی که بدن در حالت راست و پاها برهنه است بزرگ‌تر خواهد بود. جریان‌های القاء شده روی پا با فرکانس و مربعات قد فرد در مواجهه متناسب است.

به منظور اندازه‌گیری جریان القایی روی بدن تجهیزات مختلفی ساخته شده است. اغلب آن‌ها وسایلی با یک سکوی مسطح هستند که با ایستاندن فرد در مواجهه با میدان رادیوفرکانسی بر روی این سکو، جریان عبوری از بدن اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۳۶یک نمونه از دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان القایی(مدلHI-3701) نشان داده شده است. این دستگاه بسیار شبیه ترازوهای وزن سنجی معمولی است. بخش قرائت و نمایشگر دستگاه نیز به‌صورت کنترل از راه دور جهت رعایت اصول اندازه‌گیری جریان‌ها طراحی شده است.

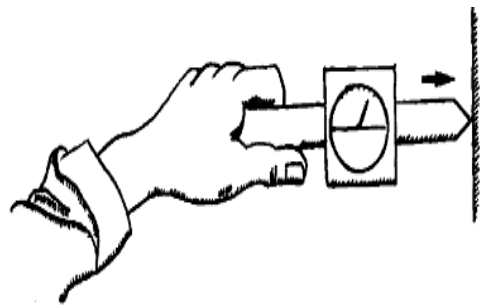
شکل ۳۶- اندازه‌گیری جریان القایی در محل کار کارگر با مبدل صفحه‌ای

شکل ۳۷- دستگاه اندازه‌گیری شدت جریان القایی با مبدل حلقه‌ای

اندازه‌گیری جریان تماسی

در مواجهه با میدان‌های رادیو فرکانسی با فرکانس‌های پایین تا حدود ۱۰۰ مگاهرتز، تماس با اشیاء در میدان‌ها می‌تواند منجر به عبور جریان از بخشی از بدن مثل دست‌ها که در تماس مستقیم قرارگرفته‌اند، شود و ایجاد شوک و سوختگی نماید. این اثرات می‌تواند در اثر تماس با اشیاء رسانا مثل شبکه‌های توری فلزی، نرده‌ها، وسایل نقلیه، سازه‌های فلزی و ماشین‌آلات ایجاد شود. سوختگی زمانی ایجاد می‌شود که به علت سطح مقطع

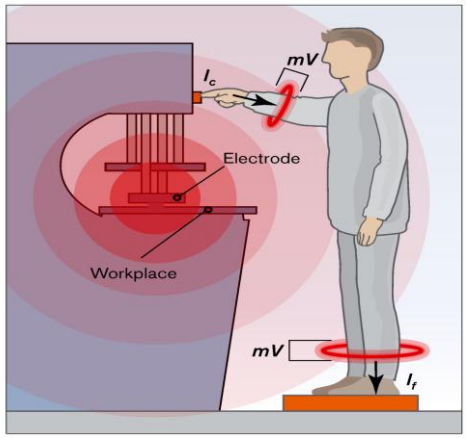
تماس کوچک، چگالی جریان برحسب mA/cm^2 به مقدار زیاد افزایش یابد. روش اندازه‌گیری جریان‌های تماسی در شکل ۳۸ نشان داده شده است. در این روش انتهای دستگاه میلی آمیتر (آمپرمتر) با دست نگاه داشته و انتهای دیگر آن به اشیاء رسانای مورد نظر متصل می‌گردد. البته چون اندازه‌گیری با این روش در نهایت منجر به عبور جریان از بدن فرد از طریق دست در تماس با دسته دستگاه می‌شود، از جنبه ایمنی می‌بایست ملاحظاتی در نظر گرفته شود.



شکل ۳۸- روش اندازه‌گیری شدت جریان تماسی

در این راستا دستگاه اندازه‌گیری جریان تماسی شامل یک بخش الکترونیک همراه با مداری است که با امپدانس معادل بدن انسان به زمین متصل می‌شود. فرد مورد مطالعه از طریق عایق‌کاری دستگاه، تماس مستقیمی با دستگاه ندارد و جریان از مدار دارای امپدانس مشابه انسان عبور می‌کند. شکل ۳۹ دستگاه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد که برای تعیین شدت جریان تماسی به‌کار می‌رود. مدارهای داخلی حالت تماس چنگشی را برای پای برهنه انسان شبیه‌سازی می‌کند. محدوده شدت جریان قابل اندازه‌گیری دستگاه بین ۰ الی ۱۰۰۰ میلی‌آمپر در محدوده فرکانسی بین ۳ کیلوهرتز الی ۳۰ مگاهرتز است.

شکل ۳۹- دستگاه اندازه‌گیری شدت جریان تماسی



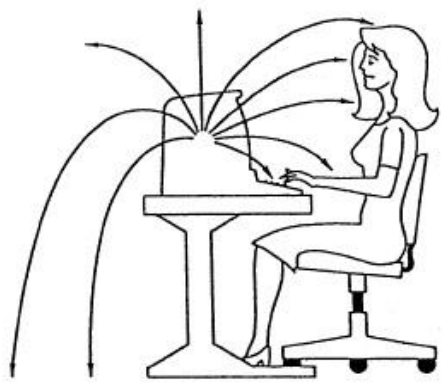
شکل ۴۰ -اندازه‌گیری شدت جریان تماسی و القایی دستگاه جوش پلاستیک

اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیس با فرکانس خیلی پایین[1] VLF

از جمله منابع انتشاردهنده امواج رادیو فرکانسی در محدوده فرکانس خیلی پایین می‌توان به دستگاه‌های گرم‌کن صنعتی و همچنین پایانه‌های نمایشگر تصویری[2] اشاره نمود. برای اندازه‌گیری امواج در این محدوده فرکانسی همان طور که اشاره شد می‌بایست

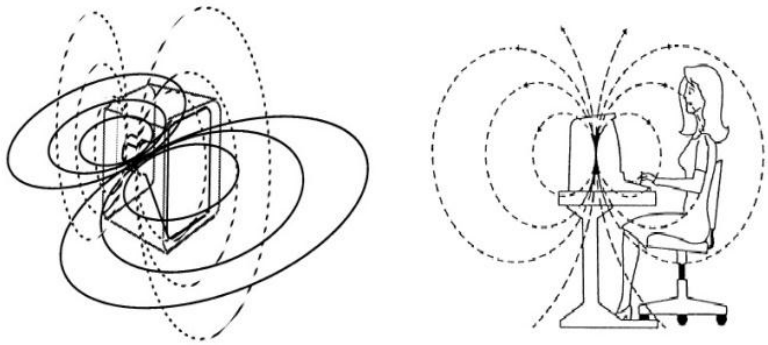
1- Very Low Frequency
2- Visual Display Terminal

میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به‌طور مجزا اندازه‌گیری و با مقادیر حدود مجاز توصیه‌شده مقایسه نمود. به‌طور مثال نمایشگرهای CRT شامل لامپ اشعه کاتدی مشابه با لامپ تصویر تلویزیون می‌باشد. در مواجهه با لامپ‌های اشعه کاتدی دو میدان الکتریکی و مغناطیسی در محدوده VLF و ELF ایجاد می‌گردد. نمایشگرهای CRT معمولاً میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در سه محدوده فرکانسی انتشار می‌دهند. کویل‌های بازتابی افقی میدان‌ها را عمدتاً در محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۳۰ کیلوهرتز منتشر می‌کنند. میدان‌های با فرکانس فوق‌العاده پایین ELF (۵۰ یا ۶۰ هرتز) ناشی منبع الکتریکی نمایشگر و ترانسفورماتور و کویل بازتابی عمودی انتشار می‌یابند و امواج ضعیف رادیوفرکانسی نیز ناشی از مدارهای الکترونیکی داخلی رایانه منتشر می‌گردند.

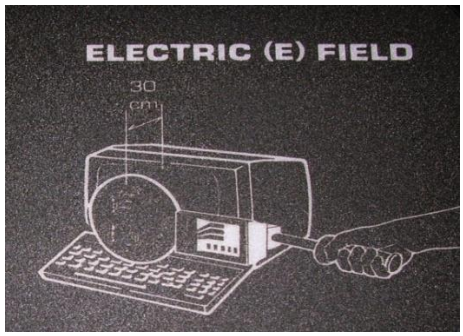


شکل۴۱- خطوط میدان الکتریکی ناشی از نمایشگر عمود بر سطح بدن کاربر

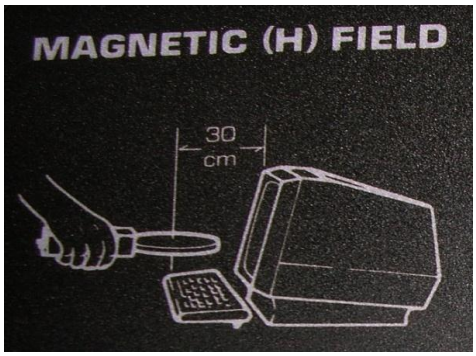
در شکل ۴۲ خطوط عمودی نشان‌دهنده میدان مغناطیسی در محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۳۰ کیلوهرتز است و خطوط افقی نشان‌دهنده میدان مغناطیسی در محدوده ۶۰ هرتز است.



شکل ۴۲ - انتشار میدان مغناطیسی ناشی از نمایشگر در حضور کاربر



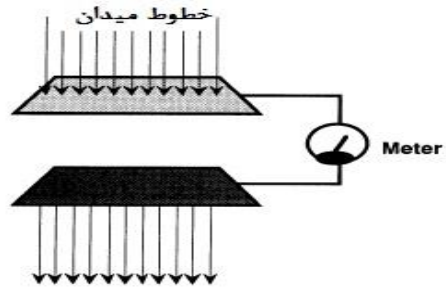
شکل ۴۳- نحوه استقرار دستگاه جهت اندازه‌گیری میدان الکتریکی نمایشگرها



شکل۴۴- نحوه استقرار دستگاه جهت اندازه‌گیری میدان مغناطیسی نمایشگرها

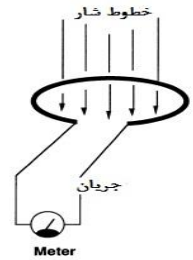
اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیس با فرکانس فوق‌العاده پایین[1] ELF

در خصوص میدان‌های با فرکانس فوق‌العاده پایین نیز می‌بایست میدان الکتریکی و مغناطیسی به‌طور مجزا اندازه‌گیری شود. پروب‌های وسایل اندازه‌گیری میدان الکتریکی در محدوده فرکانس فوق‌العاده پایین معمولاً دارای دو صفحه مجزا است که خطوط میدان می‌بایست از صفحه بالایی به پایین عبور داده شود. مطابق با شکل ۴۵ اختلاف پتانسیل جدید ایجادشده روی صفحات پروب در اثر خطوط میدان با توجه به فاصله بین دو صفحه برحسب ولت بر متر نشان‌دهنده شدت میدان الکتریکی است.



شکل ۴۵- پروب اندازه‌گیری میدان الکتریکی در محدوده ELF

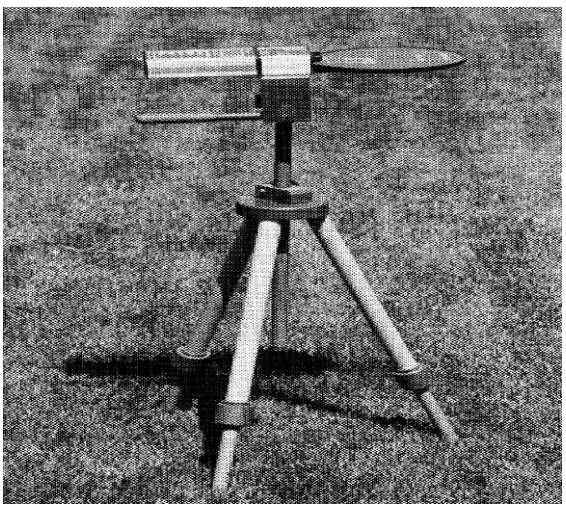
اغلب پروب‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی به‌صورت یک رسانای حلقه‌ای مانند است. تغییر در میدان مغناطیسی عبوری از داخل حلقه جریانی را بر روی حلقه القاء می‌کند که برحسب آمپر بر متر با توجه به قطر حلقه پروب بیان می‌گردد. در خصوص پروب‌های جهت‌دار می‌بایست حلقه پروب عمود بر خطوط میدان باشد تا بیشترین شدت میدان را اندازه‌گیری نماید.



شکل۴۶-پروب اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در محدوده ELF

1- Extreimely Low Frequency

شکل ۴۷- روش اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی اطراف خطوط انتقال نیرو



شکل ۴۸- روش اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی اطراف خطوط انتقال نیرو

معمولاً برای اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از دستگاه مدل HI- 3604 استفاده می‌گردد. دستگاه HI- 3604 دارای دو کلید قابل انتخاب جهت اندازه‌گیری میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی است. این دستگاه شامل صفحه‌کلید، صفحه نمایش

کریستالی و صفحه‌ای برای آشکارسازی میدان و دو فیش خروجی برای مشاهده کردن شکل موج روی نوسان نگار است.

شکل ۴۹- دستگاه مدل HI- 3604 جهت اندازه‌گیری در محدوده ELF

برای اندازه‌گیری محیطی شدت میدان الکتریکی، دستگاه اندازه‌گیری روی سه پایه در ارتفاع ۱/۵متر نصب می‌گردد. سطح صفحه حسگر دستگاه باید طوری جهت‌گیری شود که خطوط میدان عمود بر صفحه باشد. مقداری که قرائت می‌شود، شدت میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر است. در حین اندازه‌گیری مواجهه فردی، حسگر دستگاه در نزدیکی سطح بدن و در مجاورت قفسه سینه قرار می‌گیرد. در خصوص خطوط انتقال نیرو با توجه به اینکه در جهت‌های مختلف قرارگرفته‌اند، برای پیدا کردن جهت پروب دستگاه نسبت به خطوط میدان، آن را در سه جهت مختصات (XYZ) حرکت داده و در هر وضعیتی که بیشترین شدت میدان الکتریکی قابل قرائت باشد، در آن وضعیت، خطوط میدان عمود بر

صفحه حسگر خواهد بود. برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی نیز روش مذکور استفاده می‌شود تا تعداد بیشتری از خطوط شار مغناطیسی از حلقه حسگر دستگاه عبور کند. مقداری که قرائت می‌شود ، شدت میدان مغناطیسی برحسب میکرو تسلا خواهد بود.

اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی پایا

جهت اندازه‌گیری مواجهه فردی یا توزیع محیطی میدان‌های مغناطیسی پایا در مکان‌هایی مثل مراکز تصویربرداری تشدید مغناطیسی و صنایع الکتروشیمیایی نیاز به تجهیزات اختصاصی می‌باشد. پایش گر میدان مغناطیسی پایا مدل HI 3550 یک نمونه پرکاربرد جهت ارزیابی این نوع میدان‌ها است. پایش گر مذکور دارای صحت اندازه‌گیری ۰/۰۵± میلی تسلا در محدوده شدت میدان بین حداقل ۰/۱ میلی تسلا الی حداکثر ۰/۵ تسلا می‌باشد. این دستگاه شدت میدان را به‌صورت تراز معادل تلفیقی یا میانگین وزنی زمانی و همچنین مقدار لحظه‌ای پیک با استفاده از یک جستجوگر(آنتن) تمام جهت اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی مطابق با روش C95.3.1 با دو هدف اندازه‌گیری مواجهه فردی(میانگین وزنی زمانی) و اندازه‌گیری محیطی(میزان لحظه‌ای پیک) شدت میدان مغناطیسی با استفاده از پایش گر مذکور صورت می‌گیرد. برای ثبت لحظه‌ای پیک شدت میدان در محیط، اندازه‌گیری شدت در ارتفاع کمر توصیه شده است. برای اندازه‌گیری میانگین وزنی زمانی شدت مواجهه شغلی کارکنان، پایش گر در داخل جیب کارگر در ارتفاع کمر قرار داده شده تا در طول نوبت کاری ۸ ساعته در محل‌های قرارگیری اپراتور اندازه‌گیری شدت میدان انجام گیرد. دستگاه در این شرایط برحسب میلی تسلا بر ساعت، شدت میدان را برای ۸ ساعت مواجهه در طول نوبت کاری اندازه‌گیری می‌کند.

شکل ۵۰- یک نمونه پایش گر میدان مغناطیسی پایا مدل HI 3550

حدود مجاز مواجهه

میدان‌های مغناطیسی پایا[1]

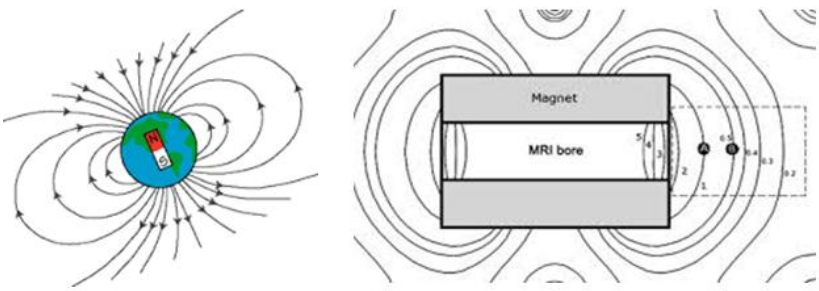
مقادیر حدود مجاز مواجهه شغلی در این بخش مندرج در جدول ۱۳، مربوط به چگالی شار مغناطیسی پایا به مقادیری اشاره دارد که چنانچه شاغلین به‌طور مکرر در روزهای متوالی در مواجهه با آن قرار گیرند اثرات سوء بر سلامت آنان عارض نگردد. مقادیر تعیین‌شده باید به‌عنوان راهنمایی جهت کنترل مواجهه با میدان‌های مغناطیسی پایا استفاده شود ولی نباید به‌عنوان مرز مشخصی بین ایمنی و خطر تلقی گردد. مواجهه‌های شغلی عادی برای تمام بدن نباید از ۶۰ میلی تسلا (mT) معادل ۶۰۰ گوس (G) در روز و همچنین برای دست‌ها و پاها از ۶۰۰ mT (۶۰۰۰ G) در روز تجاوز کند. مقادیر فوق بر اساس میانگین وزنی زمانی (TWA) تعیین شده است.

[۱ تسلا (T) =۱۰^{۴} گوس (G)]

سقف مقادیر توصیه‌شده برای تمام بدن در محیط‌های کاری معمول مساوی ۲T و برای محیط‌های کاری کنترل شده و کارگران آموزش‌دیده ۸T و برای اندام‌های انتهایی دست‌ها و پاها مساوی ۲۰T می‌باشد. احتمال دارد به علت نیروهای مکانیکی وارده از میدان

1 Static Magnetic Field

مغناطیسی در وسایل و ابزاری با خاصیت فرو مغناطیسی و بعضی از وسایل پزشکی کاشته شده در بدن، مخاطرات ایمنی حاصل شود. افرادی که از وسایل ضربان ساز قلبی و وسایل پزشکی الکترونیکی مشابه استفاده می‌کنند نیز نباید در مواجهه با میدان‌های بیش از ۰/۵ میلی تسلا (۵G) قرار گیرند. همچنین در شار با شدت بیشتر ممکن است اثرات سوء ایجاد شود که حاصل نیروهای سایر وسایل کاشته شده در بدن مانند انواع بخیه‌های فلزی، گیره‌های مورد استفاده در درمان بعضی ناراحتی‌های عروقی، همچنین انواع اندام‌های مصنوعی (پروتزهای فلزی) و غیره باشد.



شکل ۵۱- میدان مغناطیسی پایا اطراف دستگاه تصویربرداری تشدید مغناطیسی

جدول ۱۳- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی برای میدان‌های مغناطیسی پایا

اندام در مواجهه	TWA هشت ساعته	مقدار سقف
تمام بدن	۶۰ mT	۲T
دست‌ها و پاها	۶۰۰ mT	۲۰ T
افراد حامل وسایل الکترونیکی	-	۰/۵ mT

میدان‌های مغناطیسی با فرکانس‌های ۳۰ KHz و کمتر از آن (زیر فرکانس رادیویی)

مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی با دامنه چگالی شار مغناطیسی ناشی از میدان‌های مغناطیسی با گستره فرکانسی ۳۰ KHz و کمتر از آن به مقادیری اشاره دارد که چنانچه شاغلین به‌طور مکرر در مواجهه با آن قرار گیرند اثر سوئی بر سلامت آن‌ها عارض نگردد.

برای تعیین مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی شدت‌های میدان مغناطیسی به‌صورت مقادیر مؤثر (rms) داده شده است. این مقادیر به‌عنوان راهنمایی جهت کنترل پرتوگیری از میدان‌های مغناطیسی با زیر فرکانس‌های ۳۰KHz و کمتر از آن تعیین شده است ولی نباید به‌عنوان یک مرز مشخص بین ایمنی و خطر تلقی شود. پرتوگیری‌های شغلی در گستره فرکانس بی‌نهایت کم (ELF)[1] از یک تا ۳۰۰ هرتز، از مقدار سقف ارائه‌شده در رابطه زیر نباید تجاوز کند.

$$B = \frac{۶۰}{f}$$

در رابطه فوق، حد مواجهه شغلی برحسب میلی تسلا (mT) می‌باشد و f فرکانس برحسب هرتز است.

پرتوگیری‌هـــای شغلی در گستره فرکانس ۳۰۰Hz تا ۳۰ KHz (شامل باند فرکانس صوتی [VF] از ۳۰۰ Hz تا ۳ KHz و باند فرکانس خیلی کم [VLF] از ۳ KHz تا ۳۰ KHz است) نباید از مقدار سقف ۰/۲ mT تجاوز کند. مقادیر سقف برای فرکانس‌های ۳۰۰ Hz تا ۳۰KHz شامل پرتوگیری تمام بدن و همچنین قسمتی از بدن می‌باشد. مقدار حد مواجهه شغلی برای فرکانس‌های کمتر از ۳۰۰ Hz در ناحیه دست‌ها و پاها با ضریب ۱۰ و همچنین برای بازو و ساق پا با ضریب ۵ می‌تواند افزایش یابد. چگالی شار مغناطیسی (mT) = ۶۰/f در فرکانس ۶۰Hz مطابق با حداکثر چگالی شار مجاز ۱mT می‌باشد. حد مواجهه شغلی در فرکانس ۳۰ KHz، ۰/۲ mT است که مطابق با شدت میدان مغناطیسی ۱۶۰/ A/m می‌باشد.

شدت جریان تماسی

شدت جریان تماسی ناشی از تماس با اجسام بدون اتصال به زمین که بار الکتریکی القایی را در یک میدان مغناطیسی زیر رادیویی کسب کرده است نمی‌بایست از حدود تماس نقطه‌ای اشاره شده در زیر جهت جلوگیری از شوک‌های الکتریکی تجاوز نماید:

- ۱ میلی‌آمپر در فرکانس ۱ هرتز الی ۲/۵ کیلوهرتز

1 Extremely – Low – Frequency

- ۰/۴ f میلی‌آمپر در فرکانس ۲/۵ الی ۳۰ کیلوهرتز (در رابطه فرکانس برحسب کیلوهرتز)

توجه:

۱- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی تعیین‌شده بر اساس ارزشیابی داده‌های موجود از تحقیقات آزمایشگاهی و مطالعات مربوط به پرتوگیری انسان است. در صورت به دست آمدن اطلاعات جدیدتر، تغییراتی در مقادیر ارائه‌شده حاصل خواهد شد. تاکنون، اطلاعات کافی راجع به جواب‌های انسان و اثرات سوء احتمالی ناشی از میدان‌های مغناطیسی در گستره فرکانسی ۱Hz تا ۳۰KHz وجود ندارد تا بتوان بر اساس آن‌ها حد مواجهه شغلی را برای برآورد میانگین وزنی زمانی پرتوگیری تعیین نمود.

۲- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی تعیین‌شده، شاغلینی را که دارای دستگاه ضربان ساز قلبی هستند در مقابل تداخل امواج الکترومغناطیسی با دستگاه مزبور حفاظت نمی‌کند. بعضی از انواع دستگاه‌های ضربان ساز قلبی به تداخل با امواج الکترومغناطیسی ناشی از خطوط انتقال نیرو (با فرکانس ۵۰ الی ۶۰ هرتز) در چگالی شار مغناطیسی به کوچکیmT ۰/۱ حساسیت نشان داده‌اند. به علت کمی اطلاعات ارائه‌شده از جانب کارخانه سازنده ضربان قلبی درباره تداخل امواج الکترومغناطیسی، توصیه می‌شود، پرتوگیری افراد حامل دستگاه مذکور و یا هر دستگاه مشابه دیگری که در بدنشان وجود دارد در حد mT ۰/۱ و یا کمتر در فرکانس‌های مربوط به خطوط انتقال نیرو نگه داشته شود.

میدان‌های الکتریکی پایا و میدان‌های الکتریکی با فرکانس KHz ۳۰ و کمتر از آن (زیر فرکانس رادیویی)

مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی تعیین‌شده اشاره به شدت‌های میدان با فرکانس رادیویی (۳۰KHz و کمتر از آن) و همچنین میدان‌های الکتریکی پایا در محیط‌های کار بدون حفاظ دارد و نشان‌دهنده شرایطی است که تحت آن شرایط اگر کارکنان به‌طور مکرر

در مواجهه با آن قرار گیرند، اثرات زیان‌آوری بر سلامت آنان عارض نشود. برای تعیین مقادیر حد مواجهه شغلی شدت‌های میدان الکتریکی به‌صورت مقادیر مؤثر (rms) داده شده است. این مقادیر به‌عنوان راهنما جهت کنترل پرتوگیری تعیین شده است و به علت حساسیت‌های فردی نباید به‌عنوان مرز مشخصی بین ایمنی و خطر تلقی شود. شدت‌های میدان الکتریکی تعیین‌شده برای مقدار حد مواجهه شغلی به میدان‌هایی اشاره دارد که در هوا موجودند و به دور از سطوح هادی‌ها قرار دارند (جایی که تخلیه‌های جرقه‌ای و جریان-های تماس ممکن است مخاطرات جدی به بار آورد). پرتوگیری شغلی در فرکانس صفر هرتز (DC) تا ۲۲۰ هرتز نباید از شدت میدان ۲۵ KV/m بیشتر باشد. در فرکانس‌های ۲۲۰Hz تا ۳ KHz مقدار سقف شدت میدان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$E = ۵/۵۲۵ \times ۱۰^{۶} / f$ حد مواجهه شغلی برحسب V/m

f: فرکانس برحسب هرتز است.

در حد مجاز مواجهه شغلی برای فرکانس‌های ۳ KHz تا ۳۰KHz مقدار سقف V/m ۱۸۴۲ می‌باشد. این مقادیر سقف برای فرکانس‌های ۳ تا ۳۰ کیلوهرتز برای بخشی از بدن و نیز تمام بدن در نظر گرفته می‌شود.

توجه:

۱- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی بر اساس جریان‌های محدود در سطح بدن و جریان-های داخلی القایی به مقادیری کمتر از آنچه که تصور می‌رود ایجاد اثرات زیان‌آوری بنماید، تعیین شده است. هرچند تاکنون دلایل و شواهد کافی مبنی بر زیان‌آور بودن پرتوگیری شغلی از این میدان‌ها برای سلامت کارکنان به دست نیامده است، اما نتایج برخی مطالعات آزمایشگاهی در شدت‌های میدان الکتریکی کمتر از مقادیر مجاز، برخی اثرات بیولوژیکی را نشان داده‌اند. در صورت به دست آمدن اطلاعات جدیدتر، تغییراتی در مقادیر ارائه‌شده داده خواهد شد. در حال حاضر اطلاعات کافی راجع به پاسخ‌های انسان و اثرات سوء احتمالی ناشی از میدان‌های الکتریکی در گستره

فرکانسی صفر تا KHz ۳۰ وجود ندارد تا بتوان بر اساس آن‌ها حد مواجهه شغلی را برای میانگین وزنی زمانی پرتوگیری تعیین نمود.

۲- قرار گرفتن در میدان‌هایی با شدتی بیش از KV/m ۷-۵ بدون اتصال به زمین می‌تواند مخاطرات ایمنی وسیعی به دنبال داشته باشد. از جمله با وجود میدان الکتریکی با شدت زیاد ممکن است تخلیه الکتریکی و جریان‌های تماسی ناشی از هادی‌های زیرزمینی واقع در میدان، همراه با از جا پریدن بعلاوه سایر مخاطرات ایمنی مانند احتراق مواد قابل اشتعال و وسایل الکتریکی قابل انفجار، به وجود آید. لازم است ضمن دقت زیاد اشیاء بدون اتصال به زمین حذف شوند، یا مجهز به سیم اتصال به زمین گردند (Earth)، و یا هنگام جابجایی آن‌ها از دستکش‌های عایق استفاده شود. در میدان‌های با شدت بیش از KV/m ۱۵ لازم است از وسایل حفاظتی (مثل لباس، دستکش و انواع عایق‌های الکتریکی) استفاده شود.

۳- برای شاغلینی که دارای ضربان ساز قلبی هستند، مقادیر حد مجاز تعیین شده، آن‌ها را در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی با دستگاه مذکور حفاظت نمی‌کند. بعضی از انواع ضربان سازهای قلبی در مقابل تداخل با میدان‌های الکتریکی با فرکانس مربوط به خطوط انتقال نیرو (۵۰ الی ۶۰ هرتز) حتی به شدتی به اندازه KV/m ۲ حساسیت نشان می‌دهند. به علت کمی اطلاعات ارائه شده از طرف کارخانه سازنده درباره تداخل امواج الکترومغناطیسی با دستگاه ضربان ساز قلبی، تماس افراد حامل دستگاه ضربان ساز و سایر وسایل مشابه پزشکی باید در حد KV/m ۱ نگه داشته شود.

پرتوهای رادیوفرکانسی و مایکروویو

حد مجاز مواجهه شغلی پرتوهای رادیوفرکانسی(RF) و مایکروویو در فرکانس‌های بین ۳۰KHz تا ۳۰۰GHz به مقادیری اشاره دارد که چنانچه شاغلین به‌طور مکرر در مواجهه با آن قرار گیرند، آثار نامطلوبی بر سلامت آنان ظاهر نگردد. مقادیر حد مواجهه شغلی پرتوهای مذکور برحسب مقدار مؤثر (rms) ، شدت میدان الکتریکی(E) ، شدت میدان مغناطیسی(H) و چگالی توان معادل برای موج تخت در فضای آزاد(S) و جریان‌های

القایی(I) به بدن که در اثر پرتوگیری در چنین محیطی و یا در اثر مواجهه مستقیم با ماده‌ای که در معرض محیط‌های مزبور بوده اتفاق می‌افتد، بیان می‌گردد. جدول ۱۴ و شکل ۴۲ حد مجاز مواجهه شغلی را برحسب فرکانس‌های مختلف برحسب مگاهرتز (MHz) نشان می‌دهد.

ملاحظات:

الف- حد مجاز مواجهه شغلی در جدول ۱۵ ، به مقدار پرتوگیری که باید بر اساس حد مجاز مقدار مؤثر(rms) جریان RF وارد بر بدن و احتمال بروز شوک یا سوختگی حاصل از RF اشاره دارد و به‌صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- برای افرادی که تکیه‌گاه فلزی ندارند یا به عبارتی با اجسام فلزی در تماس نیستند[1]، جریانRF وارده بر بدنشان از طریق هر پا که در هر فوت (تقریباً ۳۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود نباید از مقادیر سقف به شرح زیر تجاوز نماید:

(به ازای ۰/۱ MHz > f > ۰/۰۳)	I = ۱۰۰۰ f (برحسب میلی‌آمپر)
(به ازایMHz ۱۰۰ > f > ۰/۱)	I = ۱۰۰ (برحسب آمپر)

۲- در شرایطی که احتمال تماس با اجسام فلزی وجود دارد، حداکثر جریان RF در مقاومت ظاهری بدن انسان که با استفاده از یک جریان سنج تماسی برای تعیین میزان مواجهه انسان به هنگام گرفتن جسم فلزی در دست به دست می‌آید، نباید از مقادیر زیر تجاوز نماید.

(به ازاء ۰/۱ MHz > f > ۰/۰۳)	I = ۱۰۰۰ f (برحسب میلی‌آمپر)
(به ازاء ۱۰۰ MHz > f > ۰/۱)	I = ۱۰۰ (برحسب آمپر)

۳- وسیله مورد استفاده جهت رعایت مقادیر حد مجاز شغلی مذکور بستگی به استفاده‌کننده دارد. استفاده از دستکش محافظ، عدم استفاده از وسایل فلزی با آموزش افراد از جمله مواردی هستند که با کمک آن‌ها می‌توان مواجهه شغلی را به

1- Free Standing Individuals

حد مجاز رساند. ارزیابی مقدار جریان‌های القایی معمولاً با وسایل قرائت مستقیم انجام می‌گیرد.

ب- حد مجاز مواجهه شغلی در جدول ۱۴ به مقدار پرتوگیری که از طریق محاسبه میانگین در سطحی معادل سطح مقطع عمومی بدن انسان به دست می‌آید اشاره دارد (سطح تصویر شده). در مواردی که قسمتی از بدن در معرض پرتوگیری است، حد مجاز مواجهه شغلی را می‌توان افزایش داد. در میدان‌های متغیر و غیریکنواخت، مقادیر حداکثر شدت میدان ممکن است از میزان حد مجاز مواجهه شغلی تجاوز نماید مشروط بر آنکه متوسط مقادیر در حدود مجاز تعیین شده باشد. حد مجاز مواجهه شغلی را می‌توان با محاسبات اندازه‌گیری میزان جذب ویژه SAR[1] مرجع نیز افزایش داد.

جدول ۱۴- حد مجاز مواجهه شغلی با امواج رادیو فرکانس و مایکروویو*(f فرکانس برحسب MHz)

فرکانس	چگالی توان، S (W/m^2)	شدت میدان الکتریکی، E (V/m)	شدت میدان مغناطیسی، H (A/m)	متوسط زمانی E^2 یا H^2 یا S (دقیقه)
۳۰ KHz —۱۰۰KHz	–	۱۸۴۲	۱۶۳	۶
۱۰۰ KHz —۱ MHz	–	۱۸۴۲	۱۶/۳ /f	۶
۱ MHz —۳۰ MHz	–	۱۸۴۲/f	۱۶/۳ /f	۶
۳۰ MHz —۱۰۰ MHz	–	۶۱/۴	۱۶/۳ /f	۶
۱۰۰ MHz —۳۰۰ MHz	۱۰	۶۱/۴	۰/۱۶۳	۶
۳۰۰ MHz —۳ GHz	f /۳۰	–	–	۶
۳ GHz —۳۰ GHz	۱۰۰	–	–	۳۳۸۷۸/۲ / $f^{۱/۰۷۹}$
۳۰ GHz —۳۰۰ GHz	۱۰۰	–	–	۶۷/۶۲ / $f^{۰/۴۷۶}$

1- Specific Absorption Rate

جدول ۱۵- حد مجاز مواجهه شغلی با جریان‌های القایی و تماسی رادیو فرکانس*جریان حداکثر (mA)

فرکانس	در فاصله بین دو پا	از طریق هر پا	تماس	متوسط دوره زمانی
۳۰ KHz –۱۰۰KHz	۲۰۰۰ f	۱۰۰۰ f	۱۰۰۰ f	۰/۲ S
۱۰۰ KHz -۱۰۰ MHz	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶ min

** باید توجه داشت که محدوده جریان‌های فوق حفاظت فرد را در برابر واکنش از جا پریدن و سوختگی که در اثر تخلیه آنی در هنگام تماس با منبع حاصل می‌شود، به‌طور کامل تأمین نمی‌نماید. برای کسب اطلاعات بیشتر به متن مراجعه شود.*

ج- برای پرتوگیری میدان‌های نزدیک[1] در فرکانس‌های پایین‌تر از ۳۰۰ MHz، حد مجاز مواجهه شغلی برحسب مقدار مؤثر (rms) شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی در جدول ۱۴ نشان داده شده است. چگالی توان (S) موج تخت معادل برحسب (W/m^2) از طریق اطلاعات به دست آمده از سنجش شدت میدان از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$S = E^2 / ۳۷۷$

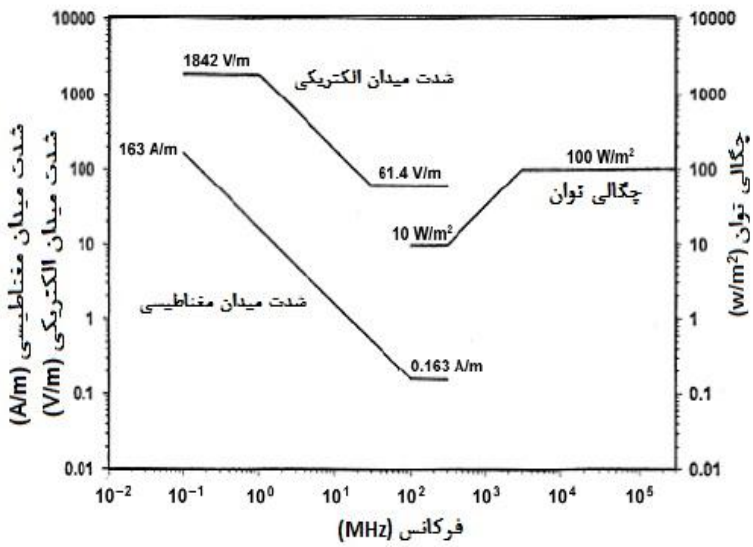
در رابطه فوق E^2 برحسب مجذور ولت (V^2) بر مترمربع (m^2) می‌باشد و

$S=۳۷۷H^2$

که در رابطه فوق H^2 برحسب مجذور آمپر (A^2) بر مترمربع (m^2) می‌باشد.

د- در مواردی که پرتوگیری از نوع پرتوهای RF پالسی در مدت کمتر از ۱۰۰ msec در گستره فرکانس‌های ۰/۱ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز باشد، حداکثر مواجهه شغلی مجاز با میدان الکتریکی لحظه‌ای ۱۰۰ کیلوولت بر متر است. برای پالس‌هایی که بیش از ۱۰۰ msec تداوم دارند، محاسبه متوسط زمانی معمول به‌کار می‌رود. مقادیر مزبور به‌عنوان راهنما جهت ارزیابی و کنترل پرتوگیری امواج رادیوفرکانسی و مایکروویو بکار می‌رود و نباید به‌عنوان مرز قطعی بین حد ایمنی و خطر تلقی گردند.

1- Near – Field Exposure



شکل ۵۲ - نمودار حد مجاز مواجهه شغلی امواج مایکروویو و رادیو فرکانسی
(برای جذب ویژه تمام بدن کمتر از W/kg ۰/۴)

توجه:

۱- چنانچه شاغلین به‌طور مستمر در مواجهه با مقادیری تا حد مجاز شغلی عنوان شده قرار گیرند، آثار نامطلوب بر سلامت آنان ظاهر نگردد. معهذا هنگامی که می‌توان با روش‌های ساده مانع پرتوگیری گردید، باید از مواجهه‌های غیرضروری افراد با پرتوهای رادیوفرکانسی در مقادیری بیش از حد مجاز شغلی تدوین شده، اجتناب گردد.

۲- برای میدان‌های مختلط یا با باند پهن که از فرکانس‌های مختلف تشکیل‌شده‌اند و در هر فرکانس مقدار مشخصی از حد مجاز شغلی عنوان گردیده، باید مواجهه شغلی به‌طور جداگانه (برحسب H^2،E^2 یا چگالی توان) در دامنه فرکانس معین در نظر گرفته شود و حاصل جمع کلیه حدود مجاز مذکور نباید از واحد تجاوز نماید.

به همین روش برای شدت جریان‌هایی که به‌صورت مختلط یا با باند پهن در فرکانس‌های مختلف ایجادشده‌اند، مقادیر حد مجاز شغلی در محدوده جداگانه شدت جریان‌های ایجادشده (برحسب I^2) در هر دامنه فرکانس معین در نظر گرفته می‌شوند و نباید حاصل جمع آن‌ها از واحد تجاوز نماید.

۳- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی جدول ۱۴به مقادیری اشاره دارد که در فرکانس‌های کمتر از GHz ۳ در طی هر ۶ دقیقه (۰/۱ ساعت) و برای فرکانس‌های بالاتر یعنی در GHz ۳۰۰ در مدت زمانی کمتر یعنی تا ۱۰ ثانیه تعیین شده‌اند.

۴- در فرکانس‌های بین GHz ۰/۱ تا ۳GHz، مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی برای شدت میدان‌های الکترومغناطیسی با رعایت شرایط زیر قابل‌افزایش است:

الف- شرایط پرتوگیری با استفاده از روش‌های مناسب قابل‌کنترل باشد به‌طوری که متوسط پرتوگیری کل بدن یعنی SAR_s کمتر از W/kg ۰/۴ بوده و به‌طور متوسط مقادیر قله SAR از W/kg ۱۰ به ازاء هر یک گرم بافت (به‌صورت حجم بافت در شکل مکعب تعریف شده است) تجاوز ننماید. به غیر از دست، مچ دست، پا و مچ پا مقادیر قله SAR از W/kg ۲۰ به ازاء هر ۱۰ گرم بافت (که به‌صورت حجم بافت در شکل مکعب تعریف شده است) می‌تواند تجاوز نماید. میانگین SAR_s در طی هر ۶ دقیقه محاسبه گردیده است.

ب- جریان‌های القایی به بدن را باید با مقادیر جدول ۱۴مطابقت داد.

۵- در فرکانس‌های بیش از GHz ۳ تحت شرایطی که قسمتی از بدن پرتوگیری می‌نماید، افزایش مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی مجاز می‌باشد.

۶- اندازه‌گیری شدت میدانRF به عوامل متعددی بستگی دارد که شامل ابعاد Prob و فاصله منبع از Prob می‌باشد و روش‌های اندازه‌گیری باید از توصیه‌های اعلام‌شده در IEEE C95.3 سال ۲۰۰۲ تبعیت نماید.

۷- در مواردی که قله چگالی میدان الکتریکی KV/m ۱۰۰ می‌باشد از هرگونه مواجهه باید اجتناب نمود.

۸- امواج با پهنای باند بسامد زیاد UVB کاربردهای جدیدی برای تصویربرداری، ارتباطات بدون سیم (صوت، داده و تصویر)، برچسب‌های شناسایی و سیستم های امنیتی پیدا نموده است. سیگنال‌های این امواج شامل پالس‌های کوتاه (معمولاً کمتر از ۱۰ نانوثانیه) و افزایش سریع زمانی(کمتر از ۲۰۰ پیکو ثانیه)هستند که منجر به ایجاد باند

خیلی پهن می‌گردد. برای پالس‌های UWB، میزان جذب ویژه برحسب وات بر کیلوگرم بافت به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$SAR=S\times PW\times PRF\times 0.025$

S: چگالی توان معادل موج تخت W/m^2

PW: پهنای مؤثر باند S

PRF: فرکانس تکرار پالس s^{-1}

0.025: حداکثر جذب ویژه تصحیح شده W/kg بر W/m^2 سطح بدن در مواجهه با موج رادیو فرکانسی ۷۰ مگاهرتز می‌باشد.

محدودیت‌های مواجهه

۱- مواجهه با موج UWB بیشتر از ۶ دقیقه:

میزان جذب ویژه محدود به ۰/۴ وات بر کیلوگرم برای میانگین زمانی ۶ دقیقه‌ای متناسب با سطح جذب ویژه J/Kg ۱۴۴ برای ۶ دقیقه می‌گردد. فرکانس تکرار پالس مجاز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PRF\,(s^{-1}) = \frac{144\,J/Kg}{(SA\ \ in\ \ J/Kg\ \ \ per\ \ \ pulse)(360s)}$$

۲- در مواجهه با موج UWB کمتر از ۶ دقیقه:

این فرضیه حفاظتی ارائه شده است که مدت زمان مجاز مواجهه ET با عکس مربعات جذب ویژه متناسب است. مدت زمان مجاز مواجهه ممکن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ET = \frac{0.4W/Kg\times 144\,J/Kg}{(SAR)^2} = \frac{57.6}{(SAR)^2}$$

حفاظ گذاری پرتوهای مایکروویو و رادیوفرکانسی

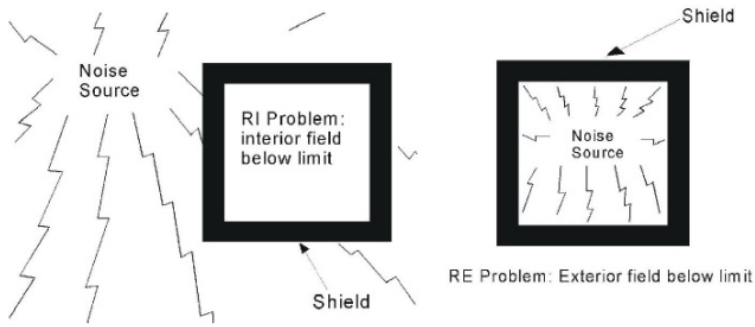
حفاظ گذاری در مقابل امواج الکترومغناطیس معمولاً پیچیده و اغلب اوقات دشوار است. میزان اثربخشی حفاظ به‌طور اساسی بستگی به ویژگی‌های منبع امواج ، شکل و ساختار حفاظ و مواد حفاظتی دارد. شاخص اثربخشی حفاظ[1] به‌عنوان معیار دقیقی برای

1- Shielding Effectiveness

ارزیابی کمی عملکرد حفاظ‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه توضیح داده خواهد شد. مواد مختلفی به‌عنوان حفاظ امواج مورد استفاده قرار می‌گیرند. اغلب نوع ساختار حفاظ‌ها از مواد رسانا گرفته تا مواد فرو مغناطیس بستگی به ماهیت موج و هدف از حفاظ گذاری به‌عنوان جاذب یا عایق بستگی دارد. حفاظ‌ها می‌توانند به‌صورت صفحات جامد یا مش‌های فلزی(توری) باشند. مواد مورد استفاده برای حفاظ گذاری به‌عنوان عایق میدان الکتریکی اغلب شامل قلع، مس، آلومینیوم، نقره و طلا که دارای رسانش الکتریکی بالا می‌باشند. این مواد دارای کاهندگی بالایی از طریق بازتاب میدان‌های الکتریکی هستند. بازتاب زمانی است که اختلاف ضریب رسانش بین دو محیط عبور موج زیاد باشد. مواد مورد استفاده برای حفاظ گذاری میدان مغناطیسی به‌عنوان مواد جاذب اغلب شامل مواد فرو مغناطیس با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا شبیه آهن، فولاد و آلیاژهای خاص هستند.

الف- عایق‌های پرتوهای مایکروویو و رادیو فرکانسی

مواد محافظ به‌عنوان عایق جهت پیشگیری از انتقال میدان الکتریکی شامل نقره، مس، طلا، آلومینیوم، برنز، قلع، سرب و پلیمرهای رسانا است. می‌توان این مواد را ترکیب یا پردازش نمود و به‌صورت صفحات پلاستیکی ترکیبی، روکش‌های فیلمی تک و چندلایه، فلزات روکش‌دار، رنگ‌های رسانا، اسپری‌های فلزی، شبکه یا مش‌های فلزی و سایر منسوجات بافته‌شده استفاده نمود. جهت پیشگیری از انتقال امواج الکترومغناطیس در محدوده مایکروویو و رادیو فرکانسی(میدان الکتریکی) از مواد با ضریب رسانش الکتریکی یا ضریب نفوذپذیری الکتریکی بالا استفاده می‌گردد.



شکل ۵۳ - حفاظت تجهیزات از میدان‌های الکتریکی امواج به‌صورت داخلی یا خارجی

شکل ۵۴- یک نمونه مش فلزی جهت حفاظ گذاری پرتو مایکروویو و رادیو فرکانسی

شکل ۵۵-کاربرد رنگ‌های فلزی رسانا به‌عنوان عایق امواج در داخل ساختمان

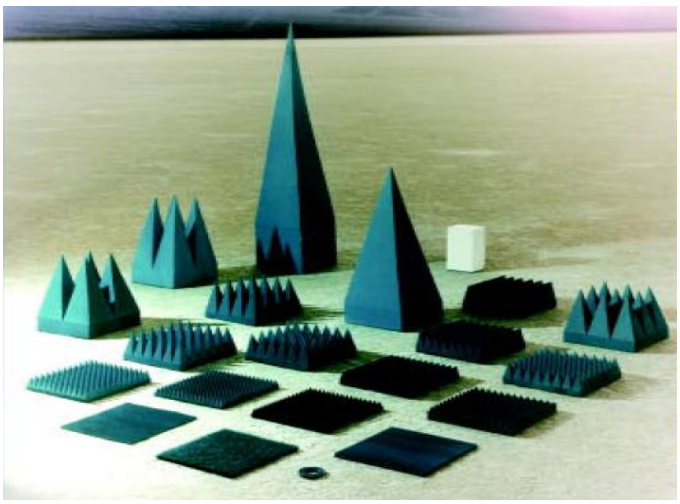
ب- جاذب‌های امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی

جاذب‌های مقاومتی

این نوع جاذب‌ها با استفاده از مواد مقاومتی مانند کربن سیاه، گرافیت‌های نیکل-کرومی، و پایه کرومی ساخته می‌شوند. از این مواد به‌عنوان جاذب‌های معمول صفحه‌ای و یا جاذب‌های نوع نواری استفاده می‌شود. امواج مایکروویو و رادیوفرکانسی با فرکانس بالا که بر سطح جاذب‌های مقاومتی تابش می‌کنند به گرما تبدیل می‌شود.

جاذب‌های دی‌الکتریک

این نوع از جاذب‌ها عمدتاً از مواد کربنی که با پلی یورتان، پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن، پلی‌کربنات، پلی‌پروپیلن و مواد لاستیکی مخلوط شده‌اند تشکیل شده است. جاذب‌های فومی دارای ضریب دی‌الکتریک بالا هستند و در واقع ضریب رسانش الکتریکی پایین دارند و می‌توانند امواج را به‌طور مؤثری جذب کنند.



شکل ۵۶- جاذب‌های دی‌الکتریک امواج با شکل ظاهری هرمی

شکل ۵۷- نصب علائم هشداردهنده در محل‌های مورد نیاز به‌عنوان اقدام مدیریتی

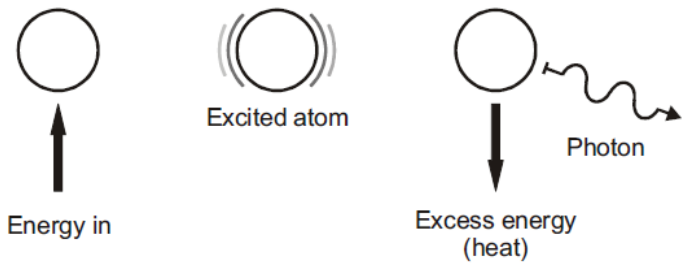
پرتو لیزر[1]

لیزر تقویت نور ناشی از تابش گسیل القایی تابش "تقویت نور نشر برانگیخته" می‌باشد و هر نوع لیزر در محدوده طیفی خاصی انتشار می‌یابد. لیزر وسیله‌ای برای تولید پرتوی تک‌فام و همدوس در نواحی نور فرابنفش، مرئی و مادون قرمز از طیف امواج الکترومغناطیسی است. مشخصات اختصاصی نور لیزر شامل موارد زیر است:

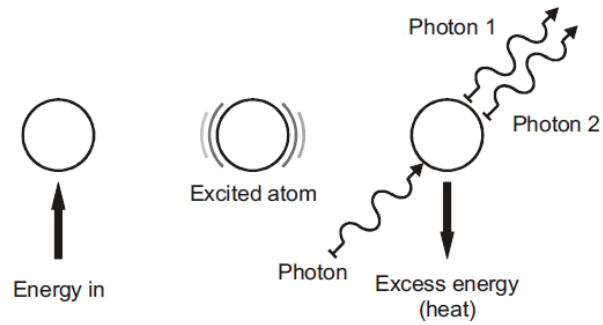
- تک‌رنگ بودن[2]: تمامی فوتون‌های نور لیزر دارای یک طول موج مشخص و یکسان و تک‌رنگ می‌باشد.
- هم‌راستایی[3]: نور لیزر در مسیر معین منتشر و دارای واگرایی کم بوده و پراکنده نمی‌شود.
- همدوسی[4]: هم‌فاز بودن فوتون‌های نور لیزر ناشی از پدیده نشر برانگیخته سبب همدوسی پرتو لیزر می‌شود. اختلاف زمان وجود ندارد.

1- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
2- Monochromatic
3- Directiveity
4- Coherency

- در نور لیزر، اتم‌ها با جذب انرژی برانگیخته می‌شوند و قادر به انتشار انرژی به‌صورت خودبه‌خود هستند. با این حال در اثر برخورد فوتون با انرژی ساطع شده از اتم مجاور به این اتم تحریک شده ، گسیل فوتون دیگری از اتم مطابق با شکل زیر القاء می‌گردد. بنا بر این در نتیجه گسیل القایی دو فوتون ایجاد می‌شود که این فوتون هم جهت و هم‌فاز هستند و باعث گسیل القایی سایر اتم‌ها نیز می‌گردند. این فرآیند در شکل ۵۹ نشان داده شده است.



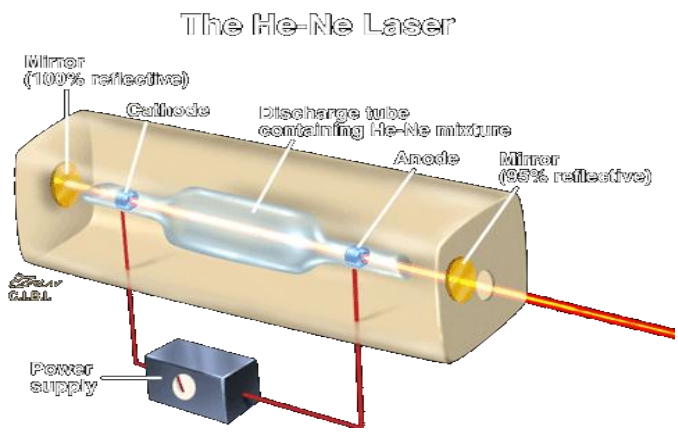
شکل۵۸- برانگیختگی معمولی اتم‌ها و انتشار خودبه‌خودی فوتون



شکل ۵۹- تولید فوتون‌های لیزر از طریق گسیل القایی تابش

شکل۶۰- کاربرد لیزر در حوزه‌های صنعتی، پزشکی ، تحقیقاتی

اجزاء منبع تولید لیزر شامل یک محفظه یا لوله حاوی ماده تشکیل‌دهنده محیط لیزر، دو آینه یا بازتاب‌کننده در دو انتهای محفظه لیزر، منبع تولید انرژی اولیه است. منبع تولید انرژی که می‌تواند جریان الکتریسیته یا امواج مایکروویو و.. باشد باعث تحریک اولیه اتم‌های محیط لیزر می‌شوند. سپس انتشار فوتون‌های هم‌جهت توسط سایر اتم‌ها به اتم‌های تحریک‌شده القاء می‌گردد. فوتون‌ها در اثر بازتاب آینه‌های انتهایی تغییر مسیر می‌دهند و در مسیر رفت و برگشت گسیل فوتون را به اتم‌های تحریک‌شده در مسیر القاء می‌کنند. افزایش تعداد فوتون‌های در محیط لیزری معادل با شدت بالاتر لیزر تولیدی می‌باشد. در اثر کارکرد پیوسته منبع انرژی مکانیسم گسیل القایی به‌صورت پیوسته در محیط لیزر انجام‌شده و لیزر تولیدشده از یک انتهای محیط لیزر خارج می‌گردد.



شکل ۶۱- اجزاء تشکیل‌دهنده یک نوع منبع تولید لیزر

انواع لیزر بر مبنای نحوه انتشار

۱- لیزر پیوسته[1] (CW)

لیزرهایی که انرژی به‌صورت پیوسته در محیط لیزر تولید و خارج می‌گردد. اغلب لیزرهای پیوسته دارای محیط گازی هستند. این نوع لیزرها دارای توان از چند میلی وات

1- Continuous wave

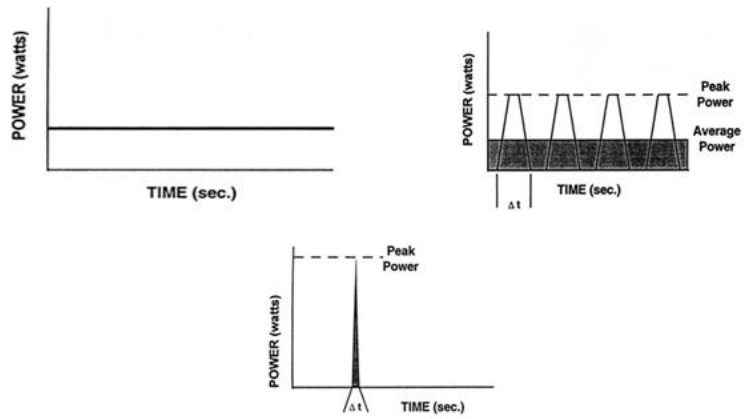
تا چند کیلووات هستند. از جمله این لیزرها می‌توان به لیزر هلیوم نئون با توان تا ۱۰۰ میلی وات و لیزر co_2 با توان تا چند کیلووات اشاره کرد.

۲- لیزر پالسی[1]

لیزرهای پالسی انرژی را به‌صورت انفجاری از نور و یک‌باره به‌صورت جرقه در کسری از ثانیه از 10^{-15} ثانیه تا ۰/۲۵ ثانیه خارج می‌کنند. لیزر یاقوت نمونه‌ای از لیزر پالسی است که فرکانس تکرار پالس[2] PRF از ۰/۰۳ تا ۱۰ پالس در ثانیه متغیر است

۳-لیزر پالسی Q-switch

لیزر پالسی می‌تواند به‌صورت Q-switch نیز عمل نماید. Q-switch یک وسیله نوری الکتریکی است در محیط لیزر است که به‌عنوان دیافراگم اجازه خروج لیزر را از محیط لیزری تا هنگام بسته بودن نمی‌دهد. این مکانیسم باعث ایجاد لیزرهای پالسی با انرژی و توان بالای تا چند مگاوات می‌گردد.



شکل ۶۲ - انواع لیزر بر مبنای نحوه انتشار

1- Pulsed lasers
2- Pulse Repetition Frequency

طبقه‌بندی لیزرها بر اساس محیط لیزری

مرسوم‌ترین طبقه‌بندی لیزرها بر مبنای ماده فعال آن‌ها است. انواع لیزرها بر اساس نوع محیط لیزر به شرح ذیل است.

الف-لیزر گازی

محیط فعال آن گاز است. این لیزر هم به‌صورت پالسی و هم موج پیوسته وجود دارد. مهم‌ترین مواد گازی مورد استفاده هلیوم، آرگون و CO_2 است. عمل تحریکی و برانگیختگی در این نوع لیزرها توسط تخلیه الکتریکی یا روش پمپاژ نوری انجام می‌پذیرد. لیزرهای گازی بر اساس نوع محیط فعال در محدوده ماوراءبنفش، مادون‌قرمز و مریی لیزر تولید می‌کنند. این لیزرها برای جوشکاری و برش‌کاری، جراحی چشم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ب-لیزر جامد

محیط فعال این نوع لیزرها شامل بلورهای عایق یا شیشه حاوی مقداری ناخالصی یونی است. از پمپاژ نوری جهت تحریک ماده فعال استفاده می‌شود. یاقوت و نئودیم مثالی از این لیزرها هستند.

ج-لیزرهای رنگینه

لیزرهای مایع که به آن‌ها لیزرهای رزینه‌ای نیز اطلاق می‌گردد از مواد مایع به‌عنوان محیط فعال استفاده می‌کنند. در این محیط فعال مواد آلی رنگی در یک حلال مایع نظیر آب، الکل مخلوط آب و الکل حل می‌شوند که ترکیبات پیچیده آلی با طیف جذبی گسترده‌ای هستند. تحریک این نوع لیزرها با لامپ گزنون و یا با لیزرهای گازی صورت می‌پذیرد. به‌صورت پالسی و پیوسته تولید می‌شوند. مشخصه مهم این لیزرها این است که با تغییر غلظت حلال طول موج خاصی ایجاد می‌شود. بنابراین با این روش طول موج‌های مختلفی تولید می‌گردد. بیشتر طول موج‌ها در ناحیه مرئی هستند. چون مواد رنگی آلی در تولید این لیزرها استفاده می‌شود، برای جلوگیری از اثرات مضر بر سلامتی بایستی کار با آن‌ها را در شرایط ویژه‌ای انجام داد.

د- لیزرهای نیمه هادی

در این نوع لیزرهای از کریستال مواد نیمه‌هادی با ابعاد بسیار کوچک به‌عنوان ماده فعال استفاده می‌گردد. برای تحریک الکتریکی از پمپاژ نوری- اشعه الکترونی و یا اعمال جریان الکتریکی مستقیم برای تزریق الکترون استفاده می‌شود. GaAs (آرسنیدگالیم) مثالی از این نوع لیزر است. مشخصه بارز آن‌ها اندازه و حجم بسیار کوچک داشتن است. در مخابرات و اندازه‌گیری‌های دقیق استفاده می‌شوند.

تقسیم‌بندی لیزر بر اساس سطح مخاطره زایی

لیزرها بر اساس خطراتی که ایجاد می‌کنند با در نظر گرفتن طول موج ، توان خروجی و انرژی تابش لیزر بر اساس تابش مستقیم یا انعکاسی پرتو لیزر و صدمات بیولوژیکی اشعه بر چشم و پوست به شرح ذیل تقسیم می‌شوند.

لیزر Class1

این لیزرها به علت توان خروجی و انرژی کم بی‌خطر هستند و حتی در صورت تابش طولانی به چشم صدمه‌ای وارد نمی‌کنند به همین دلیل دستورالعمل ایمنی خاصی برای این گروه ارائه نشده است و علائم احتیاط و هشدار در خصوص استفاده از این لیزرها به روی آن‌ها نصب نمی‌گردد.

لیزر Class2

این لیزرها در ناحیه بینایی بوده که به علت عکس‌العمل چشم در برابر برخورد با نورهای مرئی خطر چندانی به چشم ندارند ولی در مواجهه طولانی صدمه‌زا است. این نوع لیزر از امواج پیوسته cw کوچک‌تر مساوی 1mw و یا لیزر پالسی با طول موج 400- 600mm منتشر می‌شود. نگاه به مدت ۰/۲۵ ثانیه بایستی با عینک حفاظتی انجام گیرد.

لیزر Class3

این لیزرها با خطر متوسط هستند. به شبکیه چشم صدمه می‌زنند. علامت خطر به رنگ قرمز - سفید بر روی آن‌ها برچسب می‌خورد. نبایستی به لیزرهای کلاس ۳ مستقیماً حتی لحظه‌ای و گاه به گاه نگاه شود. به دو زیر گروه به شرح ذیل طبقه‌بندی می‌شود:

- ✓ **Class 3a:** اگر مدتی کوتاه با چشم غیر مسلح و در زمان پاسخ طبیعی چشم به آن‌ها نگاه شود خطری برای انسان ندارد اما در صورت عبور پرتو لیزر از تجهیزات اپتیکی نظیر عدسی و فیبر نوری به چشم آسیب جدی وارد می‌کند. این لیزرها در ناحیهٔ مرئی و نامرئی هستند. بازتاب‌های این نوع لیزر خطرناک نبوده خطر آتش‌سوزی نیز ندارد. توان خروجی لیزر مرئی کلاس 3a پنج برابر لیزر کلاس 2 و توان خروجی لیزر نامرئی کلاس 3a پنج برابر لیزر کلاس 1 است.
- ✓ **Class 3b:** لیزرهایی هستند که در برخورد مستقیم یا حتی بازتاب‌های آن به چشم صدمه می‌زند. این لیزرها به پوست نیز خطرهایی ایجاد می‌کند. نباید اشعه لیزر پخش‌شده از میان پنجره یا روزنه‌ای به خارج راه یابد.

لیزر Class 4:

این لیزرهای پرخطر محسوب می‌شوند که علاوه بر برخورد مستقیم، بازتاب مستقیم و حتی بازتاب‌های پخش‌شده آن‌ها نیز به چشم آسیب می‌رسانند. توان خروجی لیزر بالا است و سوختگی‌های پوستی را سبب می‌شود. بعضی لیزرهای صنعتی-نظامی و جراحی از این نوع هستند.

متوسط توان یک موج پیوسته یا پالسی مکرر لیزر کلاس ۴ بیش از ۵۰۰ mW است. تراز تشعشعات تک پالسی ۳۰-۱۵۰ mJ است. در محدوده مرئی و نامرئی هستند. انتشار لیزر گروه ۴ در بیش از ۲ W/cm^2 خطر آتش‌سوزی دارد.

چندین سازمان مختلف، از جمله ANSI، کمسیون بین‌المللی الکتروتکنیکال (IEC[1])، مؤسسه ملی استاندارد آمریکا (ANSI[2])، کمسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیریونیزان(ICNIRP[3])و آژانس‌های نظارتی در ایالات‌متحده آمریکا طبقه‌بندی‌های مختلفی برای لیزر بر اساس سطح خطرات بالقوه آن معرفی کرده‌اند. در طبقه‌بندی ANSI سه زیر کلاس M۱، M۲، و R۳ اضافه شده است. لیزر M۱ تنها در صورت مشاهده به‌وسیله ابزار نوری مانند دوربین دوچشمی می‌تواند باعث آسیب چشم شود. همچنین لیزر کلاس M۲ در صورت مشاهده بیش از ۰/۲۵ ثانیه و به کمک ابزار نوری توانایی آسیب‌زایی به چشم دارد. ذکر این نکته ضروری است که به جزء تفاوت‌های جزئی، اکثر طبقه‌بندی‌های انجام توسط سازمان‌های مختلف معادل هم هستند.

جدول ۱۶- خلاصه طبقه‌بندی لیزر بر اساس سطح پتانسیل خطر آن‌ها(ANSI Z136.1)

سطح یک(Class I)	لیزر به علت توان کم یا کنترل‌های فنی مهندسی نمی‌تواند باعث آسیب شود.
سطح دو (Class II)	در صورت مشاهده در کمتر از ۰/۲۵ ثانیه، پلک زدن می‌تواند برای جلوگیری از آسیب به چشم کافی باشد. حداکثر سطح قدرت = ۱ میلی وات
سطح ۳ (Class IIIA)	مشاهده مستقیم و مشاهده پرتوی بازتابی برای مدت بیش از ۰/۲۵ ثانیه ممکن است باعث آسیب چشم شود. حداکثر توان = ۵ مگاوات است.
سطح چهار (ClassIIIB)	مشابه IIIA، جز این که حداکثر قدرت آن۵۰۰ میلی وات است و حداکثر دز تابشی مواجهه آن۱۰ ژول بر سانتی‌مترمربع در هر پالس می‌باشد
سطح پنج (Class IV)	خطرناک برای چشم و پوست در طول مشاهده مستقیم و مشاهده پرتوی منتشر شده- خطر بالقوه حریق- سطح قدرت بیش از ۵۰۰ میلی وات.

1- International ElectrotechnicalCommission (IEC)
2- American National Standards Institute (ANSI)
3- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)

روش اندازه‌گیری پرتو لیزر

در مورد ارزیابی خطرات بهداشتی لیزر، باید در ابتدا ضرورت اندازه‌گیری در نظر گرفته شود. به‌عنوان یک قاعده کلی اندازه‌گیری لیزر به‌عنوان تنها خروجی، باهدف تعیین طبقه‌بندی خطر لیزر انجام می‌شود. نظارت و پایش روزانه پرتو لیزر به‌ندرت توسط سازنده یا توسعه‌دهنده لیزر مورد توجه قرار می‌گیرد. به هر حال در محیط‌های دارای تابش لیزر، محاسبه شدت تابش، میزان مواجهه افراد و مقایسه آن با استانداردهای مجاز تماس ضروری می‌باشد.

معیارهای اندازه‌گیری لیزر

برای محاسبه تابش، انرژی خروجی و مواجهه با پرتو لیزر در هر فاصله از منبع لیزر، باید قطر اولیه و قطر واگرایی پرتو لیزر، تعیین شود. انرژی خروجی با استفاده از کالری‌سنج[1]و یا دیگر وسایل اندازه‌گیری خروجی انرژی قابل اندازه‌گیری است. اندازه‌گیری واگرایی اشعه برای تعیین فاصله مشاهده بالقوه خطرناک (فاصله اسمی خطر چشم) بسیار مهم می‌باشد. اندازه‌گیری قدرت از طریق دیافراگم، نیز ممکن است برای تعیین قطر مؤثر پرتو و واگرایی استفاده شود. از نظر تجزیه و تحلیل خطر، دانستن حداکثر خروجی لیزر پالسی برای تعیین احتمال مواجهه با پرتوهای بازتابشی ضروری می‌باشد. ساده‌ترین روش برای این منظور، استفاده از سطوح واکنش حرارتی و یا فوتوشیمیایی (کاغذ پرتو مشخصات) می‌باشد. در موارد دیگر که تابش پرتو برای ایجاد یک تغییر در سطح کاغذ پرتو مشخصات کافی نباشد، استفاده از عکاسی معمولی و یا یک ابزار رادیومتری با دیافراگم کوچک ضروری می‌باشد.

انواع وسایل رادیومتری

به‌طور کلی وسایل اندازه‌گیری تابش دارای یک آشکارساز است که شدت تابش به‌وسیله تولید اختلاف‌پتانسیل الکتریکی، جریان و تغییر مقاومت، به‌وسیله یک مدار

1- Calorimeter

حساس الکترونیکی اندازه‌گیری می‌شود. آشکارساز، عامل مهم و تعیین‌کننده اولیه در انتخاب یک وسیله اندازه‌گیری تابش است. هر یک از انواع آشکارسازها، دارای ویژگی‌های خاصی است که دارای مزایا و نقاط ضعفی برای اندازه‌گیری سطح معینی از تابش نوری در یک محدوده خاصی از طول موج می‌باشد. هیچ یک از مدل‌های آشکارساز، قابلیت استفاده برای اندازه‌گیری تمام انواع اشعه لیزر دارا نمی‌باشد. همچنین یک آشکارساز بسیار حساس می‌تواند توسط یک پرتو لیزر با قدرت بالا از بین رود.

الف-آشکارسازهای حرارتی

انرژی لیزر را می‌توان از طریق تبدیل آن به گرما و سنجش گرما، اندازه‌گیری کرد. ترموکوپل‌ها و بولومتر[1] معمول‌ترین انواع مبدل مورد استفاده برای این منظور است. ترموکوپل، متشکل از دو سیم فلزی مختلف که در انتها، به هم متصل هستند، تشکیل شده است. در اثر گرم شدن محل اتصال و ایجاد درجه حرارت متفاوت در دو فلز، جریانی الکتریکی ایجاد می‌شود که شدت آن به اندازه اختلاف دما (شدت نور رسیده به دتکتور) ارتباط مستقیمی دارد. در گرماسنج های بالستیک[2] اغلب از یک عنصر تبدیل کننده انرژی برای اندازه‌گیری انرژی در یک پالس لیزر استفاده می‌شود. در این دستگاه از دو جذب‌کننده استفاده می‌شود. یک جذب‌کننده در معرض انرژی نور لیزر قرارگرفته، در اثر جذب انرژی، دمای آن افزایش می‌یابد. این در حالی است که دیگری، یک جاذب مرجع بوده تنها در معرض نور محیط می‌باشد. اختلاف درجه حرارت بین آن‌ها تولید یک اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌کند که مقدار آن متناسب با انرژی هر پالس نور لیزر می‌باشد.

بولومتر دارای یک عنصر مقاومتی است که تغییر مقاومت الکتریکی در آن تابعی از دما می‌باشد.یک شکل خاصی از چنین عنصر مدار مقاومت گرمایی،شامل یک نیمه‌هادی با ضریب مقاومت منفی در درجه حرارت بالا می‌باشد. همچنین عنصر مقاومتی، برای به

1- Bolometers
2- Ballistic thermopiles

حداکثر رساندن جذب انرژی، در یک دریافت کننده انرژی پوشش داده شده با دوده، محصور می‌باشد.

آشکارسازهای پیروالکتریک[1]، آشکارسازهای حساسی هستند که بر خواص پیروالکتریک برخی از کریستال‌های قطبی مانند تورمالین و نیترید گالیم (GaN) استوار می‌باشد. در نتیجه تغییر دمای ایجاد شده در اثر تابش پرتو، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی درکریستال ایجاد می‌شود.

تابش نور لیزر بر روی سطح آشکارساز، باعث افزایش درجه حرارت سطح، ایجاد یک جریان در کریستال و تغییر ولتاژ در سراسر کریستال می‌شود. که این تغییر در ولتاژ، متناسب با شدت تابش لیزر می‌باشد. پاسخ یک آشکارساز پیروالکتریک به انرژی و نوع از کریستال بستگی دارد.

گرماسنج[2] و کالری‌مترهای دیسکی توسط یک پاسخ طیفی نسبتاً خطی شناخته می‌شوند. ممکن است زمان پاسخ، کالری مترها و ترموپیل‌ها در هنگام اندازه‌گیری پالس‌های کوتاه، بسیار طولانی باشد. آشکارسازهای پیروالکتریک (حساس به نرخ تغییرات درجه حرارت در مواد کریستالی) دارای زمان پاسخ در حد نانو ثانیه می‌باشند.

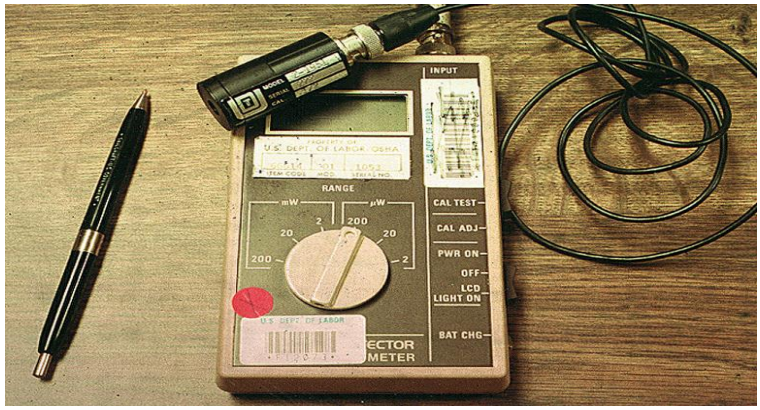
آشکارسازهای حرارتی بیشترین کاربرد را در اندازه‌گیری اشعه لیزر ناحیه مادون قرمز دارند، ناحیه‌ای که در آن، آشکارسازهای دیگر پاسخ نداده و آشکارسازهای کوانتومی نیاز به خنک‌کننده دارند. برای اندازه‌گیری لیزر باقدرت ۱۰ میلی وات تا ۱۰۰ وات، کالریمتر دیسکی در تمام طول موج‌های نوری قابل‌اعتماد می‌باشد. این دتکتورها می‌تواند برای لیزر پالسی با انرژی کمتر از ۱۰۵ ژول بر مترمربع(آستانه آسیب به دتکتور) استفاده شود.

برای لیزر پالسی با سطح انرژی بالاتر، استفاده از ترموپیل‌های بالستیک و کالری‌مترهای دیسکی با حجم جاذب[3] توصیه می‌شود. این دتکتورها برای استفاده در

1- Pyroelectric detectors
2- Thermopiles
3-Volume-absorber disc calorimeters

آزمایشگاه نسبت به محیط واقعی مناسب‌تر می‌باشند. زیرا برای ثبات در اندازه‌گیری، بعد از سنجش چند ثانیه‌ای تا یک دقیقه‌ای لیزر پالسی، نیاز به استفاده از خنک‌کننده می‌باشد.

به‌طور کلی آشکارسازهای مبتنی بر اثرات حرارتی دارای حساسیت کمتری نسبت به دستگاه‌های کوانتومی است.با این حال، دارای مزایایی چون عملکرد مستقل از طول موج مستقل، پایداری بسیار بالا، آسان بودن فرایند کالیبراسیون و حفظ کالیبراسیون تجهیزات برای مدت زمان طولانی می‌باشد.



شکل۶۳- نمونه‌ای از دستگاه جهت اندازه‌گیری توان تابشی لیزر

ب-آشکارسازهای کوانتومی[1]

این آشکارسازها در ناحیه طیفی ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، حساس‌ترین نوع آشکارساز می‌باشند. حساسیت طیفی این آشکارسازها، به مواد فوتوکاتد مورد استفاده در دیودهای نوری خلأ، لوله‌های فوتو مولتی پلایر[2] و ویژگی‌های ذاتی سیلیکونیا ژرمانیوم بستگی دارد. سیلیکون مورد استفاده در دیودهای نوری حالت جامد، ممکن است به‌صورت دتکتور حساس به نور یا فوتو ولتاژ عمل نماید. انتخاب نوع آشکارساز به طول موج هدف برای اندازه‌گیری یا حذف بستگی دارد. آشکارساز دیودی حساس به نور خلأ، با زمان پاسخ در

1- Quantum detectors
2- Photomultiplier tubes

حد یک نانو ثانیه، می‌تواند برای اندازه‌گیری لیزرهای ماوراءبنفش، لیزر مرئی و مادون‌قرمز نزدیک استفاده شود. همچنین با استفاده از اسیلوسکوپ انرژی هر پالس، پهنای پالس، فرکانس پالس، و قدرت پیک نمایش داده می‌شود. کالیبراسیون دوره‌ای سیستم های رادیومتری دوره‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. روش کالیبراسیون توصیه شده برای تعیین تابش، استفاده از یک کالری‌متر دیسکی مرجع و یا رادیومتر پیروالکتریک می‌باشد.

حد مجاز مواجهه[1]

مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی در برابر پرتو لیزر به شرایطی اشاره دارد که چنانچه کلیه شاغلین به‌طور مکرر در مواجهه با آن قرار گیرند، آثار نامطلوب مشهودی بر سلامت آنان ایجاد نگردد. مقادیر مزبور به‌عنوان راهنما برای کنترل مواجهه افراد با پرتوهای مذکور به‌کار می‌روند و نباید به‌عنوان مرز قطعی بین حد ایمن و حد خطر تلقی گردند. حدود مواجهه شغلی بر اساس کامل‌ترین اطلاعات به دست آمده از مطالعات تجربی تعیین گردیده است. در عمل خطرات چشمی و پوستی ناشی از لیزر را می‌توان با به‌کارگیری تمهیدات کنترلی، متناسب با نوع لیزر مهار نمود.

ذکر این نکته ضروری است که در تنظیم استانداردهای ایمنی برای چشم، عمل کانونی کردن عدسی چشم باید در نظر گرفته شود. همچنین مقدار کل انرژی نوری ورودی به چشم توسط منطقه باز مردمک تعیین می‌شود. انرژی عبوری نور که به شبکیه چشم می‌رسد توسط رنگدانه‌های اپیتلیوم جذب‌شده، اکثر آن به گرما تبدیل می‌شود. نظر به فرایند کانونی عدسی تصویر تشکیل شده بر روی شبکیه چشم بسیار کوچک‌تر از مساحت باز مردمک می‌باشد.

برای نور با طول موج (λ) سانتی‌متر، قطر مردمک چشم (DP) و عدسی بافاصله کانونی (f) سانتی‌متر، قطر تصویر تشکیل‌شده بر روی شبکیه چشم (dr) به‌صورت زیر خواهد بود:

$$d_r = \frac{2.44\lambda f}{d_p}$$

1 - Maximum permissible exposure (MPE)

همچنین داریم :

$$H \text{ or } E = \frac{\text{انرژی}}{\text{مساحت}}$$

H: دز تابشی

E: شدت تابش

همچنین نسبت H یا E قرنیه به شبکیه متناسب است با معکوس مربع نسبت قطر مردمک به قطر تصویر ایجاد شده بر روی شبکیه:

$$H\left(\text{شبکیه}\right) = H\left(\text{قرنیه}\right) \times \left(\frac{dp}{dr}\right)^2$$

مثال: لیزر یاقوت Q سوئیچ با طول موج(λ = 694.3) نانومتر، که در هر پالس ۱۵ ژول انرژی منتشر می‌کند. اگر یک پالس از تابش این پرتو با قطر ۱/۶ سانتی‌متر، به‌طور تصادفی به یک چشم با عدسی بافاصله کانونی ۱/۷ سانتی‌متر که عنبیه آن تا ۷قطر میلی‌متر باز باشد، وارد شود. مطلوب است محاسبه شدت تابش در شبکیه و قرنیه؟

راه حل: تابش دریافتی در سطح قرنیه:

$$H = \frac{\text{انرژی}}{\text{مساحت}} = \frac{15\,J}{\frac{\pi}{4}\,(1.6\,cm)^2} = 7.46\,\frac{J}{cm^2}$$

با فرض فاصله کانونی عدسی(۱/۷ سانتی‌متر)، قطر تصویر تشکیل‌شده بر روی شبکیه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$dr = \frac{2.44 \times 694.3 \times 10^{-7}cm \times 1.7\,cm}{0.7cm} = 4.11 \times 10^{-4}cm$$

همچنین انرژی دریافتی در شبکیه به‌صورت زیر به دست خواهد بود:

$$H(\text{شبکیه}) = H\,(\text{قرنیه}) \times \left(\frac{dp}{dr}\right)^2$$
$$= 7.46\,\frac{J}{cm^2} \times \left(\frac{0.7cm}{4.11 \times 10^{-4}cm}\right)^2$$
$$= 2.16 \times 10^7$$

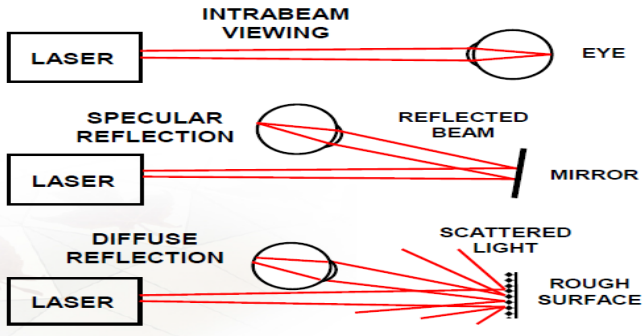
حداکثر مواجهه مجاز باید در حدی باشد که فرایند تمرکز و کانونی کردن عدسی دچار اختلال نشود. لازم به ذکر است که توصیه‌های کمیته علمی و فنی چندین سازمان معتبر معادل هم می‌باشند. به‌طور کلی عوامل اصلی مؤثر بر(MPE) به شرح زیر است:

- نوع مواجهه (قرار گرفتن چشم در معرض مستقیم[1] - بدترین حالت)
- طول موج
- ویژگی‌های پالس
- مدت زمان مواجهه

شکل انواع مواجهه چشم با پرتوی لیزر در شکل ۶۴ آمده است.

روزنه محدود[2]

در این بخش برای مقایسه با حدود مجاز مواجهه شغلی، میانگین تابندگی دسته پرتوهای لیزر یا زمان پرتودهی تمام روزنه محدود در ناحیه طیفی و زمان مواجهه مناسب برآورد می‌شود. اگر قطر دسته پرتوهای لیزر کمتر از قطر روزنه محدود کننده باشد، تابندگی مؤثر دسته پرتوهای لیزر یا پرتودهی آن را می‌توان از طریق تقسیم توان دسته پرتوهای لیزر یا انرژی آن بر سطح روزنه محدودکننده به دست آورد. فهرست روزنه‌های محدودکننده در جدول ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۶۴- انواع اشکال مواجهه چشم با پرتوی لیزر

1- Intrabeam
2- Limiting Apertares

جدول ۱۷- حدود شکاف‌ها برای تعیین حد مجاز مواجهه شغلی لیزر

گستره طیفی (نانومتر)	مدت مواجهه (ثانیه)	چشم (میلی‌متر)	پوست (میلی‌متر)
۱۸۰-۴۰۰	۱×۱۰^{-۹}-۰/۲۵	۱	۳/۵
۱۸۰-۴۰۰	۰/۲۵-۳۰×۱۰^{۳}	۳/۵	۳/۵
۴۰۰-۱۴۰۰	۱×۱۰^{-۱۳}-۰/۲۵	۷	۳/۵
۴۰۰-۱۴۰۰	۰/۲۵-۳۰×۱۰^{۳}	۷	۳/۵
۱۴۰۰-۱×۱۰^{۵}	۱×۱۰^{-۱۴}-۰/۲۵	۱	۳/۵
۱۴۰۰-۱×۱۰^{۵}	۰/۲۵ -۳۰×۱۰^{۳}	۳/۵	۳/۵
۱×۱۰^{۵}-۱×۱۰^{۶}	۱×۱۰^{-۱۴} -۳۰×۱۰^{۳}	۱۱	۱۱

اندازه منبع و ضریب تصحیح C_E

موارد زیر در طول موج‌های ناحیه خطر شبکیه یعنی ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر (nm) اعمال می‌شود. معمولاً لیزر منبع کوچکی در حد یک منبع نقطه‌ای است و شامل یک زاویه کمتر از α_{min} که برابر با ۱ میلی رادیان است، می‌باشد. با این وجود هر منبعی که زاویه α آن از α_{min}، که از چشم ناظر اندازه‌گیری می‌شود بزرگ‌تر باشد، به‌عنوان یک منبع متوسط ($\alpha_{min} < \alpha \leq \alpha_{max}$) و یا منبع بزرگ ($\alpha > \alpha_{max}$) منظور می‌شود. برای مدت زمان پرتوگیری t، زاویه α_{max} به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

جدول ۱۸= مدت زمان مواجهه و زاویه α_{max}

مدت زمان مواجهه	زاویه α_{max}
برای $t \leq ۰/۶۲۵$ ms	a_{max} = ۵ mrad
برای ۰/۶۲۵ ms< t <۰/۲۵s	a_{max} =۲۰۰ × $t^{-۰/۵}$ mrad
برای $t \geq ۰/۲۵$s	a_{max} =۱۰۰ mrad
	a_{min} =۱/۵ mrad

چنانچه منبع مستطیل شکل است، α میانگین حسابی بلندترین طول و کوتاه‌ترین بعد قابل‌مشاهده می‌باشد.

ضرایب تصحیح C,B,A (C_A, C_B, C_C)

مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی برای پرتوگیری چشم که در جدول ۱۹ ارائه شده است در تمام طول موج‌ها کاربرد دارد. حد مجاز مواجهه شغلی با طول موج‌های بین ۷۰۰nm و ۱۰۴۹ nm با ضریب C_A افزایش می‌یابد. در برخی موارد که فرد در معرض طول موج‌های بین ۴۰۰ و ۶۰۰ نانومتر قرار می‌گیرد (به دلیل کاهش حساسیت فوتوشیمیایی در صدمات وارد به شبکیه چشم) ضریب تصحیح C_B باید به‌کار برده شود. ضریب تصحیح C_C در طول موج‌های ۱۱۵۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر به‌کار می‌رود که به دلیل جذب در عبور از محیط چشم قبل از رسیدن به شبکیه است. مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی مندرج در جدول ۲۰ در ارتباط با پرتوگیری پوست از پرتوهای لیزر می‌باشد.

پرتوگیری پالسی مکرر[1] (RPE)

لیزرهای اسکن با موج پیوسته[2] (CW) و یا لیزرهای پالسی مکرر می‌توانند سبب پرتوگیری پالسی مکرر شوند. حد مجاز مواجهه شغلی برای نگاه کردن مستقیم به پرتو در طول موج‌های بین ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر و همچنین در پرتوگیری تک پالسی (پالسی با مدت زمان t) ارائه شده است و با استفاده از ضریب تصحیح که بر اساس تعداد پالس در هر پرتوگیری مشخص می‌گردد، تعدیل می‌شود. ابتدا تعداد پالس‌ها (n) در یک پرتوگیری برحسب Hz محاسبه می‌گردد. سپس این مقدار که فرکانس تکرار پالس نامیده می‌شود، در مدت زمان پرتوگیری ضریب می‌گردد. معمولاً پرتوگیری در محدوده‌ای از ۰/۲۵ ثانیه برای منبع مرئی درخشان تا ۱۰ ثانیه برای منبع مادون قرمز اتفاق می‌افتد. حد مواجهه شغلی تصحیح شده برای هر پالس از رابطه زیر به دست می‌آید:

(حد مجاز مواجهه شغلی تک پالس) $(n^{-0/25})$ = حد مجاز مواجهه شغلی معادله (۱)

1 - Repetitively Pulsed Exposures
2- Continuous Wave

معادله فوق فقط در شرایط ایجاد صدمات حرارتی یعنی کلیه پرتوگیری‌های با طول موج بیش از ۷۰۰ نانومتر و برخی از پرتوگیری‌ها با طول موج‌های کوتاه‌تر کاربرد دارد. برای طول موج‌های مساوی یا کمتر از ۷۰۰ نانومتر حد مجاز تصحیح‌شده از معادله ۱ در صورتی استفاده می‌شود که متوسط تابندگی کمتر از حد مواجهه شغلی برای پرتوگیری مداوم باشد. درصورتی‌که مدت پرتوگیری بین ۱۰ ثانیه تا T_1 ثانیه باشد، متوسط تابندگی (یعنی پرتوگیری تجمعی کامل برای nt[۱] برحسب ثانیه) نباید از دوز مندرج در جدول ۱۹ تجاوز نمایند.

جدول ۱۹- حد مجاز مواجهه شغلی پرتوگیری مستقیم عدسی چشم
(نگاه مستقیم به پرتو) حاصل از پرتو لیزر

ناحیه طیفی	طول موج (nm)	زمان پرتوگیری (t) برحسب ثانیه	حد مجاز مواجهه شغلی	
UVC	۱۸۰-۲۸۰*	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۳ mj/cm²	این محدوده نباید از $۰/۵۶\ t^{۰/۲۵}$ j/cm² در $t \leq ۱۰$ s تجاوز نماید
UVB	۲۸۰-۳۰۲	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۳ mj/cm²	
	۳۰۳	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۴ mj/cm²	
	۳۰۴	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۶ mj/cm²	
	۳۰۵	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۱۰ mj/cm²	
	۳۰۶	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۱۶ mj/cm²	
	۳۰۷	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۲۵ mj/cm²	
	۳۰۸	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۴۰ mj/cm²	
	۳۰۹	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۶۳ mj/cm²	
	۳۱۰	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۱۰۰ mj/cm²	
	۳۱۱	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۱۶۰ mj/cm²	
	۳۱۲	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۲۵۰ mj/cm²	
	۳۱۳	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۴۰۰ mj/cm²	
	۳۱۴	$۱۰^{-۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۶۳۰ mj/cm²	
UVA	۳۱۵ -۴۰۰	$۱۰^{-۹}$ تا ۱۰	$۰/۵۶\ t^{۰/۲۵}$ j/cm²	
	" — "	۱۰ تا $۱۰^{۳}$	۱/۰ j/cm²	
	" — "	$۱۰^{۳}$ تا ۳×۱۰^{۴}	۱/۰ mw/cm²	

** اُزن O_3 توسط منابع انتشار پرتو فرابنفش (UV) در طول موج‌های کمتر از 250 nm در هوا تولید می‌گردد، به بخش حدود مجاز شغلی عوامل شیمیایی- اُزن مراجعه شود.*

۱- nt = زمان هر پالس × تعداد پالس

جدول ۲۰- حد مجاز مواجهه شغلی پرتوگیری مستقیم عدسی چشم
(نگاه مستقیم به درون پرتو) حاصل از پرتو لیزر

ناحیه طیفی	طول موج (nm)	زمان پرتوگیری (t) برحسب ثانیه	حد مجاز مواجهه شغلی
نور	۴۰۰–۷۰۰	$۱۰^{-۱۱}$ تا $۱۰^{-۱۵}$	۱۵×۱۰^{-۹} j/cm²
	۴۰۰–۷۰۰	$۱۰^{-۹}$تا $۱۰^{-۱۱}$	$۲/۷\ t^{۰/۷۵}$ j/cm²
	۴۰۰–۷۰۰	۱۸×۱۰^{-۶} تا $۱۰^{-۹}$	۰/۵ µj/cm²
	۴۰۰–۷۰۰	۱۰ تا ۱۸×۱۰^{-۶}	$۱/۸\ t^{۰/۷۵}$ mj/cm²
	۴۰۰–۴۵۰	۱۰تا ۱۰۰	۱۰ mj/cm²
	۴۵۰–۵۰۰	۱۰تا T_1	۱mw/cm²
	۴۵۰–۵۰۰	T_1تا ۱۰۰	۱۰ C_B mj /cm²
	۴۵۰–۵۰۰	۱۰۰تا ۳۰۰۰۰	۰/۱ C_B mw /cm²
	۵۰۰–۷۰۰	۱۰۰تا ۳۰۰۰۰	۱mw/cm²
IR-A	۷۰۰–۱۰۵۰	$۱۰^{-۱۱}$ تا $۱۰^{-۱۳}$	۱۵ $C_A\times$ $۱۰^{-۹}$ j/cm²
	۷۰۰–۱۰۵۰	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۱}$	$۲/۷\ C_A t^{۰/۷۵}$ j/cm²
	۷۰۰–۱۰۵۰	۱۸×۱۰^{-۶} تا $۱۰^{-۹}$	۰/۵ C_A µj/cm²
	۷۰۰–۱۰۵۰	۱۰تا ۱۸×۱۰^{-۶}	$۱/۸\ C_A t^{۰/۷۵}$ m j/cm²
	۷۰۰–۱۰۵۰	۱۰تا ۳۰۰۰۰	C_A mw/cm²
	۱۰۵۰–۱۴۰۰	$۱۰^{-۱۱}$ تا $۱۰^{-۱۳}$	$۱/۸\ Cc\times10^{-1})\mu$ j/cm²
	۱۰۵۰–۱۴۰۰	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۱}$	$۲۷C_C\times t^{۰/۷۵}$ j/cm²
	۱۰۵۰–۱۴۰۰	۵۰×۱۰^{-۶} تا $۱۰^{-۹}$	$۵C_c$ µj/cm²
	۱۰۵۰–۱۴۰۰	۱۰تا ۵۰۰×۱۰^{-۶}	$۹\ C_C\times t^{۰/۷۵}$ mj/cm²
	۱۰۵۰–۱۴۰۰	۱۰تا۳۰۰۰۰	$۵C_c$ mw/cm²
IR-B & C	۱۴۰۱–۱۵۰۰	$۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۱۴}$	۰/۱ j/cm²
	۱۴۰۱–۱۵۰۰	۱۰تا $۱۰^{-۳}$	$۰/۵۶\ t^{۰/۲۵}$j/cm²
	۱۵۰۱–۱۸۰۰	۱۰تا $۱۰^{-۱۴}$	۱/۰ j/cm²
	۱۸۰۱–۲۶۰۰	$۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۱۴}$	۰/۱ j/cm²
	۱۸۰۱–۲۶۰۰	۱۰تا $۱۰^{-۳}$	$۰/۵۶\ t^{۰/۲۵}$ j/cm²
	۲۶۰۱–$۱۰^{۶}$	$۱۰^{-۷}$ تا $۱۰^{-۱۴}$	۱۰mj/cm²
	۲۶۰۱–$۱۰^{۶}$	۱۰تا $۱۰^{-۷}$	$۰/۵۶\ t^{۰/۲۵}$ j/cm²
	۱۴۰۰–$۱۰^{۶}$	۱۰تا ۳×۱۰^{۴}	۱۰۰mw/cm²

نکات قابل‌توجه به هنگام استفاده از جدول ۲۰:

- C_A = نمودار ۲؛ C_B=۱ به ازاء λ = ۴۰۰ – ۵۴۹ nm
- $C_B = ۱۰^{[۰/۰۱۵(\lambda - ۵۵۰)]}$ به ازاء λ = ۵۵۰ – ۷۰۰ nm ؛ C_c = ۱ از ۷۰۰ تا ۱۱۵۰ نانومتر
- $C_c = ۱۰^{[۰/۱۸۱(\lambda - ۱۱۵۰)]}$ در طول موج‌های بزرگتر از ۱۱۵۰ نانومتر و کمتر از ۱۲۰۰ نانومتر
- C_c = ۸ از ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر؛ T_1 = ۱۰s به ازاء λ=۴۰۰–۴۵۰ nm
- $T_1 = ۱۰ \times ۱۰^{[۰/۰۲ (\lambda - ۵۵۰)]}$ به ازای λ= ۴۵۰ – ۵۰۰nm
- T_1 = ۱۰s به ازاء λ=۵۰۰–۷۰۰ nm

برای چشمه‌های متوسط یا بزرگ (مثلاً شبکه‌های دیود لیزر) در طول موج‌های بین ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر حد مجاز شغلی پرتوگیری برای نگاه کردن مستقیم به پرتو را می‌توان با ضریب تصحیح (C_E) طبق رابطه ذیل افزایش داد، مشروط بر آنکه زاویه چشم بیننده و منبع تابش پرتو (اندازه‌گیری شده از فاصله چشم بیننده) بزرگ تر از α_{min} باشد. مقدار (C_E) مطابق با جدول ۲۱با α متناسب است:

زاویه ۱۰۰ میلی رادیان را می‌توان α_{max} در نظر گرفته در نقطه‌ای که حد مجاز شغلی به‌عنوان رادیانس ثابت بیان شده باشد و معادله فوق برحسب رادیانس L به‌صورت زیر تبدیل گردد:

- به ازاء $t < ۰/۶۲۵$ ms $L_{AOE} = (۳/۸۱ \times ۱۰^{-۵}) \times (AOE_{pt\ منبع})$ برحسب $j(cm^{-2} \times Sr)$
- به ازاء ۰/۶۲۵ s < t < ۰/۲۵s $L_{AOE} = (۷/۶ \times t^{-۰/۵})$ برحسب $j(cm^{-2} \times Sr)$
- به ازاء t >۱۰۰s L_{AOE} = ۴/۸ برحسب W $(cm^{-2} \times Sr)$

جدول ۲۱- مقادیر ضریب تصحیح C_E و زاویه چشم بیننده و منبع تابش پرتو α

زاویه چشم بیننده و منبع تابش پرتو	اندازه چشمه قابل تشخیص	ضریب تصحیح(C_E)
$\alpha \le \alpha_{min}$	کوچک	$C_E = 1$
$\alpha_{min} < \alpha \le \alpha_{max}$	متوسط	$C_E = \alpha / \alpha_{min}$
$\alpha > \alpha_{max}$	بزرگ	$C_E = 3.33, \quad t \ge 0.625$ $C_E = 3.33\ t^{0.5}, \quad 0.625 < t < 0.25s$ $C_E = 66.7, \quad t > 0.25s$

شکاف وسیله سنجش باید در فاصله ۱۰۰mm یا بیش از آن از منبع پرتو قرار گیرد. برای سطوح تابندگی بزرگ، میزان حد مجاز شغلی برای مواجهه پوست در زیرنویس جدول ۲۲ ارائه شده است.

جدول ۲۲- مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی پرتوگیری پوستی اشعه لیزر

ناحیه طیفی	طول موج (nm)	مدت پرتوگیری (t) برحسب ثانیه	حد مجاز مواجهه شغلی
UVA*	۱۸۰-۴۰۰	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{۴}$	مطابق جدول ۱۹
LIGHT&IR-A	۴۰۰-۱۴۰۰	$۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۷}$	$۲\ C_A \times ۱۰^{-۲}$ j/cm²
	۴۰۰-۱۴۰۰	۱۰ تا $۱۰^{-۷}$	$۱/۱\ C_A\ (t^{۰/۲۵})$ j/cm²
	۴۰۰-۱۴۰۰	۱۰ تا ۳×۱۰^{۴}	$۰/۲\ C_A$ W/cm²
IR – B & C**	$۱۰^{۶}$-۱۴۰۱	$۱۰^{۹}$ تا ۳×۱۰^{۴}	مطابق جدول ۲۰

** اُزن (O_3) توسط منابع پرتو فرابنفش (UV) در طول موج‌های کمتر از ۲۵۰mm در هوا تولید می‌گردد. به بخش حدود مجاز شغلی عوامل شیمیایی اُزن مراجعه شود.*

C_8 =۱/۰ به ازاء λ = ۴۰۰-۷۰۰nm برای λ = ۷۰۰ — ۱۴۰۰ nm

*** در طول موج‌های بیش از ۱۴۰۰ nm، برای سطح مقطع پرتو به میزان بیش از ۱۰۰ سانتی مترمربع و مدت پرتوگیری بیش از ۱۰ ثانیه است، حد مواجهه شغلی از رابطه mw/ cm² ($OEL = (10000/A_3)$ به دست می‌آید که A_3 مساحت پوست پرتو گرفته از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سانتی مترمربع و OEL در صورتی که مساحت پوست پرتو گرفته بیش از ۱۰۰۰ cm² باشد ۱۰ mw/cm² و درصورتی‌که مساحت پوست پرتو گرفته کمتر از ۱۰۰ باشد حد مجاز شغلی ۱۰۰ mw/cm² می‌باشد.*

تعیین حد مجاز مواجهه برای مشاهده مستقیم با چشم

مواجهه بر مبنای مشاهده مستقیم با چشم انرژی لیزر (شکل ۶۵) از طریق معادله زیر به دست می‌آید.

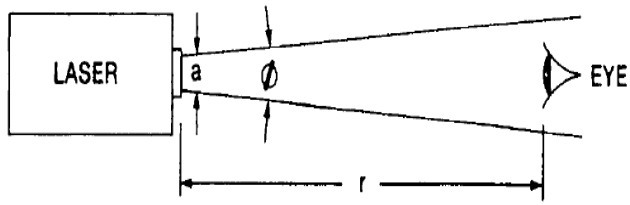
$$H = E \times t$$

H : دز تابشی برحسب ژول بر سانتی‌مترمربع

E شدت تابش برحسب وات بر مترمربع

t : زمان مواجهه برحسب ثانیه

مقادیر متناظر در دیافراگم لیزر H_0 و E_0 نامیده می‌شوند.



شکل ۶۵- نحوه مشاهده مستقیم[1] پرتو ساطع شده از منبع

مثال: در صورت مواجهه با تابش لیزر پیوسته به مدت ۵ ثانیهHe–Cd با سطح توان ۲۰ میلی وات در طول موج ۴۴۲ نانومتر، ، میزان مجاز مواجهه چشمی(MPE) را محاسبه نمایید؟

راه حل: بر اساس جدول ، میزان MPE در این حالت برابر است

$$MPE(H) = 1.8\,t^{0.75} \times 10^{-3}\,\frac{j}{cm^2}$$

برای زمان(t) ۵ثانیه خواهیم داشت:

$$MPE\,(H) = 1.8(5)^{0.75} \times 10^{-3} = 6.02\,\frac{mj}{cm^2}$$

حد مجاز مواجهه (MPE)به‌صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$H\,\frac{mJ}{cm^2} = E\frac{mW}{cm^2} \times t\ (\text{ثانیه})$$

$$MPE(E) = 6.02\,\frac{mJ}{cm^2} \div 5(\text{ثانیه}) = 1.2\,\frac{mW}{cm^2}$$

1- Intrabeam viewing

ذکر این نکته ضروری است که آسیب حرارتی تابش پالسی دریک باند باریک و پالس‌های تکراری، شدیدتر از میانگین همان مقدار انرژی در فرم یکنواخت می‌باشد.
لذا سطح مواجهه مجاز(MPE) لیزر پالسی نسبت به لیزر پیوسته در سطح پایین‌تری قرار دارد.در ایمنی لیزر، لیزر پالسی به ایجاد پالس لیزر با طول مدت کمتر از ۰/۲۵ ثانیه و فرکانس تکرار (PRF≥1) هرتز اطلاق می‌شود. برای لیزر پالس تکراری، MPE با توجه به سه معیارهای مختلف محاسبه می‌گردد و کمترین مقدار به‌عنوانMPE در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به استاندارد ANSI Z136.1-2007 این معیارها و قانون به شرح زیر می‌باشد:

۱- حد تک پالس[1]: با فرض مواجهه با تنها یک پالس از یک لیزر پالسی متعدد و MPE فقط برای آن تک پالس استفاده می‌شود.

۲- میانگین قدرت حد[2]: با هدف تعیین میانگین انرژی در هر پالس، MPE به دست آمده بر اساس مجموع همه انرژی تابیده‌شده به یک بافت، بر تعداد پالس‌ها در طی این دوره تقسیم می‌گردد.

۳- حد پالس تکراری: برای جلوگیری از آسیب حرارتی پالس تجمعی، حد مواجهه (MPE) لیزر پالسی بر اساس اعمال ضریب تصحیح (CP) برای یک تک پالس به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CP = n^{-0.25}$$

$n=$ تعداد پالس‌ها در طی زمان مشاهده

مثال: یک لیزر یاقوت با طول موج(λ = 694.3 نانومتر) در هر ۲دقیقه یک پالس به مدت ۱۰میکروثانیه، تابش می‌کند. MPE برای مواجهه مستقیم چشمی و مواجهه پوستی محاسبه نمایید؟

راه حل: بر اساس جدول حد مجاز، حد مواجهه مجاز برای زمان ۱۰میکروثانیه، مساوی خواهد بود با:

1- Single pulse limit
2-Average power limit

$$H(MPE) = 5 \times 10^{-7} \frac{J}{cm^2}$$

برای محاسبه شدت تابش خواهیم داشت:

$$E(MPE) = \frac{H}{t} = \frac{5 \times 10^{-7} \frac{J}{cm^2}}{10 \times 10^{-6}\, s} = 0.05 \frac{W}{cm^2}$$

حد مجاز مواجهه پوستی برای طول موج ۰/۶۹۴۳ میلی‌متری و به مدت ۱۰ میکروثانیه:

$$H(MPE) = 1.1 \times CA \times t^{0.25} \frac{J}{cm^2}$$
$$= 1.1 \times 1 \times (10 \times 10^{-6})^{0.25}$$
$$= 0.062 \frac{J}{cm^2}$$

مثال: یک لیزر آرگون با طول موج(λ = 0.514 میکرومتر) پالس ۱۰ نانو ثانیه‌ای با PRF یک مگاهرتز تولید می‌نماید. میزان MPE برای مشاهده مستقیم برای مدت ۰/۵ ثانیه محاسبه نمایید؟

راه حل: بر اساس قانون اول(مواجهه با تک پالس۱۰ نانو ثانیه‌ای با پرتو با طول موج ۰/۵۱۴۵ میکرومتری)، میزان MPE به‌صورت زیر خواهد بود:

$$H(MPE) = 5 \times 10^{-7}\, J/cm^2$$

حداکثر کل انرژی منتشرشده در طول ۰/۵ ثانیه‌ای زمان مشاهده خواهد بود:

$$H(MPE) = 1.8\, t^{0.75} \times 10^{-3}\, J/cm^2$$
$$= 1.8(0.5)^{0.75} \times 10^{-3} = 1.1 \times 10^{-3}\, J/cm^2$$

تعداد کل پالس ورودی به چشم در مدت ۰/۵ ثانیه‌ای مشاهده:

$$n = 0.5\, s \times 1 \times 10^{6} \frac{\text{پالس}}{\text{ثانیه}} = 5 \times 10^{5} \text{پالس}$$

پس برای محاسبه حد دز تابشی مواجهه در هر پالس خواهیم داشت:

$$H(MPE) = \frac{1.1 \times 10^{-3} \frac{J}{cm^2}}{5 \times 10^{5} \text{ پالس}} = 2.2 \times 10^{-9} \frac{J/cm^2}{\text{پالس}}$$

$$E(MPE)group = PRF \times 10 \times H(MPE)\frac{\frac{J}{cm^2}}{pulse}$$
$$E(MPE) = 5 \times 10^5 \frac{pulses}{s} \times 0.5s \times 2.2 \times 10^{-9}\frac{J/cm^2}{pulse}$$
$$= 5.5 \times 10^{-4}\frac{W}{cm^2} = 0.55\frac{mW}{cm^2}$$

طبق قانون ۳، MPE در هر پالس باید توسط ضریب تصحیح کاهش یابد:

$$H(MPE) = n^{-0.25} \times MPE\ single\ pulse$$
$$= (5 \times 10^5)^{-0.25} \times 5 \times 10^{-7}\frac{J}{cm^2}$$
$$= 1.9 \times 10^{-8}\frac{J/cm^2}{pulse}$$
$$E(MPE) = 5 \times 10^5 \frac{pulse}{s} \times 0.5s \times 1.9 \times 10^{-8}\frac{J/cm^2}{pulse}$$
$$= 4.75 \times 10^{-3}\frac{W}{cm^2}$$

برای E = ۰/۵۵ میلی وات بر سانتی‌مترمربع،کمترین MPE محاسبه‌شده، $۲/۲ \times ۱۰^{-۹}$ ژول بر سانتی‌مترمربع در هر پالس است، که در این مورد به‌عنوان حد مجاز مواجهه در نظر گرفته می‌شود.

MPE محاسبه‌شده طبق قانون دوم، برایRPF>۵۵ کیلوهرتز و پرتو در محدوده طول موج۰/۴ تا ۱/۰۵ میکرومتر وRPF>۲۲کیلوهرتز برای پرتو در محدوده طول موج ۱/۰۵ تا ۱/۴ میکرومتر،MPE حاکم خواهد بود. این دو محدوده تحت عنوان فرکانس بحرانی[1] برای بروز اثرات لیزر در شبکیه معرفی می‌شوند.

مثال: یک لیزر کوچک هلیوم- نئون، از نوعی که اغلب در کلاس‌های درس استفاده می‌شود، دارای ویژگی‌های به شرح زیر است:

- ✓ طول موج: ۶۳۲/۸ نانومتر

1- Critical frequencies

- ✓ قدرت خروجی: ۰/۵ میلی وات تابش CW
- ✓ قطر دیافراگم: ۲ میلی‌متر
- ✓ واگرایی پرتو :۰/۲ میلی‌رادیان

مطلوب است محاسبه:

الف- شدت تابش در نقطه خروجی لیزر

ب- شدت تابش در فاصله 1 m

ج- شدت تابش در فاصله 10 m

د- فاصله خطرناک مشاهده مستقیم (فاصله‌ای که میزان تابش از ۲/۵ میلی وات بر سانتی‌مترمربع فراتر رود)

راه حل:

الف: شدت تابش در نقطه خروجی لیزر

$$E0 = \frac{\text{قدرت خروجی}}{\text{مساحت دیافراگم}}$$

$$E0 = \frac{0.5mW}{\frac{\pi}{4}(0.2cm)^2} = 15.9mW/cm^2$$

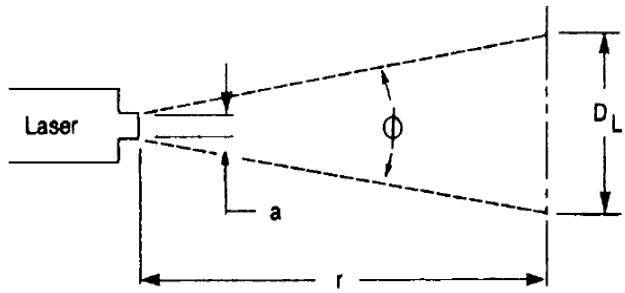
ب- شدت تابش در یک فاصله از دیافراگم به دلیل واگرایی پرتو کمتر از شدت تابش در نقطه خروجی لیزر خواهد بود. همچنین جذب نور لیزر توسط هوا ناچیز است مگر اینکه مسیر بسیار طولانی است. برای پرتو لیزری قابل رؤیت، ضریب میرایی از حدود $۱۰^{-۲}$ در متر در مه غلیظ تا $۱۰^{-۵}$ در متر در هوای پاک متغیر است.

بر اساس شکل۶۶، شدت تابشE برحسب mW/cm2 در فاصله r سانتی‌متر برابر است با:

$$E = \frac{Pe^{-ur}}{Al} = \frac{Pe^{-ur}}{\pi(\frac{1}{2}Dl)^2}$$

$$= \frac{Pe^{-ur}}{\frac{\pi}{4}(\alpha^2 + r^2\emptyset^2)}$$

P : قدرت خروجی لیزر برحسب mW



شکل ۶۶- هندسه ارزیابی شدت تابش در فاصله r از دیافراگم لیزر

AL = مساحت پرتو (سانتی‌متر مربع) لیزر در فاصله r سانتی‌متر
a = دیافراگم لیزر (سانتی‌متر)
DL = قطر (سانتی‌متر) پرتو لیزر در فاصله r سانتی‌متر
φ = واگرایی پرتو(رادیان)
μ = ضریب میرایی هوا(cm^{-1})

در فاصله ۱ متری، $e^{-\mu r} \approx 1$ و شدت تابش معادل ۱۵/۹ میلی وات بر سانتی‌مترمربع (E0)، شدت تابش این لیزر به‌صورت زیر است.

$$E = \frac{0.5mW}{\frac{\pi}{4}\{(0.2cm)^2 + (100cm)^2 \times (0.0002radian)^2)\}} = 13.15\frac{mW}{cm^2}$$

ذکر این نکته ضروری است که شدت نور لیزر از دهانه دیافراگم، از قانون عکس مجذور فاصله تبعیت نمی‌کند.

ج- در فاصله ۱۰ متر (۱۰۰۰ سانتی‌متر)، چگالی توان تابش (شدت تابش) به‌صورت زیر است.

$$E = \frac{0.5mW}{\frac{\pi}{4}\{(0.2cm)^2 + (1000cm)^2 \times (0.0002radian)^2)\}} = 3.98\frac{mW}{cm^2}$$

د- فاصله مشاهده خطرناک تابش لیزر می‌تواند بدون در نظر گرفتن میرایی هوا محاسبه شود. چشم فاصله اسمی خطرناک چشم (NOHD[1]) یا NHZ[2] فاصله‌ای است که فراتر از آن، میزان مواجهه کمتر ازMPE بوده و هیچ خطری برای چشم وجود ندارد. این فاصله شامل تابش مستقیم، بازتابی و تابش منتشره لیزر می‌باشد.

$$rNOHD = \frac{1}{\emptyset\, radians}\sqrt{\frac{PmW}{\frac{\pi}{4}\times E(MPE)\frac{mW}{cm^2}}}$$

$$rNOHD = \frac{1}{2\times 10^{-4}\, radians}\sqrt{\frac{0.5mW}{\frac{\pi}{4}\times 2.5\frac{mW}{cm^2}} - (0.2cm)^2} = 2317cm$$

اصول حفاظت در مواجهه با پرتوهای لیزری

کنترل‌های فنی مهندسی

کنترل‌های مهندسی برای کاهش ریسک خطرات لیزر، نسبت به دیگر اقدامات کنترلی در اولویت قرار دارند. به عبارتی دیگر در صورتی که با استفاده از کنترل‌های مهندسی، ریسک خطرات لیزر تا حد قابل‌قبول کاهش نیابد؛ باید از کنترل‌های مدیریتی و حفاظت فردی استفاده شود. کنترل‌های مهندسی مؤثر و مفید برای کاهش خطرات لیزر عبارت‌اند از:

۱. استفاده از لیزرهای کم‌خطر(کلاس۱) به‌جای لیزرهای پرخطر(کلاس 3B و 4)
۲. کنترل در منبع تولید نظیر استفاده از قفل داخلی (اینترلاک‌ها[3]) در منبع تولید لیزر
۳. محصورسازی محل تولید و عملیات لیزر
۴. استفاده از موانع برای جلوگیری از تابش مستقیم امواج لیزر

1- Nominal ocular Hazard Distance
2- Nominal Hazard Zone
3- Interlocks

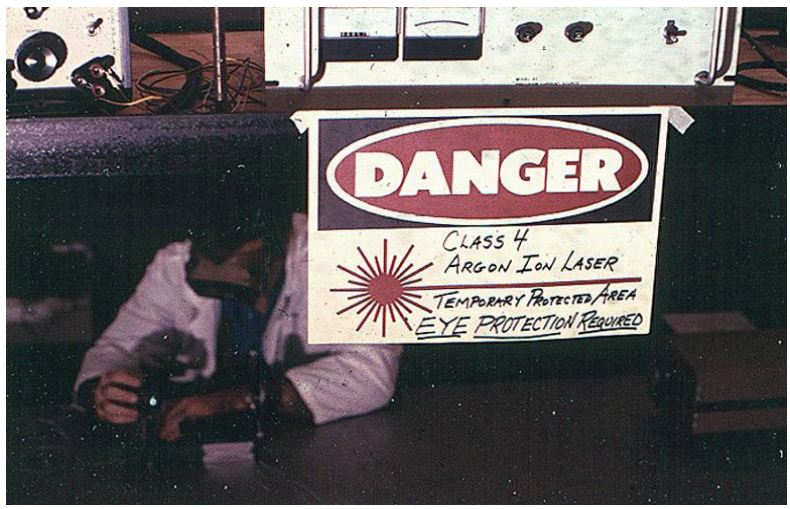
۵. محصورسازی یا اتاقک سازی در محل استفاده از لیزر(محدود نمودن دسترسی افراد)
۶. استفاده از علائم راهنما برای جلوگیری از ورود افراد به مناطق خطرناک

در دسته‌بندی دیگری کنترل‌های مهندسی به سه گروه زیر تقسیم شده است:

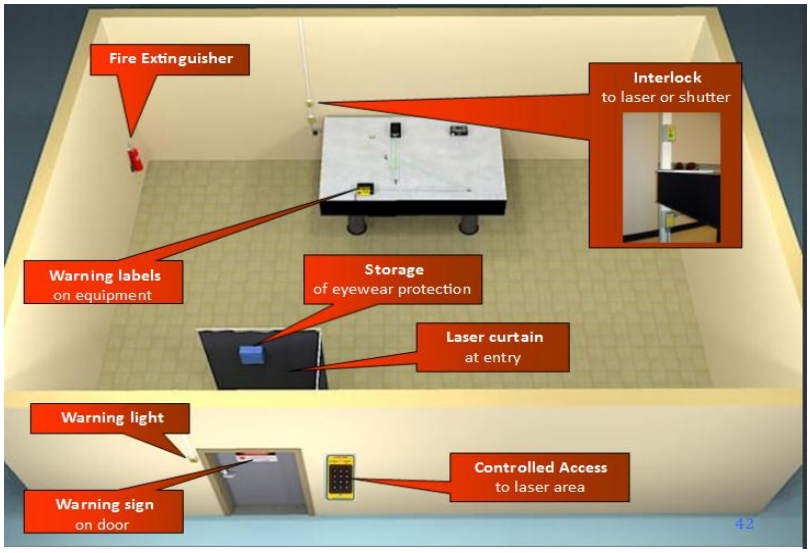
I. حفاظت فیزیکی در برابر خطرات ناشی از تابش پرتو لیزر نظیر پرده‌های محافظ، محصورسازی منبع تولید لیزر، موانع و...
II. علائم راهنمای هشداری (دیداری) برای آگاه کردن افراد از خطر تابش پرتو لیزر نظیر تابلوهای هشداری معمولی، الکتریکی
III. محصورسازی یا تهیه اتاقک برای محدوده عملیات لیزر و در نتیجه جلوگیری از ورود افراد غیرمتخصص به محدوده خطر و همچنین نصب اینترلاک و تمهیدات ایمنی دیگر برای اتاقک

شکل ۶۷- استفاده از قفل Log out و برچسب Tag out روی تجهیزات لیزر

شکل ۶۸ - جداسازی محیط دستگاه لیزر در حین فعالیت با استفاده از موانع



شکل ۶۹- برچسب‌گذاری خطر در محیط کار با دستگاه‌های لیزر



شکل ۷۰- اصول حفاظتی در محیط کار با دستگاه لیزر

شکل ۷۱- جداسازی محل انجام عملیات صنعتی با استفاده از لیزر

وسایل حفاظت فردی در مواجهه با لیزر

با استفاده از عینک محافظ و در اثر کاهش شدت نور لیزر، می‌توان چشم انسان را در مقابل تابش لیزر محافظت کرد. تضعیف نور توسط عینک‌های محافظ، تحت عنوان چگالی نوری[1] نامیده می‌شود:

$$OD = LOG\frac{E\ or\ H}{MPE}$$

MPE: حداکثر مجاز مواجهه روی قرنیه

E: شدت تابش

H: دز تابشی

مثال: یک لیزر پیوسته CO_2 (با طول موج ۱۰/۶ میکرون) که برای جوش‌کاری پلیمر استفاده می‌شود، دارای مشخصات زیر است. OD عینک ایمنی لیزر، برای بدترین حالت مواجهه محاسبه نمایید؟

- ✓ قطر دیافراگم:۳/۵ mm
- ✓ واگرایی: (ϕ) ۴ میلی رادیان
- ✓ زمان پاسخ برای نور نامرئی لیزر: ۱۰ ثانیه

راه حل: میزان شدت تابش در دریچه دیافراگم:

$$E = \frac{P}{\text{مساحت}} = \frac{10W}{\frac{\pi}{4}(0.35cm)^2} = 103.9\frac{W}{cm^2}$$

میزان MPE برای چشم ۰/۱ W/cm^2 می‌باشد. لذا OD به ترتیب زیر خواهد بود:

$$OD = Log\frac{E}{MPE} = Log(\frac{103.9W/cm^2}{0.1W/cm^2}) = 3$$

مثال: لیزر هلیوم- نئون پیوسته باقدرت خروجی۱/۵ میلی وات، قطر پرتو ($1/e^2$)در دیافراگم ۱/۷ میلی‌متر و واگرایی اشعه ۱ میلی رادیان مفروض است. حداقل OD عینک

1- Optical Density

ایمنی به منظور تطابق با MPE توصیه‌شده با استاندارد ANSI برای مواجهه با تابش پرتو لیزر (با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر)در فاصله یک متری از دیافراگم محاسبه نمایید؟

راه حل: از آنجا که ایمنی لیزر، محاسبات بر اساس قطر 1/e انجام می‌شود. لذا قطر $1/e^2$باید به 1/e تبدیل شود:

$$D(1/e) = \frac{D(1/e^2)}{\sqrt{2}}$$

بر اساس رابطه فوق، قطر دیافراگم مورد استفاده در ارزیابی ایمنی لیزر:

$$\alpha = \frac{0.17cm}{\sqrt{2}} = 0.12\ cm$$ قطر دیافراگم

با صرف‌نظر کردن از تضعیف پرتو توسط هوا، میزان E در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از دیافراگم لیزر مساوی خواهد بود با:

$$E = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(a^2 + r^2\emptyset^2)} = \frac{1.5 \times 10^{-3}W}{\frac{\pi}{4}[(0.12cm)^2 + (100cm)^2(1 \times 10^{-3}radian)^2]}$$

$$E = 7.8 \times 10^{-2}\frac{W}{cm^2}$$

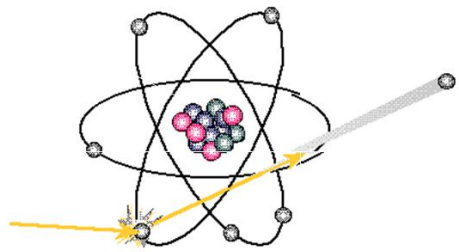
بر اساس در جدول ۳، برای تابش پرتو لیزر هلیوم- نئون، میزان MPE برای چشم برای زمان مشاهده ۰/۲۵ ثانیه، مساوی$۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$ وات بر سانتی‌متر مربع خواهد بود. لذا حداقل OD به شرح زیر خواهد بود:

$$OD = Log\frac{E}{MPE} = LOG\frac{7.8 \times 10^{-2}\frac{W}{cm^2}}{2.5 \times 10^{-3}\frac{W}{cm^2}} = 1.5$$

شکل ۷۲- عینک مخصوص محافظ لیزر با شناسنامه کاهندگی بر روی لنز

پرتوهای یون‌ساز[1]

چنانچه الکترون از میدان کولنی هسته کاملاً خارج شود، اتم یونیزه شده است و در این حالت یک یون مثبت و یک الکترون آزاد ایجاد می‌گردد. چنانچه الکترون جداشده از لایه، کماکان در میدان کولنی هسته باقی بماند در این صورت فقط یک جابجایی الکترون با کسب انرژی از لایه پایین‌تر به لایه بالاتر انجام شده است که الکترون بلافاصله با آزاد نمودن آن انرژی به لایه خود بازمی‌گردد. در این حالت گفته می‌شود که اتم برانگیخته و یا تهییج شده است. طبیعی است بیشترین انتقال انرژی به ماده از طریق یونش خواهد بود.



شکل۷۳- نحوه برخورد پرتوهای یون‌ساز به اتم جسم هدف

1- Ionizing Radiation

پرتوهای یون‌ساز به پرتوهایی اطلاق می‌شود که هنگام عبور از ماده قادر به یون‌سازی در اتم‌های آن ماده می‌باشند. از جنبه بهداشتی و از نظر سازوکار برخورد، پرتوهای یون‌ساز به دو دسته تقسیم می‌شوند.

- پرتوهای مستقیم یون‌ساز: شامل ذرات باردار نظیر آلفا، بتا، پروتون و یون‌های سنگین.
- پرتوهای غیرمستقیم یون‌ساز: شامل پرتوهای ایکس، گاما و نوترون.

ذره آلفا (α)

این ذره از دو پروتون و دو نوترون تشکیل‌شده که مشابه هسته اتم هلیوم می‌باشد. ذرات آلفا در حین واپاشی هسته اتم‌های ایزوتوپ‌های سنگین ناپایدار عناصر تولید می‌شوند. دارای قدرت یون‌سازی زیاد و از آنجا که این ذره جرم زیادی دارد قدرت نفوذ کمی داشته و به راحتی توسط یک برگ کاغذ متوقف می‌شود. بنا بر این خطر پرتوگیری خارجی ندارد و تنها زمانی که از طریق استنشاق یا خوراکی وارد بدن شود خطر پرتوگیری داخلی دارد.

ذره بتا (β)

یکی از علل ناپایداری هسته‌های مواد رادیواکتیو نسبت پروتون به نوترون در هسته است که با تجزیه پروتون یا نوترون هسته به حالت پایدارتری می‌رسد. برای گسیل ذره بتای منفی یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود و برای گسیل ذره بتای مثبت یک پروتون به نوترون تبدیل می‌شود ذره بتا تابش می‌شود. طیف اشعه بتا تک انرژی نبوده و یک طیف پیوسته با تمام مقادیر انرژی از صفر تا حداکثر را داراست. برد این اشعه بسته به انرژی اولیه (عنصر مادر) و جنس محیط از چند سانتیمتر تا حدود یک متر می‌باشد. قدرت نفوذ این اشعه چندین برابر ذره آلفا بوده و برای حفاظت از انتشار آن به ضخامت چند میلی‌متری از آلومینیوم نیاز است.

ذره نوترون (n)

نوترون دارای بار الکتریکی خنثی است و به همراه پروتون در داخل هسته اتم اصل جرم اتم را تشکیل می‌دهند. ذرات بدون بار و سنگین هسته محسوب می‌شوند که هم قدرت یون‌سازی و هم قدرت نفوذ بسیار بالایی دارند بنا بر این از جنبه بهداشتی دارای اهمیت بالایی هستند. این ذرات در حین واپاشی هسته ناپایدار گسیل می‌شوند. نوترون را می‌توان با بمباران عناصر مناسب مانند آلومینیوم و بریلیوم، به وسیله ذرات آلفا تولید کرد. یکی از منابع نوترون‌ها، رآکتورهای اتمی هستند، که در آن‌ها، اورانیوم شکافته شده و نوترون و انرژی دمایی آزاد می‌کند. نوترون‌ها بر پایه مقدار انرژی به‌صورت نوترون‌های کند تا نوترون‌های خیلی‌تند تقسیم‌بندی می‌کنند.

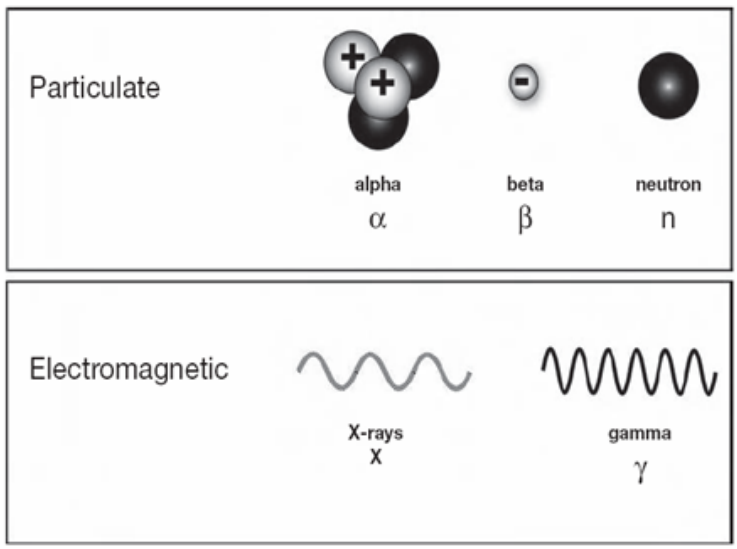
پرتو گاما (γ)

در واقع انرژی گسیل‌شده از هسته ایزوتوپ ناپایدار عناصر(ماده رادیواکتیو) در حین واپاشی است که در قالب موج الکترومغناطیس منتشر می‌گردد. اشعه گاما خاصیت یونیزاسیون آن بسیار کمتر از ذرات آلفا و بتا می‌باشد، اما قدرت نفوذ آن بسیار بالاست. در بسیاری از موارد در حین واپاشی‌های گاما دهنده هسته‌ها ، پرتوهای ذره‌ای نیز گسیل می‌شوند ماهیت پرتو گاما مانند پرتو مجهول است اما انرژی بیشتری دارد در نتیجه، دارای نفوذ بیشتر است. پرتو مجهول، در نتیجه فعل و انفعالات الکترونی بیرون هسته تولید می‌شود، درحالی‌که ، پرتو گاما از فعل‌وانفعالات درون هسته به وجود می‌آید.

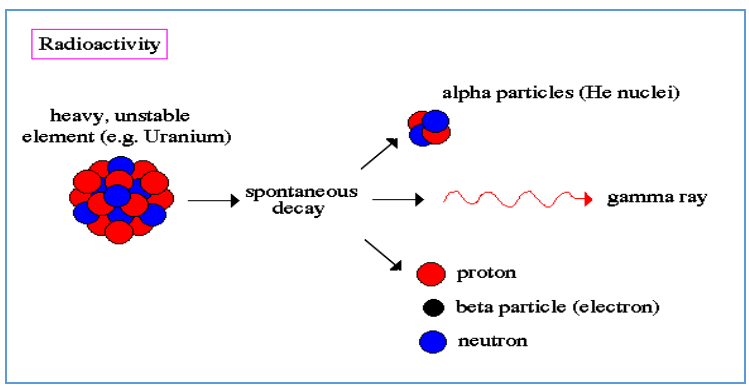
پرتو ایکس (X)

اشعه ایکس از فعل‌وانفعالات خارج هسته و به‌صورت مصنوعی در داخل یک لامپ مخصوص به دو روش تولید می‌شود. در روش اول الکترون شتاب داده‌شده از کاتد در داخل لامپ هنگامی که یک الکترون از مداری در اتم ماده آند خارج می‌کند، الکترون دیگر از مدارهای بیرونی‌تر، جای آن را پر می‌کند و تفاوت انرژی الکترون در دو مدار به‌صورت پرتو ایکس نمایان می‌شود. به عبارت دیگر در هنگام برخورد الکترون‌های با سرعت بالا به

فلزات، الکترون‌های لایه‌های پایین‌تر به لایه‌های بالاتر منتقل‌شده (اتم‌ها برانگیخته می‌شوند) و در هنگام برگشت الکترون‌ها به حالت پایه انرژی مازاد را به‌صورت پرتو ایکس گسیل می‌کنند. در روش دوم کاهش ناگهانی سرعت الکترون‌های سریع شتاب داده‌شده از کاتد در مواجهه با ابر الکترونی اتم‌های ماده آنتی کاتد منجر به تولید اشعه ایکس می‌گردد که اصطلاحاً روش تابش ترمزی هم نامیده می‌شود.



شکل۷۴- انواع پرتوهای یون‌ساز با ماهیت موجی و ذره‌ای



شکل۷۵- واپاشی هسته مواد رادیواکتیو منشأ ایجاد پرتوهای یونیزان

اثرات بهداشتی پرتوهای یون‌ساز

اثرات بهداشتی مواجهه با پرتوهای یون‌ساز به دو بخش تقسیم می‌شوند که شامل اثرات قطعی و اثرات احتمالی هستند.

اثرات قطعی[1]

هنگامی که میزان دز دریافتی نسبتاً زیاد باشد، اثرات قطعی پدیدار می‌گردند و سبب از بین رفتن تعداد زیادی از سلول‌های بافتی می‌شوند. این امر ممکن است به از بین رفتن عملکرد اندام‌های آسیب‌دیده نیز منجر گردد. همواره یک سطح آستانه دز وجود دارد که پایین‌تر از آن، اثرات قطعی بروز نمی‌نمایند، حفاظت و ایمنی در برابر اثرات قطعی با پایین نگه‌داشتن دز در زیر سطح آستانه تضمین می‌گردد.

اثرات احتمالی[2]

اثرات احتمالی در تمام سطوح پرتوگیری اتفاق می‌افتد. یکی از عواقب خطرناک این‌گونه پرتوگیری‌ها احتمال بروز سرطان می‌باشد که معمولاً چند سال بعد از پرتوگیری اولیه ممکن است آشکار شود. بروز این‌گونه اثرات در یک شخص هم محتمل است و هم ممکن است که هرگز اتفاق نیافتد، لیکن با افزایش دز، احتمال وقوع آن بیشتر می‌شود.

با توجه به فرضیه غیر آستانه‌ای، اصول حفاظت در برابر اشعه نیازمند تدوین و آماده نمودن سطح پرتوگیری با حداقل ممکن آن می‌باشد. البته این امر با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از قبیل پرتوهای طبیعی موجود در محیط که کاهش آن‌ها به سمت صفر امکان‌پذیر نیست صورت می‌پذیرد. این معیار و مفهوم تحت نام اصل کاهش مواجهه تا حد ممکن و منطقی قابل حصول[3] ALARA مطرح شده است. بدین مفهوم که برای کاهش ریسک بروز اثرات سلامتی پرتوها بایستی میزان دوز دریافتی افراد به حداقل ممکن کاهش

1- Stochastic
2- Non-Stochastic
3- As Low As Reasonably Achievable

یابد. بر این اساس اهداف حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز بر اساس استانداردهای انجمن حفاظت در برابر پرتو ایالات‌متحده[1] NCRP عبارت‌اند از:

- جلوگیری از بروز عوارض قطعی تشعشع با نگه‌داشتن پرتوگیری در زیر حدود آستانه مجاز.
- محدود نمودن مخاطره آثار احتمالی تا سطح قابل‌تحمل از طریق به‌کارگیری مقررات فنی و اجرایی به منظور اطمینان از ایمنی منبع و نیز کاهش احتمال پرتوگیری از منابع پرتوزا به کمترین حد ممکن بر اساس اصل ALARA .

آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز

انرژی جذب‌شده در بافت (دز پرتو)، عامل مهمی در احتمال بروز و شدت اثرات بیولوژیک پرتو است. در صورت اطلاع از میزان پرتوی دریافتی ، دز جذبی قابل اندازه‌گیری است. در تخمین خطرات واقعی، دو عامل مهم دیگر، یعنی اثرات بیولوژیک نسبی پرتو و حساسیت بافت نیز بااهمیت است. دزیمتری پرتوهای یون‌ساز به سه شکل زیر انجام می‌گیرد:

- دزیمتری فردی: اگر منبع پرتو در خارج از بدن قرار داشته باشد، پرتوگیری با استفاده از روش دزیمتری پرتوگیری خارجی تعیین می‌شود.
- دزیمتری محیطی: به ویژه در مواقع بروز سوانح پرتوگیری و مواقعی که دسترسی به سایر روش‌ها میسر نباشد.

برخی از عوامل مؤثر در انتخاب یک دزیمتر برای کاربردی مشخص شامل قابل‌حمل بودن، استحکام مکانیکی ، سهولت کاربرد و قرائت ، رفع آلودگی ، قابل‌اعتماد بودن و علاوه بر این دزیمتر باید با توجه به نوع پرتو درجه‌بندی شده و دارای ویژگی‌های ذیل باشد:

- توانایی واکنش در مقابل پرتو ورودی
- حساسیت ، صحت و دقت قابل‌قبول
- ارتباط خطی سیگنال ایجادشده با دز دریافتی

1- National Commission of Radiation Protection

- پاسخ یکنواخت

کمیت‌های بیان پرتوهای یون‌ساز

واحد پرتوزایی

این کمیت تحت عنوان اکتیویته برای تعیین میزان فعالیت مواد رادیواکتیو به‌کار می‌رود. جهت بیان سطح آلودگی هوا ، خاک و مایعات به مواد رادیواکتیو از واحد پرتوزایی به‌صورت اکتیویته ویژه استفاده می‌شود. اکتیویته مواد رادیواکتیو برحسب کوری Ci و بکرل Bq بیان می‌گردد.

$1Ci = 3.7\times10^{10}$ Bq

اکتیویته ویژه در واقع میزان اکتیویته در واحد حجم یا جرم ماده معمولاً برحسب Bq/kg، Bq/m3 ، Bq /lit ، µCi/lit بیان می‌گردد.

واحد پرتودهی

میزان پرتو دریافتی را در واحد زمان نشان می‌دهد. به عبارت دیگر پرتودهی توانایی فوتون‌هایی شامل پرتوهای ایکس یا گاما در یون‌سازی هوا است. رونتگن(R) واحد پرتودهی در سیستم قدیمی و برابر است با مقدار پرتوی ایکس یا گاما که در هر سانتی‌متر مکعب هوا در شرایط استاندارد یک استات کولمب بار (C ۳×۱۰^{۹}) از هر نوع تولید کند. در تعریف دیگر یک رونتگن برابر با پرتودهی ایکس یا گاما که در یک کیلوگرم هوا $۱۰^{-۴}\times$ ۲/۵۴ کولمب بار از هر نوع تولیدکند. چون یک یون بار معادل (sC $۴/۸\times۱۰^{-۱۰}$) و جرم cm^3 ۱ هوا برابر با g ۰/۰۰۱۲۹۳ می‌باشد ، می‌توان دوز دریافتی در هوا ناشی از یک رونتگن پرتو را به‌صورت زیر بیان کرد.

1C/kg = 34 Gy(in air) , 1R = 0.877 Rad (in air)

واحدهای جذبی پرتو

الف) دز جذبی پرتو (D)

میزان صدمات ناشی از پرتوها بستگی به میزان پرتو جذب‌شده در بافت هدف دارد. دز جذبی پرتوهای یون‌ساز، مقدار کل انرژی پرتو جذبی دریک گرم ماده است. واحد قدیمی آن راد RAD (Radiation Absorbtion Dose) می‌باشد. یک راد برابر با انرژی جذب شده ۱۰۰ erg در یک گرم ماده یا بافت است. یک erg معادل $۱۰^{۷}$ ژول انرژی است. در سیستم SI یکای گری(Gy)، جایگزین راد می‌شود. یک گری معادل۱۰۰ راد، یا یک راد مساوی $۱۰^{-۲}$ گری یا یک سانتی گری است. یک گری انرژی جذب‌شده یک ژول از پرتوهای یون‌ساز در هر کیلوگرم ماده است.

آهنگ دز جذبی پرتو، مقدار انرژی جذب شده در واحد زمان و واحد جرم بافت است. یکای آن ممکن است به‌صورت راد یا(µGy) در دقیقه، راد یا (mGy) در ساعت، راد یا(Gy) در روز بیان می‌شود.

ب) دز معادل جذبی (H_T)

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

$$H_T = D \times W_R$$

برای پرتوهای مورد استفاده در رادیولوژی و پزشکی هسته‌ای (پرتوهای X و γ ، الکترون و پوزیترون)، W_R مساوی یک است. بنابراین، دز جذبی (D) و دز معادل جذبی (H_T) دارای مقادیر مشابه ولی واحدهای متفاوت راد و رم (گری و سیورت) می‌باشند. برای

ذرات نوترون و آلفا، W_R دارای مقادیر بیشتر (۵ تا ۲۰) می‌باشد. ضرایب وزنی یا ضریب کیفی پرتوها در جدول ۲۳ ارائه شده است.

جدول ۲۳- ضرایب وزنی یا ضریب کیفی پرتوها

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

ج)دز معادل مؤثر جذبی (H_E)

تخمین ریسک مربوط به تابش‌دهی یکنواخت کل بدن است؛ بنابراین خطرات تابش‌دهی بخشی از بدن یا تابش‌دهی غیریکنواخت باید به‌طور مقتضی محاسبه شود. برای این منظور ضریب بافت، W_T مورد استفاده قرار می‌گیرد که تفاوت حساسیت بافت‌های مختلف به پرتو (روی سن و جنس یک جمعیت داده‌شده متوسط‌گیری می‌شود) را نشان می‌دهد. ضرایب وزنی بافت، W_T برای بافت و اندام‌های مختلف در جدول ۲۴ ارائه شده است.

$$H_E = \sum (H_T \times W_T)$$

جدول۲۴ - ضرایب وزنی بافت، W_T برای بافت و اندام‌های مختلف

اندام	ضرایب وزنی بافت
گنادها	۰/۲
مغز استخوان قرمز	۰/۱۲
کولون	۰/۱۲
ریه	۰/۱۲
معده	۰/۱۲
مثانه	۰/۰۵
پستان	۰/۰۵
تیروئید	۰/۰۵
پوست	۰/۰۱
سطح استخوان	۰/۰۱
کلیه	۰/۰۱
بقیه بافت‌ها	۰/۰۵

مثال: در طول سال یک کارگر mGy ۸ ذره آلفا در بخش ریه و mGy ۱۸۰ ذره بتا در بخش تیروئید و mGy ۱۴ ذره بتا به‌صورت یکنواخت در مواجهه خارجی تمام بدن دریافت کرده است . دز معادل مؤثر دریافتی را تعیین نمایید؟

راه حل:

$H_{lung}=20\times8mGy=160\ mSv$

$H_{thyroid}=1\times180mGy=180\ mSv$

$H_{whole-\ body}=1\times14mGy=14\ mSv$

$H_e=0.12\times 160\ mSv+0.05\times180\ mSv+1\times14mSv=42\ mSv$

مثال: میزان پرتو اندازه‌گیری شده توسط دستگاه اندازه‌گیری محیطی در مجاورت ایستگاه کاری تکنسین آزمایشگاه ۲۵ μrem/h است. اگر تکنسین ۸ ساعت کار در روز و ۵ روز در هفته و ۵۰ هفته در سال مشغول به فعالیت باشد، دوز معادل سالیانه آن چقدر می‌باشد؟

H_e=25 µrem/h× 8 h/day×5day/week×50 week/ year

H_e=50000µRem→50mRem

روش‌های آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز

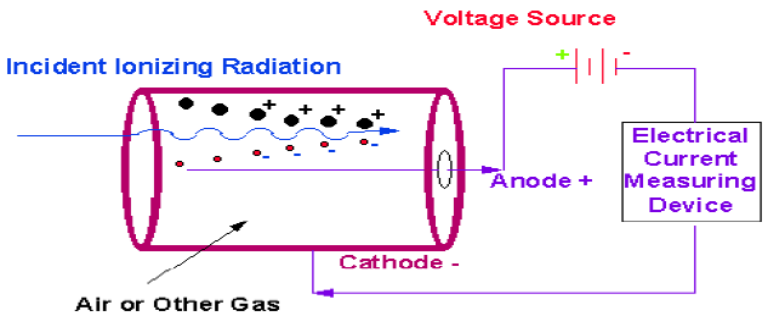
در اثر برخورد پرتوی پرانرژی با ماده، تغییرات فیزیکی شیمیایی خاصی در آن پدید می‌آید. این تغییرات موقتی یا دائمی، اساس آشکارسازی پرتوهای پرانرژی را تشکیل می‌دهد. انواع آشکارسازهای پرتوهای یون‌ساز بر مبنای کارکرد مطابق با جدول ۲۵در ادامه تشریح می‌گردد.

جدول ۲۵- انواع آشکارسازهای پرتوهای یون‌ساز بر مبنای نوع کارکرد

مکانیسم	نوع دستگاه	بستر آشکارساز
الکتریکی	اتاقک یونیزان	گاز
الکتریکی	شمارشگر تناسبی	گاز
الکتریکی	شمارشگر گایگر مولر	گاز
الکتریکی	آشکارساز نیمه رسانا	نیمه رسانا
شیمیایی	فیلم	امولوسیون فوتوگرافیک
شیمیایی	دزیمتر شیمیایی	جامد یا مایع
نور	شمارشگر سنتیلاسیون	کریستال یا مایع
ترمولومینسانس	دزیمتر ترمولومینسانس	کریستال

۱- آشکارسازهای گازی

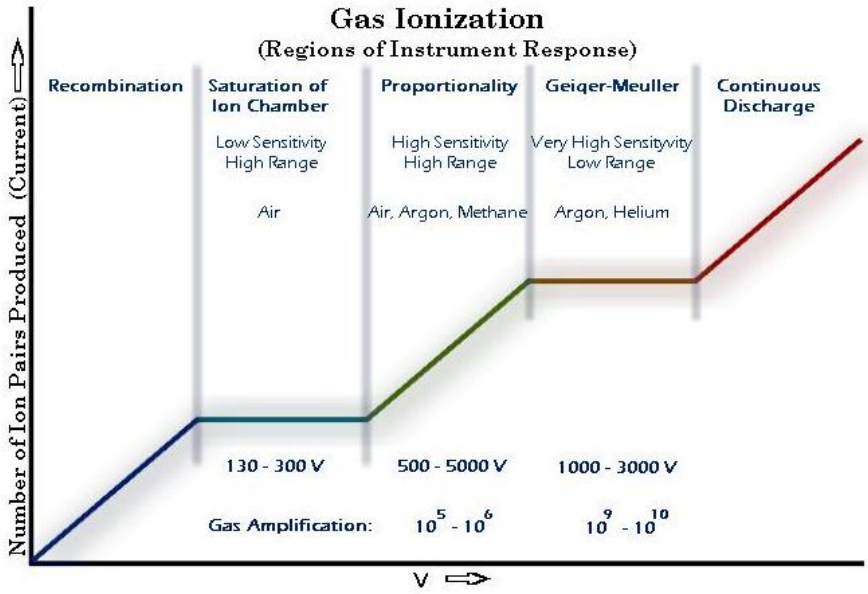
مهم‌ترین ویژگی پرتوهای پرانرژی، یون‌سازی در ماده است. به‌طور کلی به جز در گازها و چند جامد نیمه‌هادی، امکان اندازه‌گیری یون‌های تولیدی در مواد وجود ندارد. اساس سه نوع آشکارساز گازی (اتاقک یون‌ساز، شمارشگر تناسبی و شمارشگر گایگر مولر) اندازه‌گیری یون‌های تولیدی از پرتو در حجم کوچکی از گاز است. برای تشریح سازوکار آشکارسازهای گازی، باید دید وقتی یک پرتو یا ذره شتاب‌دار، در حجم گازی حاوی دو الکترود با اختلاف پتانسیل۷، یون سازی می‌کند، چه اتفاقی رخ می‌دهد.



شکل۷۶- نحوه کارکرد آشکارسازهای گازی

اگر اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود صفر باشد، جفت یون تولیدی، باز ترکیب‌شده، به اتم یا مولکول خنثی تبدیل می‌شود. در نتیجه جریان الکتریکی نخواهیم داشت؛ ولی تحت تأثیر میدان الکتریکی، ناشی از اختلاف پتانسیل الکترودها، تعدادی جفت یون به طرف الکترودها رفته، جریان الکتریکی لحظه‌ای تولید می‌شود. شدت جریان تولیدی به عواملی نظیر اختلاف پتانسیل الکتریکی آند -کاتد (V)، فاصله بین دو الکترود، نوع گاز، حجم، فشار، دمای گاز، شکل و موقعیت الکترودها بستگی دارد. با این حال اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود، مهم‌ترین عامل است. شدت جریان ناشی از یک پرتو در آشکارساز گازی به‌صورت تابعی از اختلاف پتانسیل الکتریکی در شکل ۶۸ نشان

داده شده است. در این رابطه، پنج ناحیه جداگانه وجود دارد که نیاز به توضیح دارد. البته در صورت عدم یونسازی پرتو با وجود ولتاژ، جریان الکتریکی نخواهیم داشت.



شکل ۷۷- مکانیسم عمل انواع آشکارسازهای گازی بر مبنای اختلاف پتانسیل

ناحیه ۱ - باز ترکیب: در این ناحیه اختلاف پتانسیل اعمال‌شده بین الکترودها ناچیز است و در نتیجه جفت یون‌های مثبت و منفی تولیدی پرتو باز ترکیب‌شده، اتم‌ها خنثی تولید می‌شود. این ناحیه از لحاظ آشکارسازی غیر کاربردی است.

ناحیه ۲ - ناحیه یونسازی: در این ناحیه اختلاف پتانسیل الکتریکی به قدر کافی زیاد است که تمام جفت یون‌های ایجادشده به دلیل برخورد پرتو جذب الکترودها شده و پدیده باز ترکیب صورت نمی‌گیرد. هیچ بار تازه‌ای نیز غیر برخورد پرتو با اتم‌های ماده آشکارساز تولید نمی‌گردد. این ناحیه ، ناحیه یونش نامیده شده است و از لحاظ آشکارسازی کاربرد گسترده‌ای دارد.

ناحیه ۳ – ناحیه تناسبی: در این ناحیه افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی نه تنها برای جذب تمام جفت یون‌های اولیه ایجادشده روی الکترودها کافی است، بلکه انرژی کافی به جفت یون‌های اولیه نیز می‌دهد تا هنگام برخورد با اتم‌های مجاور و در مسیر، جفت یون‌های ثانویه تولید کنند. تولید تعداد جفت یون‌های ثانویه به انرژی جفت یون‌های اولیه و به عبارت دیگر به اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال‌شده بستگی دارد. در نتیجه، با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی جریان ناشی از پرتو افزایش می‌یابد. اکنون شدت جریان برای آشکارسازی پرتو یا ذره منفرد که با حجم گاز برخورد کند به قدر کافی افزایش یافته است. شدت جریان تولیدی با انرژی پرتو متناسب است.

ناحیه ۴ – ناحیه گایگر مولر: در این ناحیه اختلاف پتانسیل الکتریکی به حدی افزایش یافته است که جفت یون‌های اولیه ناشی از پرتو یا ذره شتاب‌دار، انرژی بسیار زیادی برای تولید جفت یون‌های ثانویه و حالت برانگیختگی کسب می‌کنند؛ در نتیجه اتم‌های گاز، بیشتر یونیزه و برانگیخته می‌شوند. در این ناحیه میدان الکتریکی به قدری زیاد است که تولید یک جفت یون در حجم اتاق منجر به بهمن‌هایی از یون خواهد شد، لذا در خروجی پالس تقویت‌شده‌ای ایجاد می‌گردد که ارتفاع آن مستقل از انرژی و نوع پرتو ورودی است.

ناحیه ۵ – ناحیه خطر اشتعال: در این ناحیه اختلاف پتانسیل به حدی زیاد است که ایجاد یک یونش منجر به تخلیه الکتریکی می‌گردد و گاز درون آشکارساز به ماده رسانا تبدیل‌شده و اتصال کوتاه بین آند و کاتد ایجاد می‌گردد. در این ناحیه امکان آشکارسازی پرتو وجود ندارد.

الف) آشکارساز یا اتاقک یون‌ساز

اتاقک یون‌ساز یکی از قدیمی‌ترین آشکارسازهای گازی برای اندازه‌گیری مقدار پرتو است. در ناحیه ۲ تغییرات جزئی در اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال‌شده تأثیر قابل‌توجهی در شدت جریان ایجاد نمی‌کند. بنا بر این اتاقک یون‌ساز بسیار پایدار و معتبر

است. این آشکارسازها در ابعاد و اشکال مختلف ساخته می‌شوند. حساسیت ضعیف برای پرتوی ایکس یا گاما و عدم تفکیک انرژی، مهم‌ترین عیب آن است. به علت کمی جریان الکتریکی ناشی از یک پرتو یا ذره، به‌عنوان شمارنده، استفاده نمی‌شود. بنابراین، استفاده اساسی آن در دزیمتری پرتو در رادیولوژی تشخیصی و درمانی است. دزیمتر اتاقک یون‌ساز فارمر برای دزیمتری مطلق در کلیه مراکز رادیوتراپی به‌طور گسترده استفاده می‌شود. در پزشکی هسته‌ای به‌عنوان دز کالیبراتور برای اندازه‌گیری رادیواکتیویته در حد میلی کوری تا کوری استفاده می‌شود. گاهی نیز برای دزیمتری فردی پرتو کار به‌صورت دزیمتر جیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بالأخره اتاقک یون‌ساز با حجم حساس بزرگ برای پایش محیطی نیز به‌کار می‌رود.

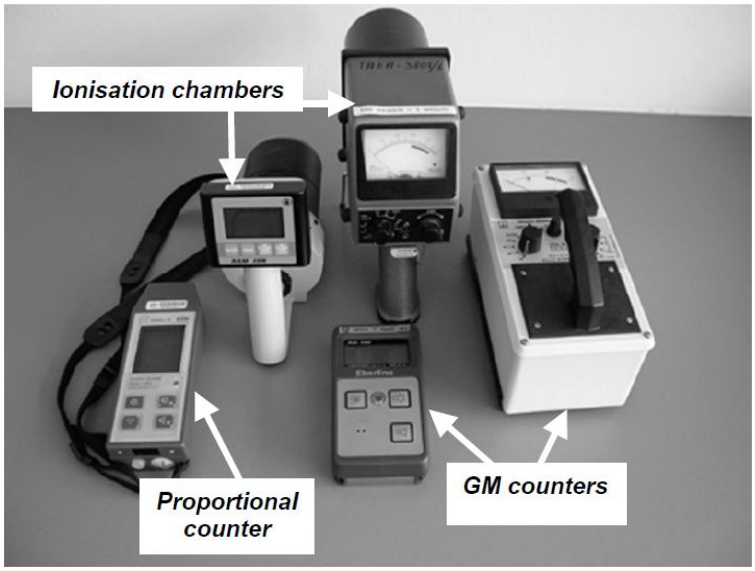
شکل۷۸- یک نمونه دستگاه اندازه‌گیری اتاقک یون‌ساز جهت پایش محیطی

معمولاً در کالیبراتور اتاقک‌های یون‌ساز استوانه‌ای شکل حاوی گاز نادری، نظیر آرگون با فشار زیاد(تقریباً۲۰ اتمسفر) است. فشار زیاد چگالی را افزایش می‌دهد و موجب افزایش حساسیت اتاقک یون‌ساز می‌شود. حفره استوانه‌ای کوچکی در طول محور وجود دارد که نمونه رادیواکتیو برای شمارش، درون آن در نزدیکی مرکز اتاقک قرار می‌گیرد. این شکل هندسی، سبب افزایش حساسیت آشکارساز می‌شود. دیوارهای خارجی اتاقک کاملاً حفاظ گذاری شده، به‌طوری که تابش‌های خارج از اتاقک سبب حداقل تداخل می‌شوند. اصول و

عمل یک دز کالیبراتور بسیار ساده است. جریان الکتریکی ناشی از منبع رادیواکتیو در اتاقک یون‌ساز با آرایش هندسی خاص، با مقدار رادیواکتیویتهٔ چشمه تناسب مستقیم دارد. با این حال، رادیونوکلوئیدهای مختلف با مقدار اکتیویته یکسان جریان الکتریکی متفاوتی تولید می‌کنند. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در فراوانی انتشار(n_i) و انرژی پرتوی γ است. بنابراین، قبل از این‌که از اتاقک یون‌ساز به‌عنوان یک دز کالیبراتور استفاده شود، برای هر رادیونوکلوئیدی، باید کالیبره شود. با تعیین ضرایب کالیبراسیون و از ضرب جریان ناشی از رادیواکتیویتهٔ نامعلوم به ضریب کالیبراتور، مقدار رادیواکتیویتهٔ نامعلوم یک رادیونوکلوئید به سادگی تعیین می‌شود. برای اطمینان از درستی عمل دز کالیبراتور، باید صحت و خطی بودن آن هر سال اندازه‌گیری شود. برای اطمینان، با اندازه‌گیری اکتیویته یک چشمه استاندارد حاوی رادیونوکلوئید با طول عمر بلند نظیر ^{137}Cs یا ^{57}Co کنترل و تصحیح روزانه انجام می‌شود. اکتیویته اندازه‌گیری شده نسبت به رادیواکتیویتهٔ چشمه استاندارد نباید بیش از ۱۰٪ اختلاف داشته باشد. همچنین ضرایب کالیبره فقط برای آرایش هندسی خاص، حجم معین و ظرف خاصی از چشمه معتبر است. اگر شکل یا نوع ظرف حاوی چشمه یا حجم چشمه به‌طور محسوس تغییر کند، ضرایب کالیبره تغییر نموده، اندازه‌گیری باید تکرار شود.

ب) آشکارساز یا شمارشگر تناسبی

این آشکارسازها در ناحیه (۳) کار می‌کنند که یون‌های اولیه به دلیل تولید یون‌های ثانویه تقویت (تقریباً یک میلیون بار) شده‌اند. بنا بر این شدت جریان الکتریکی کافی توسط پرتویی که باید شمارش شود، تولید می‌شود. شدت جریان با انرژی پرتو متناسب است. ازاین‌رو آشکارساز تناسبی برخلاف اتاقک یون‌ساز برای شمارش تک پرتو و تعیین انرژی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. کار با شمارشگر تناسبی به مهارت کافی نیاز دارد. پایداری به زمان و تغییرات اختلاف پتانسیل الکتریکی آن به‌خوبی اتاقک یون‌ساز نیست. شمارشگرهای تناسبی کاربرد عمومی ندارد.



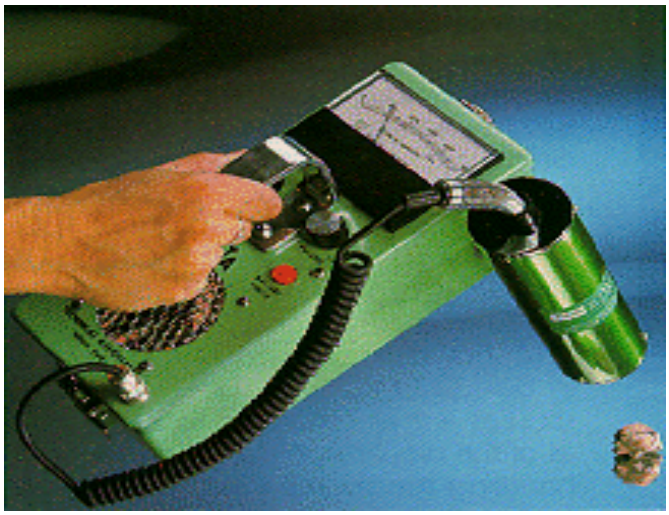
شکل۷۹- انواع آشکارسازهای گازی جهت ارزیابی‌های محیطی پرتوهای یونیزان

ج) آشکارساز یا شمارشگر گایگر- مولر

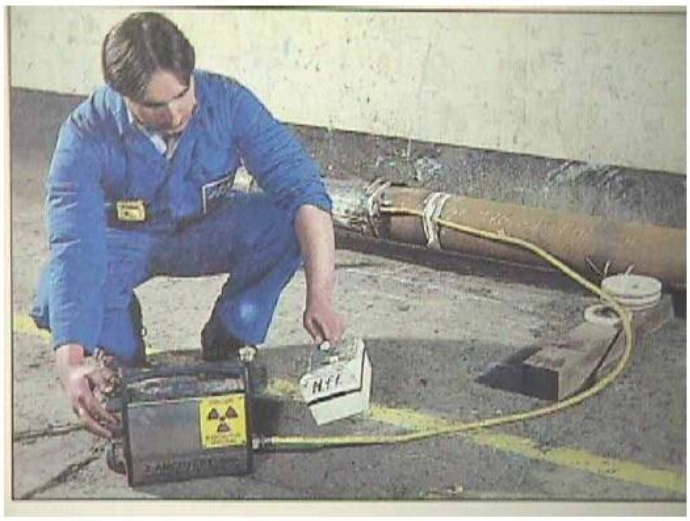
اختلاف پتانسیل آشکارسازهای گایگر- مولر در ناحیهٔ (۴) قرار دارند. در این حالت با ورود پرتو، گاز آشکارساز تخلیه الکتریکی شده، شدت جریانی کم و بیش مستقل از انرژی پرتو و اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی تولید می‌شود. توقف فرآیند تخلیه بار الکتریکی ناشی از پرتو جهت اندازه‌گیری بعدی به‌طور شیمیایی با افزودن قدری هالوژن یا ترکیبات آلی آن به‌عنوان ناخالصی به گاز انجام می‌شود. این ناخالصی‌ها که فرونشان[1] شیمیایی نامیده می‌شوند نور فرابنفش تولیدی هنگام تخلیه بار و انرژی جفت یون‌های ثانویه را جذب می‌کنند. مولکول‌های فرونشان با جذب انرژی و تجزیه خود، تخلیه بار الکتریکی را متوقف می‌سازند، ولی در مدت کوتاهی، بیشتر مولکول‌های فرونشان باز ترکیب‌شده به‌صورت اولیه بازمی‌گردند. بنابراین تعداد کمی از مولکول‌های فرونشان تجزیه می‌شوند. فرونشانی تخلیه بار بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه طول می‌کشد. در این مدت شمارشگر گایگر به پرتوی دیگری پاسخ نمی‌دهد؛ بنابراین، این مدت تقریباً زمان مرده آشکارساز است.

1- Quencher

حداکثر آهنگ شمارش شمارشگرها معمولاً هزار شمارش در ثانیه است. آشکارساز گایگر حساس‌ترین آشکارساز گازی است و به شکل‌ها و اندازه‌های مختلف ساخته می‌شود، کار با آن‌ها ساده و در برابر تغییرات دما و اختلاف پتانسیل الکتریکی کاملاً پایدارند، ولی قادر به اندازه‌گیری انرژی پرتو نمی‌باشند. برای آشکارسازی پرتوی بتا، پنجره کوچکی از لایه نازک آلومینیومی در انتها یا یک‌طرف آشکارساز تعبیه شده است. هنگام آشکارسازی پرتوی X یا γ این پنجره معمولاً بسته می‌شود. این شمارشگرها قابل‌حمل و کاربری آسان دارند. استفاده اساسی این آشکارسازها در پایش محیطی و کارهای حفاظت از پرتو X و γ است.



شکل ۸۰-یک نمونه شمارشگر گایگر مولر جهت ارزیابی محیطی



شکل ۸۱- اندازه‌گیری نشت پرتو در محل محفظه نگهدارنده منبع پرتوزا در پرتوکاری صنعتی

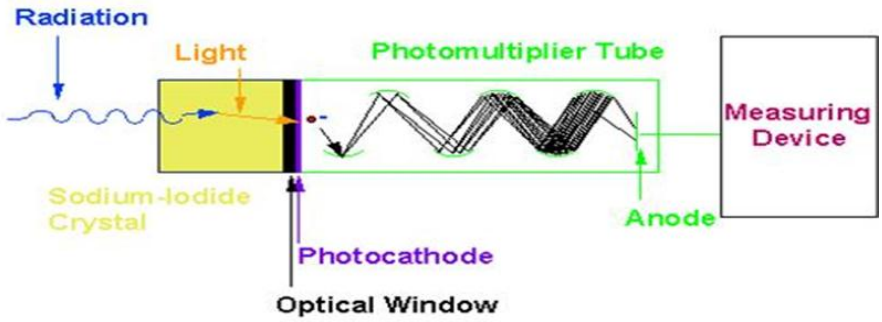
۲-آشکارسازهای جرقه زن[1]

برخی مواد وقتی در مسیر پرتو یون‌ساز قرار می‌گیرند از خود نور مریی ساطع می‌کنند و چون این نور مریی به‌صورت جرقه مشاهده می‌شود لذا آن‌ها را مواد جرقه زن و یا سنتیلاتور می‌نامند. این خاصیت در وسایلی به نام آشکارساز جرقه‌ای برای آشکارسازی پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنتراسن، نفتالین، انواع پلاستیک‌ها، بلور هالیدهای قلیایی نظیر یدید سدیمNaI ، CsF و سولفیدروی نمونه‌هایی از مواد جرقه زن می‌باشند. در پزشکی هسته‌ای بلور یدورسدیم مخلوط با کمی تالیم، NaI(Tl) در میان سینتیلاتورها، بیشترین کاربرد را دارد. متوسط چگالی ($d = ۳/۶۷ g/cm^3$) و عدد اتمی مؤثر ($Z_{eff} = ۴۵$) سبب کارایی آن برای آشکارسازی پرتوهای x و γ در انرژی‌های۳۰ تا ۵۰۰ keV گردیده است. مقدار نور تولیدی در واحد انرژی جذبی در بلور NaI(Tl) یکی از مزیت‌های آن است. بلور یدورسدیم بدون ناخالصی تالیم، نور زیادی تولید نمی‌کند و حضور اندکی تالیم نور منتشره

1- Scintillation Detectors

را با ضریب ۱۰ یا بیشتر تقویت می‌کند. زمان استحاله فسفرسانس که معمولاً معرف زمان مرده یک آشکارساز جرقه‌ای است، تقریباً ۰/۲۵ میکروثانیه است و برای مقادیر رادیواکتیویتهٔ مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای مناسب است.

در این آشکارساز زمانی که نور متناسب با انرژی پرتو یون‌ساز در کریستال ایجاد شد بخشی از این نور مطابق با شکل زیر به فتوکاتد برخورد نموده و بر اساس پدیده فتوالکتریک تعدادی الکترون از آن جدا می‌شود، این الکترون‌ها در لوله فتومولتی پلایر به‌طرف الکترودهای بعدی شتاب داده می‌شوند و باعث جدا شدن الکترون‌ها از روی الکترودها می‌شوند و در طول مسیر تعداد الکترون‌ها افزایش‌یافته و درنهایت تعداد الکترون‌های آشکارشده متناسب با میزان پرتو می‌باشد.



شکل ۸۲- نحوه کارکرد آشکارساز جرقه زن و اجزاء تشکیل‌دهنده

۳-آشکارسازهای نیمه‌هادی[1]

آشکارساز نیمه‌هادی وسیله‌ای است که در آن از مواد نیمه‌هادی برای اندازه‌گیری اثر برخورد ذرات باردار یا فوتون‌ها استفاده می‌شود. آشکارسازهای نیمه‌هادی در طول دهه‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای به ویژه برای آشکارسازی گاما و طیف‌سنجی اشعه ایکس و در آشکارسازهای ذرات، پیداکرده‌اند. در آشکارسازهای نیمه‌هادی، تابش یون‌ساز توسط تعداد حامل‌های بار آزادشده توسط تابش در ماده آشکارسازی که مابین دو الکترود قرار داده شده

1- Semiconductor detector

است، اندازه‌گیری می‌شود. تابش یون‌ساز الکترون و حفره آزاد تولید می‌کند. تعداد جفت‌های الکترون-حفره متناسب با مقدار انرژی انتقالی از تابش به نیمه‌هادی است. در نتیجه انتقال تعدادی از الکترون‌ها از باند ظرفیت به باند هدایت، به همان تعداد، حفره در باند ظرفیت ایجاد می‌شود) ظرفیت و باند انتقال (تحت تأثیر یک میدان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها به سمت الکترودها حرکت کرده، و سبب ایجاد پالسی می‌شود که توسط یک مدار خارجی قابل اندازه‌گیری است. حفره‌ها جای خالی الکترون‌ها بوده و در خلاف جهت الکترون‌ها حرکت می‌کنند. از آنجایی که مقدار انرژی لازم جهت ایجاد یک جفت الکترون-حفره مشخص بوده و به انرژی تابش برخوردی وابسته نیست، می‌توان با اندازه‌گیری تعداد جفت الکترون - حفره‌ها، شدت تابش برخوردی را تعیین کرد.

در آشکارسازهای نیمه‌هادی، انرژی لازم جهت تولید جفت الکترون-حفره در مقایسه با آشکارسازهای گازی بسیار کم است. در نتیجه، در آشکارسازهای نیمه‌هادی تنوع آماری ارتفاع پالس کوچک‌تر بوده و در نتیجه قدرت تفکیک انرژی بسیار بالاتر است. در مقایسه با آشکارسازهای یونیزاسیون گاز، چگالی آشکارسازهای نیمه‌هادی بسیار بالا بوده و ذرات باردار با انرژی بالا می‌توانند انرژی خود را به یک نیمه‌هادی با ابعاد نسبتاً کوچک انتقال دهند. دو نمونه از معمول‌ترین آشکارسازهای نیمه‌هادی، Ge(Li) و Si(Li) هستند که از نیمه‌هادی ژرمانیوم و سیلیسیم با مقدار کمی لیتیوم ساخته‌شده‌اند. Ge(Li) برای آشکارسازی پرتوهای x یا γ استفاده می‌شود و Si(Li) اصولاً برای آشکارسازی پرتوهای ذره‌ای به کار می‌رود. مزیت اصلی آشکارساز Ge(Li) نسبت به آشکارساز جرقه‌ای، قدرت بالای تفکیک انرژی آن است. یک آشکارساز Ge(Li) می‌تواند قدرت تفکیک انرژی ۱٪ در مقایسه با آشکارساز NaI(Tl) باقدرت تفکیک ۱۰٪ برای پرتوی‌های گامای ^{137}Cs داشته باشد. عیب اصلی آشکارسازهای Ge(Li) که سبب محدودیت جدی آن‌ها در کاربرد پزشکی هسته‌ای گردیده، حساسیت پایین، نیاز به نگه‌داری در برودت ۷۷ درجه کلوین (دمای اتاق حدود ۳۰۰ کلوین است) و عدم دسترسی به ابعاد بزرگ آن است.

شکل ۸۳- دزیمترهای الکترونیکی قرائت مستقیم بر مبنای آشکارساز نیمه‌هادی

۴-دزیمترهای فردی

به منظور رعایت بهداشت پرتو و اجرای مقررات، نیاز به اندازه‌گیری پرتوگیری فردی است. این اندازه‌گیری ممکن است هرچند دقیقه یا چند ماه به‌طور متناوب لازم باشد. سه نوع دزیمتر فردی مهم در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای با مزایا و معایب خاص خود عبارت‌اند از:

الف- فیلم بج

ب- دزیمتر ترمولومینسانس

ج- دزیمتر جیبی.

یک دزیمتر ایده‌آل باید دارای ویژگی‌های پاسخ سریع، قابلیت تشخیص انواع پرتوهای یون‌ساز، اندازه‌گیری دقیق دز پرتوهای یون‌ساز با انرژی‌های keV تا MeV و مستقل از زاویه تابش. اندازه کوچک، سبک، کاربری آسان، محکم، ارزان و مستقل از تغییرات شرایط محیط (مثلاً گرما، رطوبت، فشار و منابع پرتوهای غیریون‌ساز) باشد.

الف-فیلم بج[1]

فیلم بج عمومی‌ترین دزیمتر مورد استفاده در پرتوشناسی تشخیصی و پزشکی هسته‌ای است. این دزیمتر شامل یک فیلم کوچک (شبیه فیلم رادیوگرافی دندان) درون

1- Film Badge

لفافه کاغذی است که داخل حفاظ پلاستیکی مخصوصی به نام بج قرارگرفته و روی لباس نصب می‌شود. امولسیون این فیلم مشابه فیلم پرتونگاری در اثر پرتوی X و پس از ظهور ثبوت سیاه می‌شود. با افزایش دز جذبی، فیلم سیاه‌تر می‌شود که با دانسیتومتر میزان سیاهی قابل اندازه‌گیری است. فیلم در واقع یک لایه پلاستیک نازک (۲۰۰ µm) با کریستال‌های برومور نقره حساس در ژلاتین (۲۰-۱۰ µm) پوشیده شده است. در اثر برخورد پرتو یون‌ساز برومور نقره به برم و نقره تجزیه‌شده و ذرات نقره ایجاد تیرگی روی فیلم می‌کنند. با استفاده از دانسیتومتر میزان چگالی نوری[1] فیلم بر مبنای تابش نور به فیلم اندازه‌گیری می‌گردد که متناسب یا تابعی از مقدار مشخصی از پرتو می‌باشد.

$$OD = Log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

I_0: شدت نور برخوردی به فیلم توسط دانسیتومتر

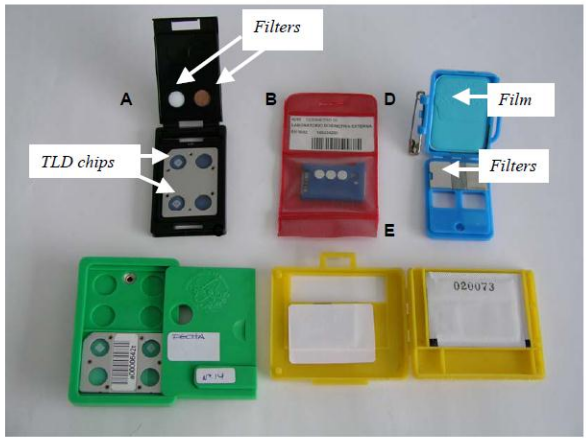
I: شدت نور عبوری از فیلم است.

در شرایط ایده‌آل ارتباط بین دز و میزان چگالی نوری خطی است. با این حال ممکن است در محدوده دز خاصی ارتباط خطی نباشد که می‌بایست برای هر فیلم منحنی کالیبراسیون ارتباط دز با چگالی نوری ترسیم گردد.

شکل ۸۴- دانسیتومتر جهت تعیین چگالی نوری فیلم

1- Optical density

امولسیون فیلم حاوی دانه‌های برمید نقره که عدد اتمی مؤثر آن بیش از عدد اتمی بافت است، در نتیجه، دز فیلم معادل دز بافت نمی‌شود. با انتخاب چندین فیلتر فلزی بر روی فیلم (معمولاً سرب، کادمیوم، قلع و آلومینیوم) و استفاده از نسبت دانسیتهٔ نوری فیلم زیر فیلترها، محدوده انرژی پرتو



شکل ۸۵ - انواع دزیمتر فیلم بج و ترمولومینسانس

مشخص و امکان تبدیل دز فیلم به دز بافت فراهم می‌شود. فیلترهای فلزی برای تشخیص و تعیین مقدار اشعه ایکس و گاما به‌کار می‌روند. فیلم بج دارای منطقه‌ای بدون فیلتر فلزی یا پوشش پلاستیکی است که مستقیماً مورد تابش قرار می‌گیرد. این قسمت (پنجره باز) برای آشکارسازی پرتوهای بتای پرانرژی و متوسط است. معمولاً فیلم داخل بج هر ماه برای پردازش به مؤسسه طرف قرارداد ارسال و گزارش پرتوگیری تقریباً دو هفته بعد دریافت می‌شود. فیلم ظاهرشده، معمولاً نزد مؤسسه، نگهداری و امکان ثبت دائمی پرتوگیری فراهم می‌شود. گزارش دزیمتری شامل دز سطحی یعنی دز پوست و دز عمقی مربوط به پرتوهای نفوذی است. فیلم بج‌ها سبک، ارزان، کوچک و دارای کاربری آسان هستند. ولی امولسیون فیلم متأثر از گرما و رطوبت است و دزیمتری را مشکل یا غیرممکن می‌سازد. فیلم بج معمولاً روی نقطه‌ای از بدن نصب می‌شود که دارای بیشترین پرتوگیری یا حساسیت پرتویی است. اکثر رادیولوژیست‌ها یا فن‌آوران پرتوشناسی و پزشکی هسته‌ای

فیلم‌بج را روی کمربند یا لبه جیب پیراهن خود نصب می‌کنند. معمولاً هنگام فلورسکپی، فیلم‌بج در نزدیکی یقه و روی روپوش سربی نصب می‌شود تا دز تیروئید و عدسی چشم اندازه‌گیری شود، زیرا بخش اعظم بدن با روپوش سربی محافظت می‌شود. پرتو کاران باردار معمولاً برای اندازه‌گیری دز جنین فیلم بج دیگری در محل کمربند نصب می‌کنند (زیر روپوش سربی).

شکل ۸۶- محل جانمایی فیلم و فیلترهای فلزی داخل فیلم بج

با قرار دادن فیلم در این نوع بج، امکان دزیمتری پرتوهای ایکس و گاما ،پرتوهای بتا و نوترون حرارتی وجود دارد. معایب فیلم بج شامل شرایط محیطی اعم از گرما و فشار و رطوبت و گازهای شیمیایی باعث ایجاد تصویر پنهان روی فیلم می‌شود. همچنین دیر ظاهر کردن فیلم باعث از بین رفتن تصویر پنهان تولیدشده خواهند شد. محاسن فیلم بج شامل ارزان بودن، راحتی استفاده، رنج حساسیت بسیار بالا ، مشخص شدن نوع و انرژی پرتو تابیده است. مشخصات و کاربرد فیلتر تعدادی فیلتر فلزی و پلاستیکی برای تشخیص انرژی و نوع پرتو به شرح زیر است.

الف- پنجره : کلیه پرتوهایی که بتوانند از لفاف کاغذی فیلم عبور کنند از این پنجره نیز عبور کرده و به فیلم می‌رسند.

ب- فیلتر پلاستیک نازک (دانسیته ضخامت پلاستیک 50mg/cm2): این فیلتر فقط می‌تواند مانع عبور پرتوهای کم انرژی بتا کم انرژی شود و سایر پرتوها از آن عبور می‌کند.

ج- فیلتر پلاستیک ضخیم (دانسیته ضخامت 300mg/cm2) : این فیلتر پرتوهای ایکس کم انرژی (کمتر از 20keV) و تمام پرتوهای بتا اعم از کم انرژی یا انرژی بالا را جذب می‌کند.

د- فیلتر آلومینیوم : این فیلتر تمام پرتوهای بتا و پرتوهای ایکس با انرژی کمتر از 65keV را جذب می‌کند.

و- فیلتر قلع و سرب: از این فیلتر فقط پرتوهای ایکس با انرژی بیشتر از 65keV عبور می‌کند و حساسیت فیلم در زیر این فیلتر در انرژی بین 65keV تا 2MeV مستقل از انرژی پرتو ایکس یا گاما می‌باشد.

همواره فیلم درون بج طوری قرار داده شود که شماره فیلم از ناحیه پنجره نمایان شود. در غیر این صورت در اغلب موارد دزیمتری فیلم امکان‌پذیر نیست. همواره دقت شود که فیلترهای فلزی بج کامل و در محل صحیح نصب شده باشد. هنگام کار با پرتو فیلم بج باید روی لباس در محل سینه نصب شود. در صورت استفاده از روپوش سربی از قرار داده فیلم بج در روپوش سربی خودداری شود. همواره هنگام استفاده از فیلم بج به نکات زیر دقت شود:

۱. لفاف کاغذی فیلم پاره نشده باشد و فیلم بج در معرض مستقیم تابش آفتاب قرار نگیرد.
۲. در طول استفاده، فیلم داخل بج جابجا نشود.
۳. دزیمتری فیلم‌هایی که بدون فیلم کنترل همان دوره عودت داده شوند فاقد دقت لازم خواهد بود.
۴. در صورتی که با مواد پرتوزای باز کار می‌شود (نظیر مراکز پزشکی هسته‌ای) بج یا فیلم به مواد پرتوزا آلوده نشود.

۵. پرتو کاران از فیلم بج فقط در مکانی استفاده کنند که فیلم بج را برای آن‌ها تهیه کرده است.

۶. هنگام دریافت فیلم‌های نوبت جدید باید فیلم‌های استفاده‌شده در اسرع وقت همراه با فیلم کنترل مربوطه جهت بررسی نتیجه پرتوگیری به شرکت خدمات دزیمتری عودت داده شود. لازم است به هنگام عودت دادن فیلم‌ها دقت شود شماره نوبت کلیه فیلم‌ها یکسان باشد.

۷.

جدول۲۶- کاربرد نمونه‌هایی از فیلترها در فیلم بج جهت تشخیص کیفی پرتو

کاربرد برای اندازه‌گیری	جنس فیلتر
بتای کم انرژی	پنجره باز
تفکیک بتای کم انرژی از پر انرژی	50mg/cm^2 plastic
فوتون‌های کم انرژی	300mg/cm^2 plastic
نوترون حرارتی	0.7mmCd+0.3mmPb
فوتون با انرژی بین ۷۵Kev الی ۲ Mev	0.7mmSn+0.3mmPb

ب- دزیمتر ترمولومینسانس [1]

برخی مواد دارای این خاصیت هستند که چنانچه در معرض پرتوهای یون‌ساز قرار گیرند آن را جذب کرده و می‌توانند بخشی از آن را به‌صورت نور مریی ساطع کنند . در مورد مواد ترمولومینسانس این پدیده در اثر حرارت صورت می‌گیرد. دزیمترهای ترمولومینسانس، دزیمترهای فردی و محیطی بسیار دقیق هستند و البته در مقایسه با فیلم‌بج گران‌تر و در پرتوشناسی تشخیصی رواج کمتری دارند. بلور لیتیوم فلوراید (LiF) معمول‌ترین بلور دزیمتر TLD برای دزیمتری فردی است. محدوده پاسخ این دزیمتر ۱ mrem تا 10^5 rem است و قابلیت استفاده مکرر دارد. مزیت دیگر آن نزدیکی عدد اتمی

1- Thermoluminescent Dosimetry(TLD)

مؤثر آن با بافت‌های بدن است؛ بنابراین، در محدوده بزرگی از انرژی دز آن مشابه دز بافت است. در دزیمتر TLD ثبت دائمی دز نداریم زیرا برای خواندن دز نیاز به گرم کردن بلور و خروج انرژی جذبی آن است.

شکل ۸۷ - نمونه دزیمترهای ترمولومینسانس حلقه‌ای

از دزیمتر TLD به‌عنوان دزیمتر اندام در پزشکی هسته‌ای و دزیمتری سطح بدن در رادیوتراپی استفاده می‌شود؛ یک انگشتر حاوی بلور TLD بیشترین دز جذبی را در جریان آماده‌سازی و تجویز پرتو دارو ثبت می‌کند. برای دزیمتری در فواصل زمانی طولانی (مثلاً یک فصل) دزیمتر TLD می‌تواند گزینه مناسبی باشد. این دزیمترهای با نصب بر روی جیب کارگر برای دزیمتری تمام بدن و به‌صورت برای دزیمتری موضعی استفاده می‌شوند.

شکل۸۸- دستگاه قرائت دز بر اساس مکانیسم حرارت دهی

ج-دزیمتر جیبی یا قلمی[1]

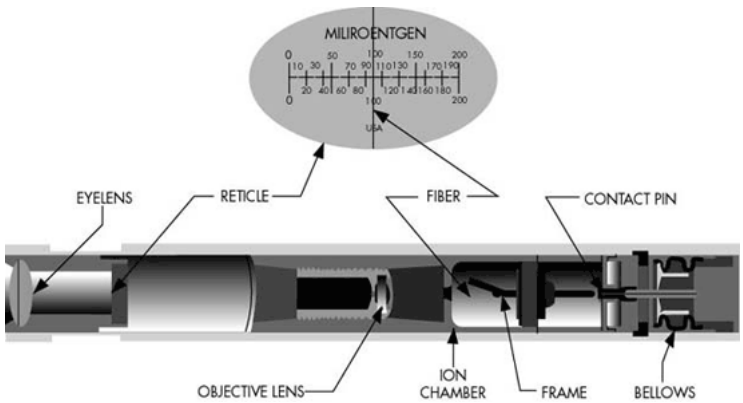
مهم‌ترین عیب دزیمترهای ترمولومینسانس و فیلم بج، عدم امکان قرائت هم‌زمان یا مستقیم آن‌ها است درحالی‌که در دزیمترهای جیبی، دز جذبی یا پرتو تابی به‌طور هم‌زمان قرائت می‌شود. نوع آنالوگ دزیمتر جیبی (اتاقک یون‌ساز جیبی) دارای یک رشته نازک کوارتز است که روی فریم متصل به الکترود مثبت، در اتاقک هوا معلق است. در اثر نیروی دافعه کولنی رشته نازک کوارتز از فریم دور می‌شود و حرکت آن توسط عدسی نوری که برحسب رنتگن یا میلی سیورت مدرج شده، قابل مشاهده است.

شکل ۸۹- دزیمتر جیبی نوع قرائت شونده Self-Reading

1- Pocket Dosimeter

در اثر برخورد پرتو، هوای داخل آشکارساز یونیزه می‌شود، بنابراین مقداری از بار مثبت هوای اتاقک، خنثی و نیروی دافعه کولنی آن کاهش می‌یابد در نتیجه، رشته کوارتز به فریم نزدیک می‌شود. این جابجایی به شکل حرکت خط نازکی روی صفحه مدرج قابل مشاهده است(شکل۲ مقابل). اتاقک‌های یونی جیبی نوعاً برای آشکارسازی فوتون‌های با انرژی بیش از ۲۰ keV به‌کار می‌روند. عمومی‌ترین مدل آن‌ها، از صفر تا ۲۰۰mR یا صفر تا ۵ R مدرج شده‌اند. این دزیمترها، کوچک (به اندازه خودکار) و دارای کاربری آسان هستند اما در اثر ضربه صحت و دقت آن کاهش می‌یابد. این دزیمترها دارای قابلیت استفاده مکررند ولی امکان ثبت دائمی دز ندارند.

پرتوگیری به‌صورت مقدار بار الکتریکی ناشی از پرتوهای یون‌ساز در واحد جرم هوا و برحسب کولمب بر کیلوگرم (C/kg) تعریف می‌شود. رنتگن واحد قدیمی C/kg $۱۰^{-۴}\times$ ۱ R = ۲٫۵۸ است. دز پرتوگیری در هوا قابل محاسبه است بطوری‌که هر رنتگن پرتوتابی منجر به ۰٫۸۷۶ rad دز جذبی در هوا می‌گردد و یا به‌طور تقریبی هر رنتگن معادل یک راد دز جذبی در هواست.



شکل ۹۰ - اجزاء دزیمتر جیبی به‌عنوان یک اتاق یون‌ساز کوچک

شکل ۹۱ - نمونه دزیمترهای جیبی نوع دیجیتال

حد مجاز مواجهه پرتوهای یون‌ساز

اساس حفاظت در برابر پرتو اجتناب از پرتوگیری غیرضروری می‌باشد. کمیته تعیین مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی عوامل فیزیکی مقادیر پیشنهادی کمسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها (ICRP)[1] را برای پرتوگیری شغلی پذیرفته است. پرتوهای یون‌ساز شامل ذرات باردار (مانند ذرات آلفا و بتا که از مواد رادیواکتیو ساطع می‌شوند و همچنین ذرات نوترون که از واکنش‌های هسته‌ای در راکتورها و شتاب‌دهنده‌ها تابش می‌شود) و پرتوهای الکترومغناطیس (مانند پرتو گاما تابش شده از مواد پرتوزا و پرتوهای ایکس تابش شده از شتاب‌دهنده‌های الکترون و همچنین دستگاه‌های مولد پرتو ایکس) با انرژی بیش از ۱۲/۴ الکترون ولت (ev) بوده که معادل طول موجی تقریباً کمتر از ۱۰۰ نانومتر (nm) می‌باشند. ICRP اصول حفاظت در برابر پرتو را به شرح زیر تعیین نموده است.

- توجیه کاربرد پرتوها: کاربرد پرتوها زمانی توجیه‌پذیر است که برتری مزایای استفاده از پرتوها در مقایسه با مضرات پرتوگیری افراد و یا جامعه با دلایل مشخص محرز باشد.

1- International Commission of Radiological Protection

- استفاده بهینه: هرگونه پرتوگیری باید به‌طور منطقی کاهش یابد یا به عبارتی تا حد ممکن باید مواجهه کمتر باشد (ALARA[1]) و شرایط اقتصادی و اجتماعی نیز منظور گردد.
- بر اساس اصل ALARA پرتوگیری شغلی افراد می‌بایست به مراتب کمتر از مقادیر مجاز تعیین شده باشد.

جدول ۲۷- مقادیر توصیه شده برای مواجهه با پرتوهای یون‌ساز

نوع پرتوگیری	مقدار توصیه شده
دوز مؤثر	
الف- در هر سال (فقط در طی یک سال)	۵۰ میلی سیورت
ب- میانگین دوره ۵ ساله	۲۰ میلی سیورت در سال
دوز معادل سالانه برای:	
الف : عدسی چشم	۱۵۰ میلی سیورت
ب : پوست دست‌ها و پاها	۵۰۰ میلی سیورت
دوز مؤثر تجمعی:	۱۰ میلی سیورت × سن(برحسب سال)
پرتوگیری جنین وقتی حاملگی مشخص شده باشد:	
دوز معادل ماهانه [1]	۰/۵ میلی سیورت
دوز سطحی(ناحیه تحتانی شکم بانوان)	۲ میلی سیورت
پرتوگیری داخلی	$\frac{۱}{۲۰}$ حد سالانه پرتوگیری داخلی[2] (ALI)
دختران رادون [3]	۴ ماه کاری (WLM) [4]

۱- مجموع پرتوگیری داخلی و خارجی به استثناء مقادیر ناشی از منابع طبیعی بر اساس توصیه‌های NCRP

2- Annual Limit on Intake
3- Radon Daughters
4- Working Level Mont

1- As Low As Reasonably Achievement

اصول حفاظت در مقابل پرتوهای یون‌ساز

هدف از حفاظت دهی در مقابل پرتوهای یون‌ساز پیشگیری از بروز اثرات قطعی و احتمالی پرتو برای کارکنان در مواجهه می‌باشد. معیارهای حفاظتی برای مقابله با راه یافتن مواد پرتوزا به درون بدن به نحوی طرح‌ریزی می‌گردند که یا راه‌های ورودی به بدن بسته شوند و یا انتشار مواد پرتوزا از منبع به طرف انسان قطع گردد. روش‌های عمده حفاظتی به شرح ذیل می‌باشد.

الف-کاهش زمان مواجهه

دز دریافتی ناشی از پرتو وابسته به مدت زمان مواجهه می‌باشد اصل کاهش مواجهه تا حد ممکن و منطقی قابل حصول[1] ALARA در راستای کاهش زمان مواجهه به‌عنوان یکی از اصول حفاظتی مهم است. بدین مفهوم که برای کاهش ریسک بروز اثرات سلامتی پرتوها بایستی میزان دوز دریافتی افراد به حداقل ممکن کاهش یابد

ب-ایجاد فاصله

افزایش بین منابع انتشاردهنده پرتوهای یون‌ساز و کارکنان می‌تواند به‌عنوان یک اصل حفاظتی مدنظر قرار گیرد. افزایش فاصله از منبع پرتوزا منجر به کاهش شدت پرتو دریافتی می‌گردد به‌طوری که می‌توان از قانون عکس مجذور فاصله برای پرتوهای ایکس و گاما استفاده نمود. بر اساس معیار فاصله در محل‌های پرتونگاری صنعتی نواحی اطراف به چهار بخش تقسیم می‌شود که در واقع حریم‌های ایمن محسوب می‌گردد:

۱- ناحیه ممنوعه با آهنگ دوز بیشتر از ۲ میلی سیورت بر ساعت

۲- ناحیه کنترل شده با آهنگ دوز بین ۷/۵ میکرو سیورت بر ساعت تا۲ میلی سیورت بر ساعت.

۳- ناحیه تحت نظارت با آهنگ دوز بین ۲ تا ۷/۵ میکرو سیورت بر ساعت

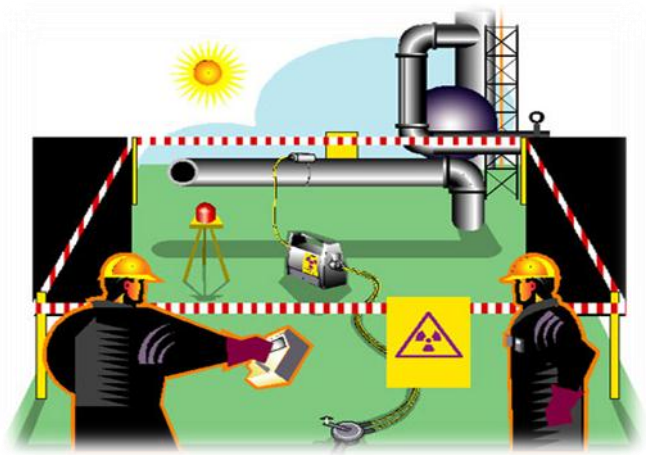
۴- ناحیه آزاد با آهنگ دوز کمتر از ۲ میکرو سیورت بر ساعت

1- As Low As Reasonably Achievable

مثال: میزان مواجهه با پرتو ایکس در فاصله ۶ متری از دستگاه مولد ۵۰۰ میلی رونتگن بر ساعت است در فاصله ۵۰ متری مقدار مواجهه را تعیین نمایید.

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad I_1 = 500 \quad d_1 = 6 \quad d_2 = 50$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2} = \frac{500}{\left(50/6\right)^2} = \frac{500}{(8.33)^2} = \frac{500}{69.4} = 7.2\ ^{mR}/_{hr}$$

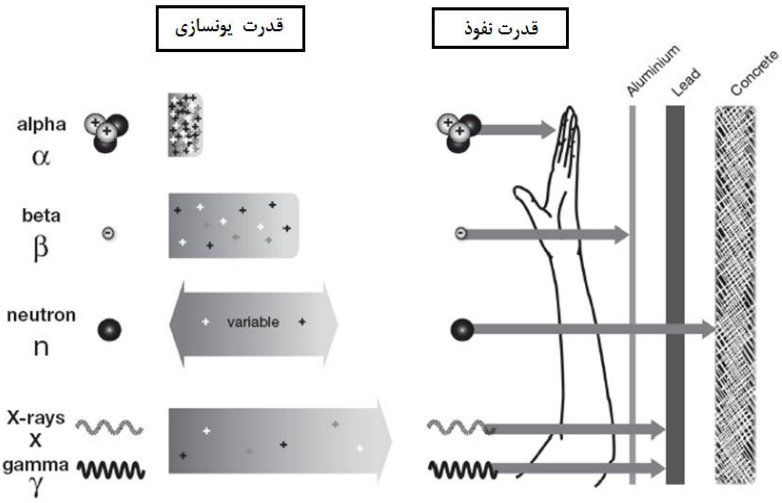


شکل ۹۲- رعایت فواصل یا حریم‌های ایمن در عملیات پرتونگاری صنعتی

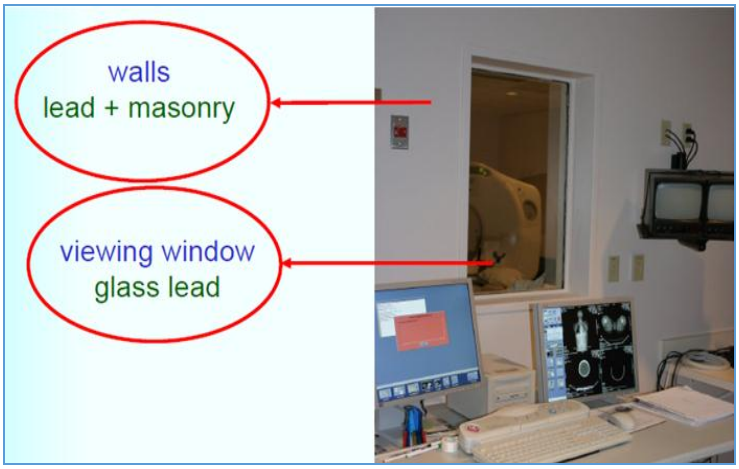
ج-حفاظ گذاری

در طراحی محیط‌های پرتو و اجرای طرح‌های ایزولاسیون چشمه‌های با توان محدود، معمولاً از ورق‌های سربی استفاده می‌شود. برای تهیه این ورق‌ها سرب با درجه خلوص بالای ۹۹٪ را ذوب و در حجم‌های دلخواه داخل قالب می‌ریزند. بعد از خنک شدن این بلوک‌های سربی آن‌ها را در دستگاه بسیار دقیق نورد قرار داده و با تکرار عملیات نورد ، سرب ورق با ضخامت مناسب را تولید می‌نمایند که به‌عنوان حفاظ سربی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل۹۳- ورق سربی روی دیوار بتونی در مراکز پر توکاری



شکل ۹۴- مقایسه انواع پرتوهای یون‌ساز از لحاظ قدرت نفوذ و یون‌سازی



شکل ۹۵- استفاده از سرب شفاف به‌عنوان شیشه مراکز پر توکاری

شکل ۹۶ - حفاظ سربی شفاف در مراکز پزشکی هسته‌ای در مواجهه با ذره بتا

در شرایطی که اجرای طرح حفاظت با استفاده از صفحات و ورق‌های سربی امکان‌پذیر نباشد یا دسترسی به ضخامت مناسب ورق سرب وجود نداشته باشد (نظیر محیط ذخیره‌سازی مواد پرتوزا ، تأسیساتی که به‌طور دائمی یا موقت با پرتوهای یون‌ساز پر انرژی در ارتباط هستند ، تجهیزات حمل‌ونقل مواد رادیواکتیو و تأسیسات اتمی) بهترین گزینه

جهت پیاده‌سازی طرح‌های ایزولاسیون ، استفاده از آجرهای سربی خواهد بود. علاوه بر این با استفاده از این آجرها می‌توان ضخامت نهایی لایه محافظ در سقف و دیوارها کاهش داد. تهیه این آجرها به‌صورت استاندارد با ریخته‌گری سرب با کیفیت بالا و خلوص ۹۹,۹٪ به‌طور معمول و با اضافه نمودن درصدی آنتیموان (به دلیل افزایش سختی آجرها) به‌طور خاص انجام می‌پذیرد.

شکل ۹۷- استفاده از آجرهای سربی جهت ایجاد محیط‌های ایزوله

استفاده از پاراوان سربی

پاراوان سربی یا دیوارک سربی در واقع یک دیواره سربی قابل جابجایی با ضخامت بین ۰/۵ mm تا ۱/۲ mm از سرب می‌باشد. معمولاً جهت محافظت در برابر پرتوهای منتشرشده از دستگاه‌ها در دندان‌پزشکی ، ماموگرافی دیجیتال و سایر دستگاه‌های رادیوگرافی با اختلاف پتانسیل الکتریکی پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل۹۸- استفاده از پاراوان‌های سربی جهت حفاظت پرتویی

د- وسایل حفاظت فردی

۱-عینک سربی

در مواردی که پرتوکار مستقیماً در برابر تابش‌های یونیزان قرار می‌گیرد، نظیر آنژیوگرافی به دلیل آنکه چشم در مقابل این تابش‌ها از حساسیت بسیار بالاتری نسبت به سایر بافت‌های بدن برخوردار می‌باشد، لازم است به نحوی مناسب از آن محافظت شود. از آنجا که استفاده از عینک سربی مناسب می‌تواند دوز جذبی در چشم‌ها را تا % ۹۸ کاهش دهد، در این موارد توصیه می‌شود پرتوکاران از عینک سربی استفاده نمایند. در طراحی عینک‌های سربی معمولاً از شیشه‌های سربی باکیفیت بسیار بالا دارای سرب با ضخامت معادل ۰/۵ mm یا ۰/۷۵ mmسرب استفاده می‌شود علاوه بر این سطوح شیشه سربی این عینک‌ها با موادی پوشش داده‌شده تا از مات یا کدر شدن آن‌ها جلوگیری شود. مدل‌های مختلف عینک سربی شامل عینک سربی با فریم معمولی، عینک سربی با فریم سبک پلاستیکی و دارای شیشه‌های سربی اطراف چشم و عینک سربی با محافظ سربی در اطراف چشم است.

شکل ۹۹- انواع عینک‌های با لنز سربی جهت حفاظت پرتویی

۲-لباس‌های حفاظتی

اولین و شناخته شده‌ترین ماده محافظ پرتو، سرب استاندارد است. روپوش‌های سرب استاندارد سنگین‌ترین روپوش‌های اشعه ایکس موجود هستند. دومین ماده محافظ پرتو ترکیبات سربی است، روپوش ترکیب سربی از ترکیبات سرب و سایر فلزات سبک جذب‌کننده اشعه تشکیل شده است که وزن آن در مقایسه با روپوش سرب استاندارد، بیش از ۲۵٪ کاهش می‌یابد. سومین و آخرین گزینه، ماده محافظ پرتو بدون سرب است که از سایر فلزات جذب‌کننده اشعه شامل آنتیموان، تنگستن، بیسموت و قلع ساخته شده است. روپوش‌های سربی از پودر سرب به همراه ترکیبات لاستیکی و پلاستیکی قابل‌انعطاف ساخته شده‌اند.

شکل ۱۰۰- انواع لباس و پیش بند سربی جهت حفاظت کارکنان

سه مدل رایج روپوش اشعه ایکس حفاظت یک طرفه، حفاظت دو طرفه و سریع پوش است. روپوش‌های اشعه ایکس حفاظت یک طرفه برای کسانی که فقط احتیاج به محافظت از جلو در هنگام عملکرد را دارند ایده‌آل است. روپوش‌های اشعه ایکسی که حفاظت دو طرفه را ارائه می‌دهند برای کسانی که حرکت چرخشی دارند و پشت خود را در مقابل منبع اشعه قرار می‌دهند طراحی شده است. روپوش اشعه ایکس که راحت در آورده می‌شود برای کسانی طراحی شده است که باید در طول جراحی روپوش اشعه ایکس را دربیاورند. علاوه بر این دستکش‌های سربی نیز جهت پیشگیری از مواجهه دست با پرتو یون‌ساز در برخی وظایف طراحی و ارائه شده است.

منابع:

1. American Conference Of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Threshold Limit Values For Chemical Substances And Physical Agents And Biological Exposure Indices. Cincinnati. 2014.
2. Barbara A. Plog, Fundamentals of Industrial Hygiene, Fifth Edition, National Safety Council, 2002.
3. C95.1, Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields, 3 Khz To 300 Ghz. Revised 2005.
4. C95.2, Standard for Radio-Frequency Energy and Current Flow Symbols. (1999).
5. C95.3, IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 KHz–300 GHz. 2008.
6. C95.3.1, Measurements & Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields With Respect To Human Exposure To Such Fields, 0 Hz To 100 KHz. 2010.
7. C95.4, Recommended Practice for Determining Safe Distances From Radio Frequency Transmitting Antennas When Using Electric Blasting Caps During Explosive Operations. 2002.
8. C95.6, Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 Khz. Defines Exposure Levels to Protect Against Adverse Effects in Humans From Exposure to Electric and Magnetic Fields at Frequencies from 0 To 3 Khz. 2002.
9. C95.7, Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs. 2006.
10. Herman Cember, Thomas E. Johnson, Introduction to Health Physics, Fourth Edition, The Mcgraw-Hill Companies, Inc. 2009.
11. IARC. 2002. Non-Ionizing Radiation. Part 1. Static and Extremely Low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. Lyon.2002.Vol. 80.
12. ICNIRP , Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic And Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) Health Physics 1998;74 (4):494-522.

13. ICNIRP , Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz – 100Khz) published in: Health Physics 2010; 99(6):818-836.
14. ICNIRP , Guidelines on limits of Exposure to Static Magnetic Fields, Health Physics 2009; 96(4):504-514.
15. IEC 62209-1, Human Exposure to Radio Frequency Fields from Hand-Held and Body Mounted Wireless Comminucation Devices-Human Models, Instrumentation, and Procedure – Part 1- Procedure to Determine the Specific Absoption Rate SAR for Hand Held Devices Used in Close Proximity to the Ear (Frequency Range of 300 MHz to 3 GHz).2005.
16. IEEE P1528, IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial Average Specific Absorption Rate SAR in the Human Head from Wireless Communication Devices: Measurement Techniques. 2003.
17. IEEE Std 1140-1994, IEEE Standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display Terminals (VDTS) From 5 Hz to 400 KHz.
18. IEEE Std 644-1994, IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines.
19. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Field. Health Phys. 2009; 96: 504-514.
20. Kitchen R, RF and Microwave Radiation Safety Handbook. 2th Ed: Butterworth Heinemann, 2001.
21. Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in The Frequency range from 3 KHz to 300 GHz, Environmental Health Directorate Health Protection Branch, Minister Of Health, Canada ,99-EHD-237.
22. NCRP Report No. 11 9, A Practical Guide to The Determination of Human Exposure to Radiofrequency Fields Recommendations of The National Council on Radiation Protection and Measurements , December 31, 1993.
23. NCRP, Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields Recommendations of the National Council on Radiation Protection And Measurements, Report No. 86, 1995.

24. Paolo Vecchia, Rüdiger Matthes, Gunde Ziegelberger, Exposure to High Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (100 KHz-300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP 16/2009.
25. Safety Code 6,Guidelines for the Measurement of Radio Frequency Fields at Frequencies from 3 kHz to 300 GHz, Health Canada , 2009.
26. Timothy Hitchcock R., Radio-frequency and Microwave Radiation, AIHA, Third Edition, 2005.
27. World Health Organization (WHO), Static Fields, Environmental Health Criteria 232 , Geneva. 2006.

Islamic Republic of Iran
Ministry of Health and and Medical Education
Environmental and Occupational Health Center
(EOHC)

OEL ASSESSMENT GUIDELINE
for

Radiation

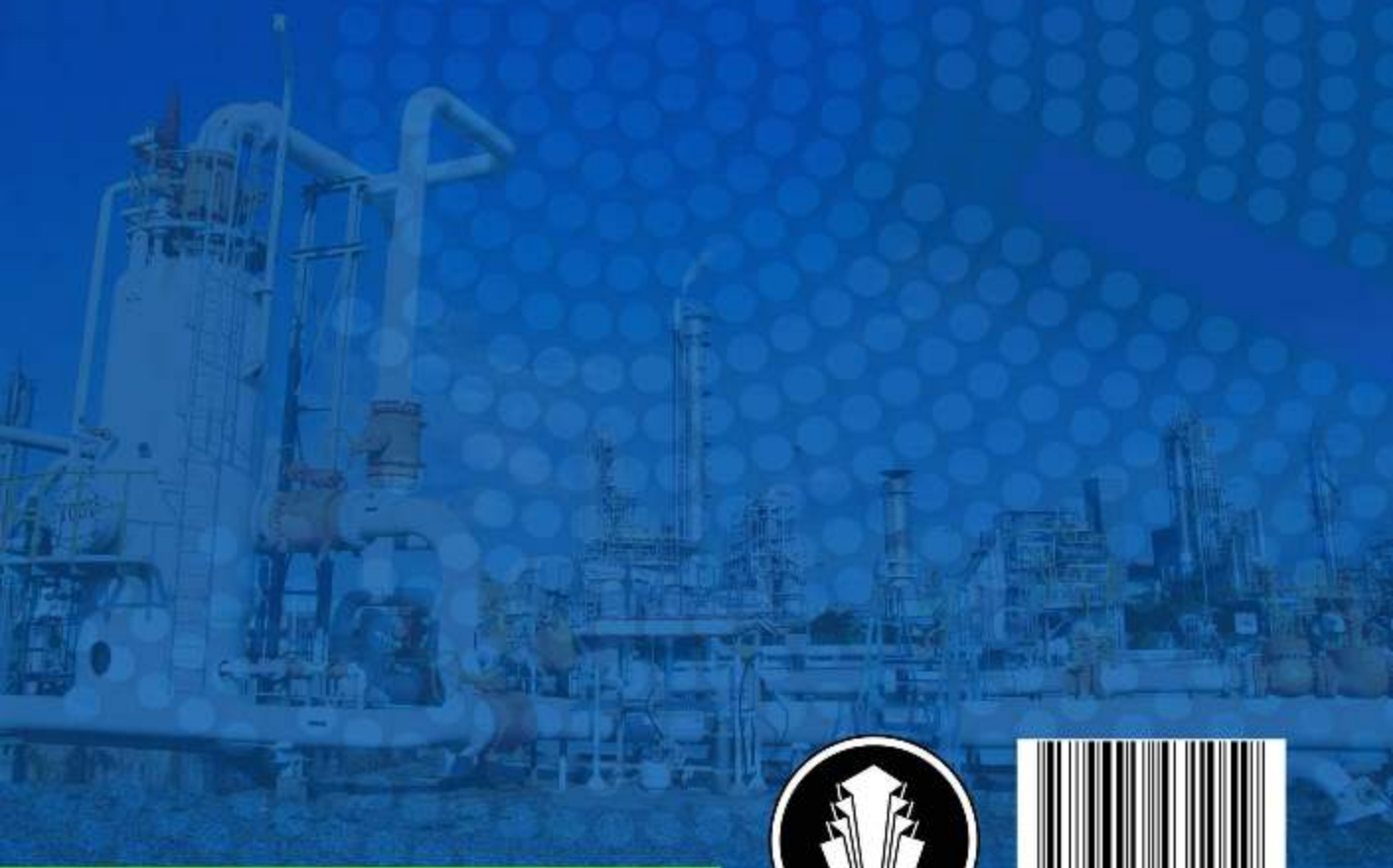
OEL-R-9506

2017

OEL ASSESSMENT GUIDELINE for

Radiations

OEL – R - 9506



9 789645 431059