INSO
20610
1st.Edition
2016

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۰۶۱۰
چاپ اول
۱۳۹۴

حدود پرتوگیری از تابش‌های لیزری در محدوده طول موج‌های ۱۸۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرون

Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 µm

ICS: 31.260

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود وکوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیر دولتی حاصل می‌شود . پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون‌های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود . بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1]، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/ یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« حدود پرتوگیری از تابش‌های لیزری در محدوده طول موج‌های ۱۸۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرون »

رئیس :	**سمت و/ یا نمایندگی**
کاردان، محمدرضا (دکترای مهندسی هسته‌ای)	عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
دبیر :	
فرودین، دلنواز (کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات)	عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
اعضاء :	
باباخانی، اسد (دکترای مکاترونیک)	عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
حسینی پناه، شهرام (دکترای مهندسی برق- مخابرات)	عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
مجد آبادی، عباس (دکترای لیزر)	رئیس پژوهشکده لیزر پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
ناظری، فیروزه (کارشناسی ارشد فیزیک)	کارشناس سازمان انرژی اتمی ایران

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ب
کمیسیون فنی تدوین استاندارد ج
پیش گفتار ه
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ اصطلاحات و تعاریف ۱
۳ ساختار حدود پرتوگیری ۸
۴ عوامل مؤثر بر حدود پرتوگیری ۸
۴-۱ اندازه تصویر ۸
۴-۲ مدت پرتوگیری ۱۰
۵ کمیت‌های مورد استفاده در تعیین مقادیر پرتوگیری ۱۱
۵-۱ اندازه تصویر روی شبکیه ۱۱
۵-۲ دریچه‌های محدود کننده برای تعیین متوسط پرتوگیری ۱۲
۵-۳ زاویه پذیرش ۱۴
۶ حدود پرتوگیری چشم ۱۵
۷ حدود پرتوگیری پوست ۲۷
۸ طول موج‌های چندگانه ۲۸
۹ پرتوگیری‌های تکرار شونده ۲۸
۱۰ پرتوگیری‌های مزمن ۲۹
۱۱ تدابیر احتیاطی ویژه ۲۹

پیش گفتار

استاندارد "حدود پرتوگیری از تابش‌های لیزری در محدوده طول موج‌های ۱۸۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرون" که پیش نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط سازمان انرژی اتمی ایران تهیه و تدوین شده است و در پانصدو بیستمین اجلاس کمیته ملی مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۹۴/۱۰/۱۳ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است :

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1000 μm, HEALTH PHYSICS 105(3): 271-295; 2013

حدود پرتوگیری از تابش‌های لیزری
در محدوده طول موج‌های ۱۸۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرون

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین حدود پرتوهای نوری لیزر در محدوده ۱۸۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ میکرون به‌منظور اعمال حفاظت کافی در برابر اثرات بیولوژیکی زیانبار و قطعی است که تاکنون برای این پرتوها شناخته شده‌است.

این استاندارد برای تمامی اشخاص حقیقی و حقوقی که به هر نحو از لیزر استفاده می‌کنند کاربرد دارد.

حدود پرتوهای نوری لیزر برای پرتوگیری شغلی و پرتوگیری عموم مردم، جداگانه درنظر گرفته نمی‌شود. این حدود برای پرتوگیری پزشکی تشخیصی اعمال می‌شود، ولی در پرتوگیری درمانی قابل اعمال نیست.

این استاندارد برای منابع نوری غیرلیزری کاربرد ندارد و برای منابع مزبور باید الزامات تعیین شده در "استاندارد پرتوهای غیریونساز- حدود پرتوگیری" با شماره مصوب ۸۵۶۷ رعایت شود.

۲ اصطلاحات و تعاریف

۲-۱
پرتوگیری

Exposure

عمل یا شرایط قراردادن یا قرارگرفتن در معرض تابش پرتو است.

۲-۲
تابندگی (L)

Radiance

تابندگی، توان تابشی از واحد سطح یک منبع تابش‌کننده در واحد زاویهٔ فضایی است. تابندگی معادل شار خارج شده از واحد سطح در واحد زاویهٔ فضایی است. تابندگی برای منبع نور تعریف می‌شود.

یادآوری- یکای تابندگی در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) *وات بر مترمربع بر استرادیان* ($Wm^{-2}\ sr^{-1}$) است.

۳-۲

چشمه بزرگ

Large source

چشمه گسترده‌ای که در محل چشم، زاویه دیدی بزرگتر از α_{max} ایجاد می‌کند، چشمه بزرگ درنظر گرفته می‌شود.

۴-۲

چشمه ظاهری

Apparent source

برای باریکه‌های گوسی[1] (TEM_{00}[2])، مرکز انحنای جبهه موجی[3] که به چشم برخورد می‌کند، مکان چشمه ظاهری است. برای باریکه‌های با واگرایی کم، مکان چشمه ظاهری در بی‌نهایت است.

۵-۲

چشمه گسترده

Extended source

چشمه‌ای که زاویه دیدی بزرگتر از α_{min} ایجاد کند، چشمه گسترده است. چشمه‌های گسترده، به چشمه‌های متوسط و چشمه‌های بزرگ تقسیم بندی می‌شوند.

۶-۲

چشمه متوسط

Intermediate source

چشمه گسترده‌ای که در محل چشم، زاویه دیدی بین α_{min} و α_{max} ایجاد می‌کند، چشمه متوسط درنظر گرفته می‌شود.

۷-۲

چشمه نقطه‌ای

Point source

چشمه نقطه‌ای چشمه‌ای است که زاویه دید کمتر از ۱٫۵ *میلی رادیان* (mrad)، α_{min}، ایجاد کند.

---

[1] Gaussian beam

[2] باریکه گوسی (TEM_{00}) باریکه لیزری است که شدت نور در مرکز مقطع آن بیشترین مقدار را دارد و با افزایش فاصله از مرکز باریکه شدت به صورت تابع گوسی کاهش می یابد.

[3] Wavefront

۸-۲

دز تابشی

Radiant exposure

انتگرال شدت تابش در مدت زمان پرتوگیری است و از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$H = \int_{t_1} E(t)\, dt \qquad (۱)$$

که در آن:

H دز تابشی بر حسب *ژول بر مترمربع* ($J\ m^{-2}$)؛

$E(t)$ شدت تابش در لحظه t برحسب *وات بر مترمربع* ($W\ m^{-2}$)؛ و

t_1 مدت زمان پرتوگیری بر حسب *ثانیه* (s) است.

چنانچه شدت تابش در مدت پرتوگیری ثابت باشد، دز تابشی از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$H = E\, t_1 \qquad (۲)$$

که در آن:

H دز تابشی بر حسب *ژول بر مترمربع* ($J\ m^{-2}$)؛

E شدت تابش بر حسب *وات بر متر مربع* ($W\ m^{-2}$) ؛ و

t_1 مدت زمان پرتوگیری بر حسب *ثانیه* (s) است.

۹-۲

دز تابشی قرنیه

Corneal radiant exposure

دز تابشی قرنیه از تقسیم کل انرژی عبورکننده ازدریچه ۷ میلی‌متری (مقدار مؤثر"انرژی کل ورودی به چشم") بر مساحت دریچه تعیین می‌شود.

۱۰-۲

دُز تابندگی

Radiance dose

انتگرال تابندگی در مدت زمان پرتوگیری است و از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$D = \int_{t_1} L(t)\, dt \qquad (۳)$$

که در آن:

D دز تابندگی بر حسب *ژول بر مترمربع بر استرادیان* ($J\ m^{-2}\ sr^{-1}$)؛
$L(t)$ تابندگی در لحظه t برحسب *وات بر مترمربع بر استرادیان* ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}$)؛ و
t_1 مدت زمان پرتوگیری بر حسب *ثانیه* (s) است.
چنانچه تابندگی در مدت پرتوگیری ثابت باشد، دز تابندگی از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$D = L\,t_1 \qquad (۴)$$

که در آن:
D دز تابندگی بر حسب *ژول بر مترمربع بر استرادیان* ($J\ m^{-2}\ sr^{-1}$)؛
L تابندگی برحسب *وات بر مترمربع بر استرادیان* ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}$)؛ و
t_1 مدت زمان پرتوگیری بر حسب *ثانیه* (s) است.

۱۱-۲
زاویه پذیرش
Acceptance angle

زاویه مسطحی برابر با نصف زاویه دریچه یک سیستم اپتیکی است.
یادآوری- زاویه پذیرش برحسب *رادیان* (rad) یا *میلی‌رادیان* (mrad) بیان می‌شود.

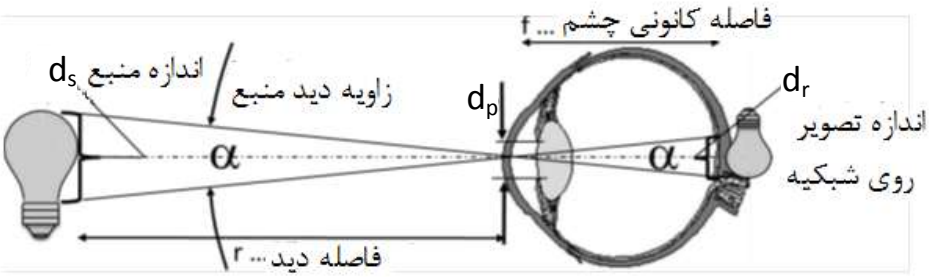
۱۲-۲
زاویه دید چشمه یا منبع (زاویه دید)
Angular subtense

زاویه دید چشمه یا منبع (اندازه منبع)[1]، α، بر حسب *رادیان* (rad) است و از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{d_S}{r} \qquad (۵)$$

که در آن:
r فاصلهٔ چشم از منبع نور و
d_S بُعد متوسط منبع نور[2] است.
در این معادله، r و d_S باید با یکای مشابه جایگزین شوند.
در شکل ۱ نحوه تعیین زاویه دید منبع مشخص شده‌است. در این شکل d_p قطر مردمک است.

[1] Source size
[2] Mean light source dimension



شکل ۱- نحوه تعیین زاویه دید منبع

اگر ناحیه تابش منبع نور، دایره‌ای باشد، d_s قطر دایره است. چنانچه ناحیه تابش دایره‌ای شکل نباشد، d_s مساوی میانگین حسابی کوتاه‌ترین و بلندترین ابعاد ناحیه تابش منبع است. در ادامه، زاویه دید منبع یا چشمه به اختصار زاویه دید خوانده می‌شود.

۱۳-۲

زاویه دید بیشینه

Maximum angular subtense

زاویه‌ای است که به ازای آن و مقادیر بیش‌تر از آن، آستانه دز مؤثر تابندگی/ دز مؤثر تابشی برای آسیب دیدن شبکیه به تغییرات زاویه دید، بستگی ندارد. مقادیر α_{max} در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مقادیر زاویه دید بیشینه در شرایط مختلف

t s	α_{max} rad
$t < ۶۲۵ \times ۱۰^{-۶}$	۰٫۰۰۵
$۶۲۵ \times ۱۰^{-۶} \leq t < ۰٫۲۵$	۰٫۲ $t^{۰٫۵}$
$t \geq ۰٫۲۵$	۰٫۱
توجه: مقدار t باید بر حسب ثانیه جایگزین شود تا مقدار α_{max} برحسب رادیان به‌دست آید.	

۱۴-۲

زاویه دید کمینه

Minimum angular subtense

کم‌ترین زاویه دید منبع است که چشم می‌تواند تفکیک کند. همچنین زاویه‌ای است که به ازای آن زاویه و مقادیر کم‌تر از آن، ابعاد تصویر تشکیل شده روی شبکیه کم‌ترین مقدار را خواهد داشت. زاویه‌ی دید $۱٫۵ \times ۱۰^{-۳}$ *رادیان* را زاویه دید کمینه می‌نامند ($\alpha_{min} = ۱٫۵ \times ۱۰^{-۳}$ rad = ۱٫۵ mrad).

۱۵-۲

زاویه فضایی (Ω)

Solid angle

زاویه فضاییِ رأس مخروطی است که از یک کره جدا شده است به گونه‌ای که رأس مخروط روی مرکز کره باشد. این زاویه مطابق با شکل ۲، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

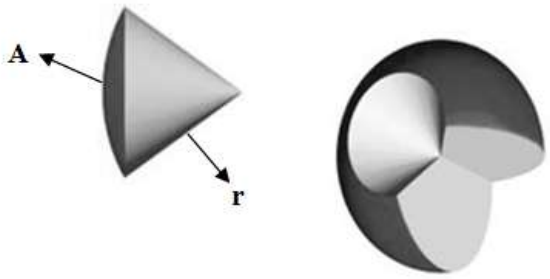
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \qquad (۶)$$

که در آن:

A مساحت قطاع کرویِ مخروط جدا شده بر حسب *متر مربع* (m^2) و

r شعاع کره بر حسب *متر* (m) است.

Ω، بر حسب *استرادیان* (sr) است و زاویه فضایی یک کره کامل برابر با 4π *استرادیان* می‌باشد.



شکل ۲- نحوه تعیین مقدار زاویه فضایی

۱۶-۲

شدت تابش

Irradiance

توان تابیده شده به واحد سطح در یک نقطه را شدت تابش (E) در آن نقطه می‌نامند. به عبارت دیگر، شدت تابش در یک نقطه نسبت توان تابیده‌شده به جزئی از یک سطح به مساحت آن جزء است.

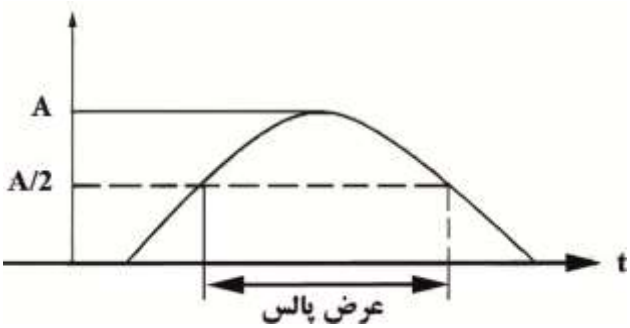
یادآوری- یکای شدت تابش در دستگاه بین‌المللی یکاها *وات بر متر مربع* ($W\ m^{-2}$) است.

۱۷-۲

عرض پالس

Pulse duration

مدت زمانی است که طول می‌کشد تا دامنه پالس از نصف مقدار پیک به مقدار پیک رسیده و دوباره به نصف آن کاهش یابد. در شکل ۳ عرض پالس نمایش داده شده‌است.



شکل ۳- نحوه تعیین عرض پالس

۱۸-۲

فرابنفش

Ultraviolet

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۱۸۰ الی ۴۰۰ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۱۹-۲

فروسرخ

Infrared

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۷۰۰ الی $۱۰^{۶}$ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۲۰-۲

فروسرخ دور (با طول موج بلند)

Far infrared

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۳۰۰۰ الی $۱۰^{۶}$ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۲۱-۲

فروسرخ میانی (با طول موج متوسط)

Mid infrared

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۱۴۰۰ الی ۳۰۰۰ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۲۲-۲

فروسرخ نزدیک (با طول موج کوتاه)

Near infrared

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۷۰۰ الی ۱۴۰۰ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۲۳-۲

میدان دید

Field of view

به تعریف "زاویه پذیرش" مندرج در بند ۳-۱۱ مراجعه شود.

۲۴-۲

نور مرئی

Visible light

پرتوهای الکترومغناطیسی هستند که طول موج آن‌ها در محدوده ۴۰۰ الی ۷۰۰ *نانومتر* (nm) قرار دارد.

۳ ساختار حدود پرتوگیری

حدود پرتوگیری به طول موج، مدت[1] پرتوگیری (عرض پالس)، و در بعضی موارد قطر شدت تابش[2] (اندازه تصویر) بستگی دارد.

حد پرتوگیری به‌عنوان تابعی از طول موج، $EL(\lambda)$، طبق معادله ۷، به‌صورت حاصل‌ضرب حد پرتوگیری برای طول موجی که حد پرتوگیری کم‌ترین مقدار را دارد، EL_{min}، و ضریب تصحیح طیفی بیان می‌شود.

$$EL(\lambda) = EL_{min} \times \text{ضریب تصحیح طیفی} \qquad (۷)$$

مقدار کم‌ترین حد پرتوگیری، EL_{min}، و ضریب تصحیح طیفی به بافتی که پرتوگیری می‌کند (پوست یا چشم) وابسته است و در بند "حدود پرتوگیری" (بندهای ۶ و ۷) ارائه خواهد شد.

۴ عوامل مؤثر بر حدود پرتوگیری

۴-۱ اندازه تصویر

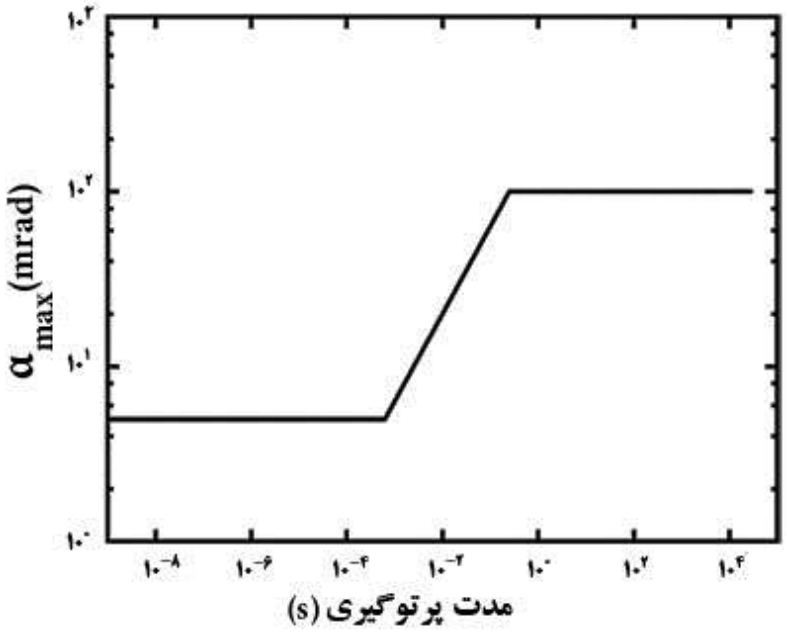
عملکرد بیشترِ چشمه‌های لیزری نظیر چشمه‌های نقطه‌ای است، یعنی روی شبکیه تصویر گسترده ایجاد نمی‌کنند. هرچند در موارد کمی مثلا در هنگام مشاهده انعکاس پخشی[3]، آرایه‌هایی از دیودهای لیزری، یا چشمه لیزری پخشی[4]، شرایط چشمه گسترده غالب می‌شود.

به‌منظور تعیین حدود پرتوگیری، چشمه‌های گسترده را باید در دو گروه *چشمه‌های متوسط* و *چشمه‌های بزرگ* قرار داد. آستانه‌های آسیب شبکیه برای چشمه‌های متوسط به اندازه تصویر بستگی دارد. هنگامی که اندازه

[1] Duration
[2] Irradiance
[3] Diffuse reflection
[4] Diffused laser source

تصویر به اندازه کافی بزرگ باشد، وابستگی به اندازه تصویر اندک است. این موضوع با زاویه دید بیشینه، α_{max}، مرتبط است.

برای چشمه‌های متوسط، آستانه آسیب شبکیه در اثر پخش شعاعی گرما[1]، تابعی از اندازه تصویر روی شبکیه است. اگر قطر تصویر روی شبکیه بزرگتر از یک مقدار بحرانی که منجر به بروز α_{max} می‌گردد شود، پخش شعاعی گرما، در صورتی که به‌صورت دز تابشی شبکیه داده شود، بر آستانه آسیب تأثیر نمی‌گذارد. از آنجا که گستردگی پخش شعاعی گرما به زمان بستگی دارد، α_{max} نیز به عرض پالس بستگی دارد و از مقدار ۵ میلی‌رادیان (°۰٫۳) برای پالس‌های کوتاه تا ۱۰۰ میلی‌رادیان (°۵٫۷) برای پرتوگیری‌های موج پیوسته، CW، افزایش می‌یابد (به شکل ۴ و جدول ۱ مراجعه شود).



شکل۴-نمودار بستگی زاویه بحرانی ایجاد شده برای چشمه‌های متوسط، α_{max}، به مدت پرتوگیری

ضریب تصحیح، C_E (جدول۵) برای شرایط مشاهده چشمه‌های گسترده به کار می‌رود، مثلاً برای انعکاس پخشی در محدوده ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر که نشان می‌دهد چنانچه زاویه دید چشمه، در چشم مشاهده‌کننده، از α_{min} بزرگتر باشد، حدود پرتوگیری می‌توانند افزایش یابند (α_{min} برابر با ۱٫۵ میلی‌رادیان است).

برای چشمه‌های بزرگ، درصورتی که برای تعیین سطح پرتوگیری میدان دیدِ $\alpha_{max} = \gamma$ به‌کار رود، ضریب تصحیح C_E معادل با $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ خواهد شد. برای یک چشمه همگن[2] و دایره‌ای شکل، سطح پرتوگیری می‌تواند با یک میدان دید باز[1] تعیین شود، و در این صورت ضریب تصحیح، C_E، با معادله ۸ بیان می‌شود.

[1] Radial heat flow
[2] Homogeneous

$$C_E = \frac{\alpha^{۲}}{\alpha_{\min}\ \alpha_{\max}} \qquad (۸)$$

یادآوری - چشمه‌های غیردایره‌ای

برای یک چشمه غیردایره‌ای، α برابر با میانگین عددی دو زاویه α برای کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین بُعد سطح مقطع تصویر است. در هنگام تعیین میانگین حسابی، هر دو بعد باید محدود به α_{min} و α_{max} باشد.

۲-۴ مدت پرتوگیری

برای تعیین حد پرتوگیری با یک لیزر خاص لازم است که طول موج لیزر و مدت پرتوگیری معلوم باشد. برای پرتوگیری از یک تک پالس، این مدت زمان برابر با عرض پالس در نظر گرفته می‌شود (به شکل ۳ مراجعه شود). ولی در شرایط پرتوگیری پی در پی یا طولانی، از معیارهای زیر استفاده می‌شود.

برای پرتوگیری از یک تک پالس لیزر، مدت پرتوگیری برابر با عرض یک پالس، t، است که در بالا تعریف شده است. در مورد تمامی حدود پرتوگیری برای پوست، و همچنین برای چشم در طول موج‌های نامرئی یا به سختی قابل دیدن، کم‌تر از ۴۰۰ nm یا بیش‌تر از ۷۰۰ nm، مدت پرتوگیری برای لیزرهای موج پیوسته با حداکثر زمان پیش‌بینی شده برای قرار گرفتن در معرض پرتو مستقیم، T_{max}، برابراست. در مورد پرتوگیری چشم از هر گونه لیزر پیوسته، مدت پرتوگیری با حداکثر مدت زمان پیش بینی شده برای نگاه کردن مستقیم به باریکه برابر است. اما اگر هدف نگاه کردن به باریکه لیزر مرئی با طول موج ۴۰۰ الی ۷۰۰ نانومتر نیست، مدت پرتوگیری ۰٫۲۵ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در مورد پرتوگیری‌های چشم در ناحیه فروسرخ نزدیک، ۷۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر، در نظر گرفتن حداکثر زمان پرتوگیری برابر با ۱۰ s معیاری به اندازه کافی سختگیرانه برای شرایط دید غیرعمدی است. در این شرایط، حرکات چشم به‌طور طبیعی پرتوگیری را محدود می‌کند و در نتیجه در نظر گرفتن مدت زمان‌های طولانی‌تر از ۱۰ s به‌جز در شرایط غیرعادی ضرورت ندارد. در کاربردهای خاص، مانند پرتوگیری عمدی از تجهیزات پزشکی به منظور تشخیص، پرتوگیری‌های طولانی‌تر نیز ممکن است اعمال شود.

به دلیل موجود نبودن اطلاعات در مورد آستانه بیولوژیکی آسیب شبکیه برای پالس‌هایی که عرض آن‌ها کم‌تر از ۱۰۰ fs است، پیشنهاد شده است که در هر طول موج مورد نظر، حداکثر شدت تابش به حد پرتوگیری برای پالس‌های با عرض ۱۰۰ fs، محدود شود. در حال حاضر، به‌علت موجود نبودن اطلاعات بیولوژیکی، حدود پرتوگیری برای پوست برای مدت زمان پرتوگیری کم‌تر از یک نانوثانیه ارائه نشده‌است. اگرچه به عنوان یک پیشنهاد محتاطانه اولیه، می‌توان پرتوگیری را به ۱۰٪ حدود پرتوگیری مربوط به یک نانوثانیه محدود نمود. همچنین، حدود پرتوگیری برای چشم برای طول موج‌های کم‌تر از ۴۰۰ nm و بیش‌تر از ۱۴۰۰ nm برای پالس‌های با عرض کم‌تر از یک نانوثانیه، ارائه نشده‌است و مشابه با آنچه برای پوست گفته شد، پیشنهاد محتاطانه اولیه محدود کردن پرتوگیری به ۱۰٪ حدود پرتوگیری مربوط به یک نانوثانیه است.

---

[1] Openfield of view

C_p، ضریب تصحیحی است که برای منظور کردن جمع‌پذیری پالس‌های چندگانه برای آسیب‌های گرمایی به کار می‌رود؛ به بند "پرتوگیری‌های تکرار شونده" (بند ۹) مراجعه شود.

۵ کمیت‌های مورد استفاده در تعیین مقادیر پرتوگیری

۵-۱ اندازه تصویر روی شبکیه

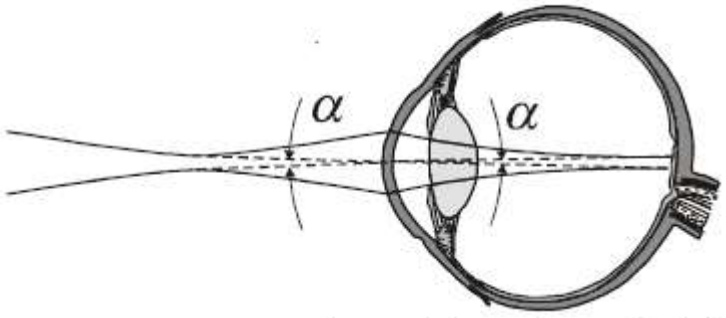
در محدوده ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر، یعنی "ناحیه طول موج‌های خطرناک برای شبکیه"، حد پرتوگیری چشمی برای آسیب ناشی از گرمای شبکیه به زاویه دید چشمه ظاهری، α، بستگی دارد.

α زاویه صفحه‌ای است که توسط چشمه ظاهری در موقعیت معین چشم در مسیر باریکه ایجاد می‌شود (به شکل ۱ مراجعه شود). زاویه دید چشمه ظاهری زاویه‌ای است که توسط کوچکترین تصویر تشکیل شده روی شبکیه، با در نظر گرفتن تطابق[1] چشم می‌تواند ایجاد شود (دامنه تطابق در ایمنی لیزر از ۱۰ سانتی‌متر تا بی‌نهایت فرض می‌شود).

برای باریکه‌های گوسی (TEM_{00})، مرکز انحنای جبهه موجی[2] که به چشم برخورد می‌کند مکان چشمه ظاهری است. در این مکان، قطر باریکه می‌تواند به‌عنوان قطر چشمه در نظر گرفته شود که زاویه α را برای مکان پرتوگیری چشم در باریکه تعیین می‌کند. از آنجا که در نقاط مختلف باریکه، انحنای جبهه موج متفاوت است، مکان چشمه ظاهری نیز تغییر می‌کند. بنابراین نمی‌توان برای یک باریکه معین، چشمه ظاهری مشخصی را تعیین کرد، زیرا موقعیت و قطر چشمه ظاهری می‌تواند به مکان تعیین آن بستگی داشته باشد.

برای باریکه‌های دارای واگرایی کم، مکان چشمه ظاهری در بی‌نهایت و α برابر با واگرایی باریکه است. هرچند که زاویه α نباید با واگرایی باریکه اشتباه شود. زاویه دید چشمه ظاهری برای باریکه لیزری که به چشم برخورد می‌کند هیچوقت نمی‌تواند بزرگتر از واگرایی باریکه لیزر باشد، اما می‌تواند کوچکتر باشد (به شکل ۵ مراجعه شود). در علم اپتیک تمایز بین یک چشمه *نقطه‌ای* و چشمه *گسترده* مرسوم است. در متن‌های مرتبط با زمینه ایمنی لیزر، چشمه‌های گسترده به چشمه‌*های گسترده متوسط*[3] و چشمه‌*های گسترده بزرگ*[4] تقسیم می‌شوند که به اختصار چشمه‌های بزرگ و چشمه‌های متوسط خوانده می‌شوند.

[1] Accommodation
[2] Wave front
[3] Intermediate extended sources
[4] Large extended sources



شکل۵-پارامتر α برای یک موقعیت مکانی معین چشم در باریکه، زاویه‌ای که چشمه ظاهری می‌سازد به‌نحوی که با تطابق چشمی، مقطع باریکه روی شبکیه به کوچکترین مقدار ممکن برسد. این شکل برای تطابق با فاصله‌ای بسیار نزدیک به چشم و با این فرض که چشم با هوا پر شده ساده‌سازی شده است.

۵-۲ دریچه‌های محدود کننده برای تعیین مقدار متوسط پرتوگیری

حدود پرتوگیری براساس شدت تابش (یا دُز تابشی) بیان می‌شود. بسته به شکل فضایی باریکه، مقدار شدت تابش اندازه‌گیری شده ممکن است به قطر دریچه محدود کننده بستگی داشته باشد.

برای شبکیه، با توجه به قطر یک مردمک باز، قطر دریچه برای متوسط‌گیری برابر با ۷ mm تعیین شده‌است. هنگام استفاده از دریچه‌های کوچک مشکلاتی روی می‌دهد؛ از جمله: زمان بیشتری برای ارزیابی پرتوگیری لازم است، دستگاه اندازه‌گیری باید از حساسیت بالاتری برخوردار باشد، مسائل کالیبراسیون منجر به عدم قطعیت‌های بالقوه می‌شود و محاسبات می‌تواند دشوارتر باشد.

به‌منظور توضیح دادن دریچه‌های متوسط‌گیری، نقاط داغ کوچک تابشی در اثر تمرکز نور که در باریکه پهن‌تری قرار دارند باید تشخیص داده شوند. با درنظر گرفتن آن‌ها، دریچه‌های متوسط‌گیری که در زیر توضیح داده می‌شوند، در صورتی که قطر باریکه از دریچه متوسط گیری خیلی کوچک‌تر نباشد، همچنان برای شرایط نقاط داغ کوچک تابش نیز معتبر هستند.

در صورت پراکنده شدن نور در بافت از نظر بیولوژیکی، دریچه یک میلی‌متری انتخاب می‌شود. بنابراین در شرایط پرتوگیری پالسی قرنیه و زجاجیه با پرتوهای فرابنفش و فروسرخ با طول موج‌های بیش‌تر از ۱٫۴ µm، دریچه یک میلی‌متری پیشنهاد می‌شود.

دریچه متوسط‌گیری ۳٫۵ mm برای هر دو حالت پرتوگیری پالسی و پیوسته پوست که پراکندگی نور بیش‌تر روی می‌دهد، توجیه‌پذیر به نظر می‌رسد. به‌علاوه، برای پرتوگیری پیوسته چشم، و همچنین پوست، جریان گرما، حرکت‌های بدن، و پراکندگی سبب می‌شود که وقوع هر گونه اثر مخرب ناشی از "نقاط داغ" کوچک‌تر از ۳٫۵ mm، منتفی شود. برای پرتوگیری پیوسته قرنیه و زجاجیه با پرتوهای فرابنفش با طول موج‌های کم‌تر از ۴۰۰ نانومتر نیز شرایط به همان‌گونه است. علاوه بر این، دو عامل که در مورد تغییرات شدت تابش باریکه در یک محل در نظر گرفته می‌شوند، یعنی "نقاط داغ" ناشی از تحریک هوا توسط جرقه و مد خاص در لیزرهای

دارای مدهای متعدد، به‌ندرت در شدت‌های تابش موضعی بسیار زیاد در سطوح با قطر کم‌تر از ۳٫۵ mm منظور می‌شوند.

مشکل دیگر در ناحیه فروسرخ دور در طول موج‌های بالاتر از ۱۰۰ µm بروز می‌کند، به این صورت که با دریچه یک میلی‌متری پراش[1] قابل توجهی ایجاد می‌شود و کالیبراسیون دشوار می‌گردد. خوشبختانه، به دلایل فیزیکی، نقاط داغ در طول موج‌های بلند وسیع‌تر می‌شوند، و لذا در طول موج‌های بیش‌تر از ۱۰۰ µm، قطر دریچه‌ها حدود ۱۱ mm یا مساحت آن‌ها تقریبا یک سانتی‌متر مربع تعیین می‌شود.

قطر دریچه‌های محدود کننده مورد استفاده در تعیین پرتوگیری متوسط به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- قطر دریچه‌های محدود کننده مورد استفاده در تعیین پرتوگیری متوسط

محدوده طول موج nm	مدت پرتوگیری، t s	قطر دریچه‌های محدودکننده براساس ناحیه پرتوگیری	
		چشم mm	پوست mm
$۱۸۰ \le \lambda < ۴۰۰$	۱٫۰ ns - ۰٫۳۵ s	۱٫۰	۳٫۵
	۰٫۳۵ ns - ۱۰ s	$۱٫۵\, t^{-۰٫۳۷۵}$	۳٫۵
	۱۰ s - ۳۰ ks	۳٫۵	۳٫۵
$۴۰۰ \le \lambda < ۱۴۰۰$	۱ ns - ۳۰ ks	۷٫۰	۳٫۵
$۱۴۰۰ \le \lambda < ۱۰^{۵}$	۱٫۰ ns - ۰٫۳۵ s	۱٫۰	۳٫۵
	۰٫۳۵ ns - ۱۰ s	$۱٫۵\, t^{-۰٫۳۷۵}$	۳٫۵
	۱۰ s - ۳۰ ks	۳٫۵	۳٫۵
$۱۰^{۵} \le \lambda < ۱۰^{۶}$	۱٫۰ ns - ۳۰ ks	۱۱	۱۱

برای قطر مردمک کم‌تر از ۷ mm به علت کاهش انرژی وارد شده به چشم، هیچگونه تغییر اصلاحی در حدود پرتوگیری مجاز نیست.

برای باریکه‌هایی با قطر کم‌تر از یک میلی‌متر که به قرنیه یا پوست برخورد می‌کنند، عاقلانه است که مقدار واقعی شدت تابش تعیین شود. در حالتی که قطر باریکه به نحو قابل‌توجهی از دریچه متوسط‌گیری کم‌تر است، نمی‌توان از این واقعیت که با رسیدن مقدار شدت تابش متوسط به حد پرتوگیری، اثرات گرمایی کم‌تری ظاهر می‌شود، چشم‌پوشی کرد. در شرایطی که قطر باریکه از یک میلی‌متر کم‌تر است، به منظور پیشگیری از آسیب دیدن پوست، لازم است که مقدار واقعی شدت تابش تعیین شود و با حد پرتوگیری مقایسه شود. با استفاده از

[1] Diffraction

تقریب گوسی، فاصله بین دو نقطه در طرفین محور باریکه که در آن نقاط شدت تابش ۱/e برابر یا ۰٫۳۷ مقدار بیشینه شدت تابش است به عنوان قطر باریکه در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵ زاویه پذیرش

در مورد حدود پرتوگیری برای شبکیه، برای منابع گسترده، مقدار زاویه پذیرشِ رادیومتر (وسیله اندازه‌گیری)، روی مقدار پرتوگیری تأثیرگذار است.

برای منابع نقطه‌ای، زاویه پذیرشِ گیرنده، γ، حداقل باید برابر با α_{min} باشد. برای منابع گسترده باید بین کاربردهای حدود فتوشیمیایی و فتوگرمایی تفاوت قائل شد.

زمانی که حدود پرتوگیری برای منابع بزرگِ یکنواخت بر اساس تابندگی بیان می‌شود، هم برای حدود فتوشیمیایی و هم برای حدود گرمایی، زاویه پذیرش می‌تواند به بزرگی α باشد. مقادیر مجاز برای زاویه پذیرش در جدول ۳ ارائه شده‌است. سایر موارد در بندهای بعدی به تفکیک برای حدود گرمایی و حدود فتوشیمیایی بررسی خواهد شد.

جدول۳- مقادیر زاویه پذیرش

نوع منبع	نوع اثر	کمیت مورد بررسی	زمان پرتوگیری	زاویه پذیرش،γ [a] mrad
نقطه‌ای	گرمایی فتوشیمیایی	شدت تابش تابندگی	تمامی مقادیر	$\geq \alpha_{min}$ [b]
بزرگِ یکنواخت	گرمایی فتوشیمیایی	تابندگی	تمامی مقادیر	α
متوسطِ یکنواخت	فتوگرمایی	شدت تابش	تمامی مقادیر	$\geq \alpha$
متوسط غیرِیکنواخت	فتوگرمایی	شدت تابش	تمامی مقادیر	به اندازه کافی کوچک $\alpha_{min} \leq \gamma \leq \alpha_{max}$
$\alpha \leq$ ۱۱ mrad	فتوشیمیایی	شدت تابش	۱۰ s - ۱۰ ks	$\geq \alpha$
$\alpha >$ ۱۱ mrad	فتوشیمیایی	شدت تابش	۱۰ s - ۱۰۰ s	۱۱
			۱۰۰ s - ۱۰ ks	$۱٫۱ t^{۰٫۵}$
			۱۰ ks - ۳۰ ks	۱۱۰

[a] در ادامه متن، زاویه پذیرش برای اثر فتوشیمیایی با نماد γ_{ph} و برای اثر گرمایی با نماد γ_{Th} نشان داده شده‌است.
[b] منظور از α، زاویه دید منبع نور است.

۵-۳-۱ حدود گرمایی

به منظور مقایسه تابش چشمه متوسط یکنواخت و حدود فتوگرمایی بر حسب شدت تابش، زاویه پذیرش باید حداقل به بزرگی α باشد.

چنانچه منبع از نوع غیریکنواخت یعنی دارای نقاط داغ باشد، زاویه پذیرش باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود که نقاط داغ را بتوان ارزیابی کرد، اما نباید از ۱٫۵ میلی‌رادیان کم‌تر و از α_{max} بزرگ‌تر باشد. برای هر نقطه داغ یا هر قسمت غیرهمگن منبع، که با زاویه پذیرش γ ارزیابی شده‌است، تابش باید با حد مرتبط با یک منبع فرعی به ابعادی که زاویه دید آن (α) با زاویه پذیرش (γ) برابر باشد، مقایسه شود. اندازه و محل زاویه پذیرش γ برای یک منبع معلوم باید طوری تنظیم شود که محدود کننده‌ترین تحلیل صورت گیرد (یعنی نسبت مقدار انرژی تعیین شده با زاویه γ روی α حداکثر باشد).

۵-۳-۲ حدود فتوشیمیایی

برای مقایسه تابش منابع با زاویه دید کم‌تر از ۱۱ میلی‌رادیان با حدود فتوشیمیایی، بر حسب شدت تابش، و برای تمامی دوره‌های پرتوگیری (۱۰ s - ۳۰ ks) می‌توان از هر زاویه پذیرشی که بزرگ‌تر از زاویه دید منبع باشد، استفاده کرد. برای منابع با زاویه دید بزرگ‌تر از ۱۱ میلی‌رادیان و زمان پرتوگیری بین ۱۰ و ۱۰۰ ثانیه، از زاویه پذیرش γ معادل با γ_{ph} = ۱۱ mrad استفاده می‌شود. برای زمان‌های پرتوگیری بین ۱۰۰ s و ۱۰ ks، زاویه پذیرش، γ، به‌طور خطی با زمان افزایش می‌یابد و زاویه راس مخروطی را تعیین می‌کند که شدت تابش در فضای داخل آن مخروط اندازه‌گیری می‌شود. به‌خصوص در شرایطی که مدت زمان پرتوگیری بین ۱۰۰ s و ۱۰ks است و اندازه منبع $\alpha > \gamma_{ph}$ است، برای مقایسه نتیجه با حد پرتوگیری برحسب شدت تابش، باید از زاویه پذیرش $\gamma_{ph} = ۱٫۱ \times t^{-0.5}$mrad استفاده کرد. برای منابعی که زاویه دید آن‌ها از ۱۱ میلی‌رادیان بزرگ‌تر است و مدت زمان پرتوگیری بین ۱۰ ks و ۳۰ ks است، زاویه پذیرش برای حدودی که برحسب شدت تابش بیان شده‌است باید ۱۱۰ میلی‌رادیان باشد. زاویه رأس مخروط برابر با ۱۱ یا ۱۱۰ میلی‌رادیان به ترتیب تقریبا با زاویه فضایی برابر با $۱۰^{-۴}$ یا $۱۰^{-۲}$ استرادیان معادل است.

۶ حدود پرتوگیری چشم

حدهای پرتوگیری چشم همواره در ارتباط با صفحه قرنیه‌ای عمود بر محور اپتیکی چشم مشخص می‌شوند. برای آسیب‌های شبکیه ناشی از گرما و ناشی از آثار فتوشیمیایی حدود پرتوگیری جداگانه‌ای برحسب طول موج، مدت عرض پالس، و اندازه تصاویر مختلف تعیین می‌شود. پرتوگیری از تابش لیزر مرئی باید کم‌تر از هر دو حد باشد.

حد فتوشیمیایی شبکیه، EL_B، در طول موج معین، λ، عبارت است از حاصلضرب کمترین حد پرتوگیری برای آسیب فتوشیمیایی، $EL_{B:min}$، در ضریب تصحیح طیفی برای آسیب فتوشیمیایی، $C_B(\lambda)$ (به شکل ۶ مراجعه شود):

$$EL_B = EL_{B\cdot min}\, C_B(\lambda) \qquad (۹)$$

ضریب تصحیح، C_B (به شکل ۶ و جدول ۴ مراجعه شود) که برای $۴۰۰\ \text{nm} < \lambda \leq ۶۰۰\ \text{nm}$ تعریف شده است، با نحوه وابستگی آسیب شبکیه ناشی از اثرات فتوشیمیایی به طول موج مرتبط است.

در محدوده ۷۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر برای آسیب‌های ناشی از گرمای شبکیه توسط چشمه نقطه‌ای، حد پرتوگیری، EL_{Th}، عبارت است از حاصل‌ضرب کمترین حد پرتوگیری $EL_{Th:min}$ در آن محدوده (که حد پرتوگیری برای محدوده طول موج مرئی است) در ضریب تصحیح ترکیبی[1]، $C_A(\lambda)\ C_C(\lambda)$:

$$EL_{Th} = EL_{Th:min}\, C_A(\lambda)\, C_C(\lambda) \qquad (۱۰)$$

ضریب تصحیح، C_A (به شکل ۷ و جدول ۴ مراجعه شود)، که برای $۴۰۰\ \text{nm} < \lambda \leq ۱۴۰۰\ \text{nm}$ تعریف شده است، با نحوه وابستگی جذب پیگمنت اپیتلیوم[2] در شبکیه به طول موج مرتبط است و برای حدود پرتوگیری پوست نیز به کار می‌رود.

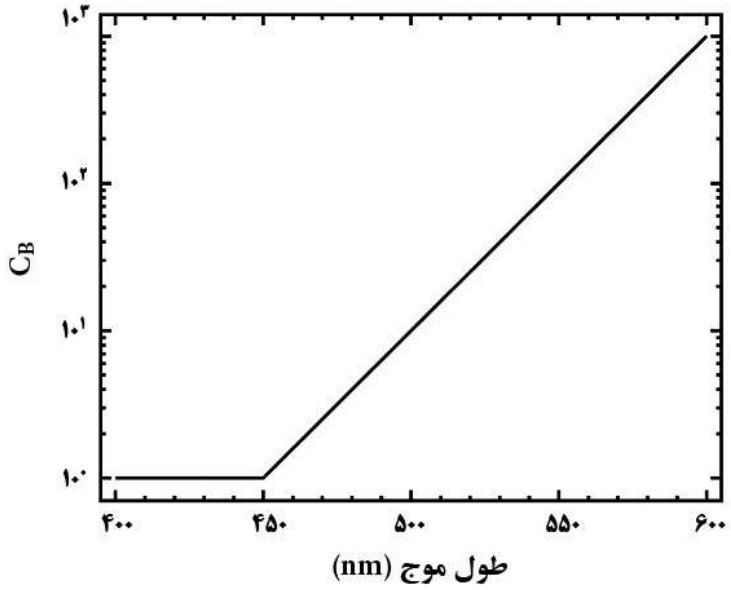
ضریب تصحیح، C_C (به شکل ۷ و جدول ۴ مراجعه شود)، که برای $۷۰۰\ \text{nm} < \lambda \leq ۱۴۰۰\ \text{nm}$ تعریف شده است، براساس وابستگی عبور محیطِ شفافِ پیش- شبکیه به طول موج است.

جدول۴- ضرایب تصحیحی که در حدهای پرتوگیری در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک به‌کار رفته‌اند

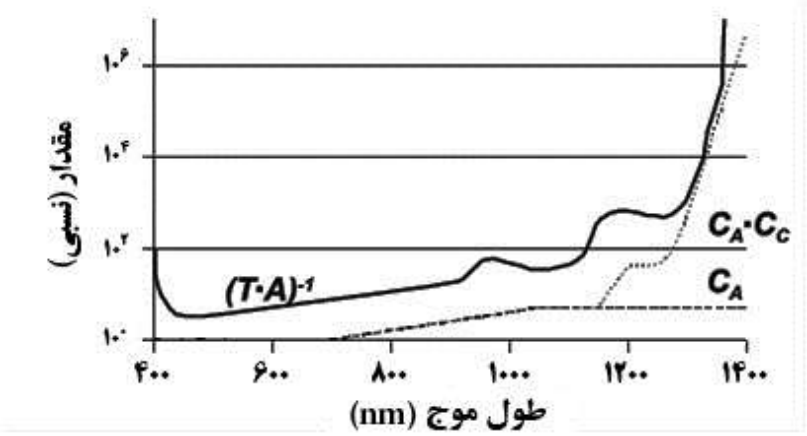
$C_A = ۱/۰$	برای	$۴۰۰\ \text{nm} \leq \lambda < ۷۰۰\ \text{nm}$
$C_A = ۱۰^{۰/۰۰۲\ (\lambda/۱nm - ۷۰۰)}$	برای	$۷۰۰\ \text{nm} \leq \lambda < ۱۰۵۰\ \text{nm}$
$C_A = ۵/۰$	برای	$۱۰۵۰\ \text{nm} \leq \lambda \leq ۱۴۰۰\ \text{nm}$
$C_B = ۱/۰$	برای	$۴۰۰\ \text{nm} \leq \lambda < ۴۵۰\ \text{nm}$
$C_B = ۱۰^{۰/۰۲\ (\lambda/۱nm - ۴۵۰)}$	برای	$۴۵۰\ \text{nm} \leq \lambda \leq ۶۰۰\text{nm}$
$C_C = ۱/۰$	برای	$۷۰۰\ \text{nm} \leq \lambda < ۱۱۵۰\ \text{nm}$
$C_C = ۱۰^{۰/۰۱۸\ (\lambda/۱nm - ۱۱۵۰)}$	برای	$۱۱۵۰\ \text{nm} \leq \lambda < ۱۲۰۰\ \text{nm}$
$C_C = ۸ + ۱۰^{۰/۰۴(\lambda/۱nm - ۱۲۵۰)}$ [a]	برای	$۱۲۰۰\ \text{nm} \leq \lambda \leq ۱۴۰۰\ \text{nm}$

[a] با رسیدن طول موج به ۱۴۰۰ نانومتر، C_C بزرگ می‌شود. اما، حد پرتوگیری محاسبه شده بر اساس جدول ۷ باید با حد پرتوگیری پوست یا دو برابر پرتوگیری پوست برمبنای زیرنویس c جدول ۷ مقایسه شود. مقدار کمتر بین این دو حد، اعمال می‌شود.

[1] Combined
[2] Pigment epithelium



شکل ۶- ضریب تصحیح C_B، بستگی آسیب ناشی از آثار فتوشیمیایی شبکیه به طول موج برای پرتوگیری‌های طولانی‌تر از ۱۰ ثانیه در محدوده طول موج مرئی را نشان می‌دهد.



شکل۷-مقایسه بستگی طیفی ضرایب تصحیح C_A و C_C به میزان جذب طیفی مؤثر نسبی در RPE[1]. عکس حاصلضرب جذب در RPE و عبور از محیط پیش-شبکیه، $(T.A)^{-1}$ (خط پیوسته) نشان دهنده انرژی جذب شده در RPE نسبت به انرژی وارد شده به چشم است. ضریب تصحیح طیفی، C_A (خط چین)، تخمینی است از عکس جذب (A) RPE. حاصلضرب ضریب تصحیح طیفی C_A و ضریب تصحیح طیفی C_C به‌صورت نقطه‌چین رسم شده است. ضریب تصحیح طیفی C_C تخمینی است از عکس عبور طیفی از محیط پیش شبکیه چشمی، T. ضریب تصحیح C_C در محدوده طول موج‌های ۱۱۵۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر که در آن محیط عدسی چشم به‌طور فزاینده‌ای کدر می‌شود، افزایش می‌یابد.

[1] Retinal pigmented epithelial

پرتوگیری از باریکه‌های همگرا شده[1] لیزر در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر کم‌ترین اندازه تصویر را روی شبکیه ایجاد می‌کند (چشمه نقطه‌ای). برای یک توان معین، این شرط پرتوگیری منجر به کم‌ترین حد برای آستانه آسیب می‌شود. بنابراین، حدود پرتوگیری برای آسیب شبکیه ناشی از گرما با پیش‌شرط کوچک‌ترین چشمه[2] بیان می‌شود. پرتوگیری از چشمه‌های گسترده با یک ضریب تصحیح، C_E، که به زاویه دید[3] چشمه ظاهری، α، بستگی دارد بیان می‌شود. (به معادله ۱۱ مراجعه شود که برای طول موج‌های بزرگ‌تر از از ۱۰۵۰ نانومتر اعمال می‌شود).

$$EL_{Th} = EL_{Th:min}\, C_{A\ or\ C}(\lambda)\, C_E(\alpha) \qquad (11)$$

ضریب تصحیح C_E (جدول ۵) برای لحاظ کردن تغییرات آستانه آسیب شبکیه با اندازه تصویر، که با زاویه چشمه ظاهری مشخص می‌شود، به‌کار می‌رود (شکل ۴).

حدود پرتوگیری به‌صورت حاصلضرب C_E در حدود پرتوگیری چشمه نقطه‌ای (یعنی "پیش‌فرض" یا بدترین شرایط برای مشاهده یک چشمه لیزری) بیان می‌شود.

جدول۵- ضریب تصحیح برای لحاظ کردن تأثیر اندازه چشمه

برای چشمه‌هایی که زاویه α (برحسب میلی‌رادیان) را ایجاد می‌کنند		
$C_E = 1.0$	برای	$\alpha \le \alpha_{min}$
$C_E = \alpha / \alpha_{min}$	برای	$\alpha_{min} \le \alpha \le \alpha_{max}$
$C_E = \alpha_{max} / \alpha_{min}$	برای	[a]($\gamma = \alpha_{max}$ با) $\alpha \ge \alpha_{max}$
که در آن، برای مدت پرتوگیری t(s):		
α_{max} = ۵ mrad	برای	t < ۶۲۵ µs[b]
$\alpha_{max} = ۲۰۰ t^{۰/۵}$ mrad	برای	۶۲۵ µs ≤ t ≤ ۰/۲۵ s
که در آن t، عدد مدت پرتوگیری برحسب ثانیه و بدون واحد است		
α_{max} = ۱۰۰ mrad	برای	t >۰/۲۵ s
و		
α_{min} = ۱/۵ mrad		

[a] توجه: برای $\alpha > \alpha_{max}$ حد پرتوگیری می‌تواند برحسب تابندگی بیان شود. نماد γ به اندازه‌گیری میدان دید[4](زاویه پذیرش) برمی‌گردد.

[b] t عدد مدت پرتوگیری برحسب ثانیه و بدون واحد است.

[1] Collimated
[2] Minimum source
[3] Angular subtense
[4] Field of view

برای پرتو مرئی و فروسرخ نزدیک، حد پرتوگیری می‌تواند برحسب مقادیر توان یا انرژیِ عبورکننده از یک دریچه ۷ میلی‌متری نیز بیان شود.

برای تعیین حدود پرتوگیری از چشمه‌های متوسط، کمیت‌های شدت تابش ($W\ m^{-2}$) و دز تابشی ($J\ m^{-2}$) به کار می‌روند. این حدود برحسب توان یا انرژی هم می‌توانند بیان شوند، یعنی پرتوگیری به‌صورت توان یا انرژی عبورکننده از یک دریچه ۷ میلی‌متری، با در نظر گرفتن برخی اصول مرتبط با زاویه پذیرش (به بند ۵ مراجعه شود) تعیین می‌شود.

برای چشمه‌های بزرگ، آستانه آسیب شبکیه وقتی که به‌صورت تابندگی در شبکیه بیان می‌شود، اساساً مستقل از اندازه تصویر است. حدود پرتوگیری برای چشمه‌های بزرگ در زوایای بزرگتر از $\alpha_{\max}$ می‌توانند با کمیت‌های متفاوتی، یعنی تابندگی[1] ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}$) و انتگرال زمانی تابندگی[2] (دز تابندگی) با واحد $J\ m^{-2}\ sr^{-1}$ بیان شوند.

حدود پرتوگیری برای چشم در جدول‌های ۷ و ۸ و مقادیر پارامترهای به‌کار رفته در این جدول‌ها، در جداول۳، ۴ و ۵ آمده‌است. به‌منظور محدود کردن میزان پرتو رسیده به قرنیه حدود پرتوگیری برای شدت تابش یا دز تابشی با متوسط‌گیری روی دریچه‌ای با قطر ۷ میلی‌متر ارائه شده‌است و درعین حال حدود دیگری برای شبکیه براساس میانگین توان یا انرژی عبوری از دریچه‌ای با قطر ۷ mm داده شده‌است.

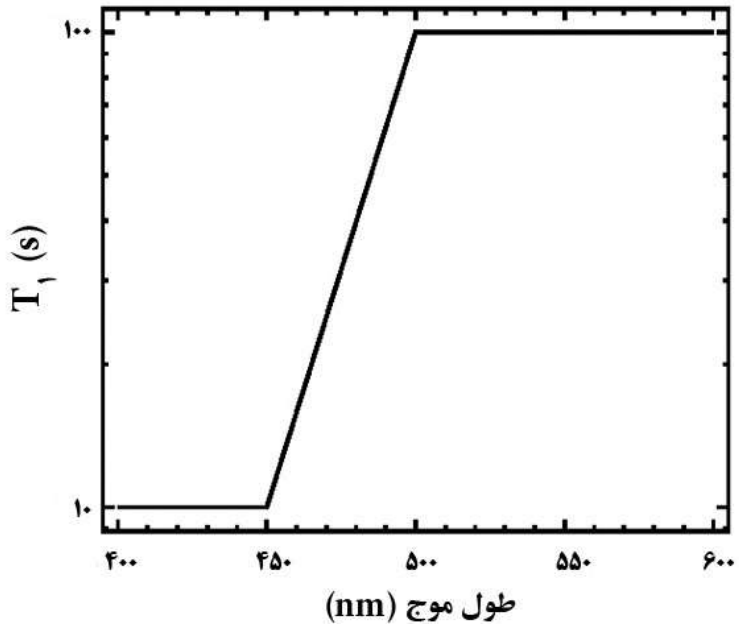
از آن‌جا که باریکه‌های لیزر مانند منابع کوچکی هستند که تصویر بسیار کوچک نقطه‌ای روی شبکیه ایجاد می‌کنند، با تعیین حدود پرتوگیری بر اساس شدت تابش و یا بر اساس توان یا انرژی عبوری از یک دریچه، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل بسیار ساده می‌شود. ارائه حدود پرتوگیری برای آسیب‌های گرمایی و فتوشیمیایی شبکیه بر اساس تابندگی یا دز تابندگی نیز امکان‌پذیر است که چنانچه از میدان دید مناسب برای متوسط‌گیری به‌منظور تعیین مقدار تابش استفاده شود، منجر به تجزیه و تحلیل مشابهی می‌شود. در جدول ۸، حدود معادل برای تابندگی یا دز تابندگی برای آسیب‌های گرمایی شبکیه در مورد منابع بزرگ ($\alpha > \alpha_{max}$) و همچنین برای آسیب‌های فتوشیمیایی شبکیه در مورد تمامی منابع با هر ابعادی ارائه شده‌است.

برای مدت‌های پرتوگیری کوتاه‌تر از موارد ارائه شده در جدول‌های ۷ و ۸ (مثلا کمتر از یک نانوثانیه در محدوده طول موج فرابنفش)، پرتوگیری باید به مقدار شدت تابش محدود شود که با استفاده از حد پرتوگیری داده شده برحسب دز تابشی برای مدت پرتوگیری کمتر (مثلا یک نانوثانیه) محاسبه شده است.

زمان T_1 (به جدول ۶ و شکل ۸ مراجعه شود) برای چشمه‌های کوچک $\alpha \leq \alpha_{min}$ ($C_E = 1.0$)، به‌کار می‌رود، و زمان پرتوگیری بحرانی است که برای کمتر از آن حد پرتوگیری گرمایی شبکیه کمتر از حد پرتوگیری فتوشیمیایی است.

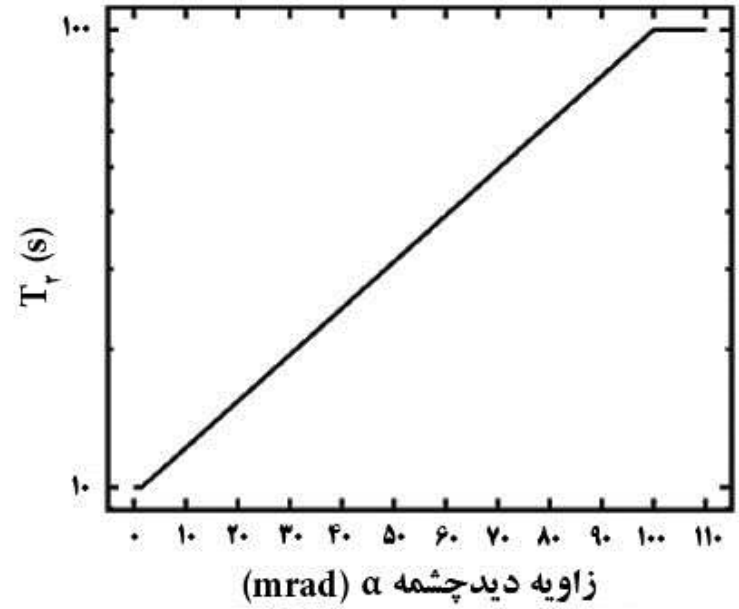
در مدت پرتوگیری بیشتر از ۱۰ ثانیه در ناحیه فرابنفش و طول موج کوتاه طیف مرئی، آسیب فتوشیمیایی غالب است.

[1] Radiance
[2] Time-integrated radiance



شکل۸- نمودار زمان بحرانی پرتوگیری، T_1، برحسب طول موج.

T_2، زمانی است که در آن افزایش نظری ریسک آسیب گرمایی با افزایش مدت پرتوگیری شبکیه در صورت بی‌حرکت بودن چشم، توسط حرکات چشم جبران می‌شود (به شکل ۹ و جدول ۶ مراجعه شود).



شکل ۹- بستگی T_2 به زاویه دید چشمه

جدول۶- مقادیر T_1 و T_2 برای تعیین حدود پرتوگیری

$\lambda < ۴۵۰ \text{nm}$	برای	$T_1 = ۱۰ \text{ s}$
$۴۵۰ \text{ nm} \leq \lambda < ۵۰۰ \text{ nm}$	برای	$T_1 = ۱۰ \times ۱۰^{۰/۰۲ (\lambda / ۱nm - ۴۵۰)} s$
$\lambda \geq ۵۰۰ \text{ nm}$	برای	$T_1 = ۱۰۰ \text{ s}$
$\alpha < ۱/۵ \text{ mrad}$	برای	$T_2 = ۱۰ \text{ s}$
$۱/۵ \text{ mrad} \leq \alpha \leq ۱۰۰ \text{ mrad}$	برای	$T_2 = ۱۰ \times ۱۰^{(\alpha / ۱mrad - ۱/۵) \div ۹۸/۵} s$
$\alpha > ۱۰۰ \text{ mrad}$	برای	$T_2 = ۱۰۰ \text{ s}$

جدول۷- حدود پرتوگیری چشم با پرتوهای لیزری، بیان شده بر حسب شدت تابش برای قرنیه؛ حدود برای شبکیه بر حسب توان یا انرژی عبورکننده از دریچه‌ای با اندازه mm ۷ نیز ارائه شده‌است.[a و b]

طول موج nm	مدت پرتوگیری		حد پرتوگیری شدت تابش یا دُز تابشی	حد پرتوگیری توان یا انرژی عبوری از دریچه ۷ میلی‌متری	محدودیت‌ها
	حد پایین	حد بالا			
فرابنفش					اندازه دریچه[b]: برای $t < ۰/۳۵ \text{s}$ برابر با ۱ mm برای $۰/۳۵ \text{ s} < t < ۱۰ \text{s}$ برابر با $۱/۵ t^{۰/۳۷۵} \text{mm}$ برای $t > ۱۰ \text{s}$ برابر با ۳/۵ mm
$۱۸۰ \leq \lambda < ۳۰۲$	۱ ns	۳۰ ks	$۳۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۲ \leq \lambda < ۳۰۳$	۱ ns	۳۰ ks	$۴۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۳ \leq \lambda < ۳۰۴$	۱ ns	۳۰ ks	$۶۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۴ \leq \lambda < ۳۰۵$	۱ ns	۳۰ ks	$۱۰۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۵ \leq \lambda < ۳۰۶$	۱ ns	۳۰ ks	$۱۶۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۶ \leq \lambda < ۳۰۷$	۱ ns	۳۰ ks	$۲۵۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۷ \leq \lambda < ۳۰۸$	۱ ns	۳۰ ks	$۴۰۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۸ \leq \lambda < ۳۰۹$	۱ ns	۳۰ ks	$۶۳۰ \text{ J m}^{-۲}$ *		
$۳۰۹ \leq \lambda < ۳۱۰$	۱ ns	۳۰ ks	$۱/۰ \text{ kJ m}^{-۲}$ *		
$۳۱۰ \leq \lambda < ۳۱۱$	۱ ns	۳۰ ks	$۱/۶ \text{ kJ m}^{-۲}$ *		
$۳۱۱ \leq \lambda < ۳۱۲$	۱ ns	۳۰ ks	$۲/۵ \text{ kJ m}^{-۲}$ *		
$۳۱۲ \leq \lambda < ۳۱۳$	۱ ns	۳۰ ks	$۴/۰ \text{ kJ m}^{-۲}$ *		
$۳۱۳ \leq \lambda < ۳۱۵$	۱ ns	۳۰ ks	$۶/۳ \text{ kJ m}^{-۲}$ *		

ادامه جدول ۷

$۳۱۵ \le \lambda < ۴۰۰$	۱ ns	۱۰ s	$۵/۶t^{۰/۲۵}$ kJ m$^{-۲}$		
$۳۱۵ \le \lambda < ۴۰۰$	۱۰ s	۳۰ ks	۱۰ kJ m$^{-۲}$		
* در محدوده $۱۸۰ \text{ nm} \le \lambda < ۳۱۵ \text{ nm}$ و برای مدت پرتوگیری ۱ ns تا ۱۰ s حد پرتوگیری همچنین نباید بیشتر از $۵/۶\, t^{۰/۲۵}$ kJ m$^{-۲}$ درنظر گرفته شود.					
نور مرئی[c]					برای تمامی موارد اندازه دریچه برابر با ۷ mm
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	۱۰۰ fs	۱۰ ps	$۱/۰C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۳/۸ \times ۱۰^{-۸}C_E$ J	
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	۱۰ ps	۵ μs	$۲/۰C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۷/۷\times ۱۰^{-۸}C_E$ J	
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	۵ μs	۱۰ s	$۱۸\, C_E\, t^{۰/۷۵}$ J m$^{-۲}$	$۷ \times ۱۰^{-۴}C_E.t^{۰/۷۵}$ J	
حدود دوگانه پرتوگیری با لیزرهای نور مرئی در محدوده طول موج ۴۰۰ الی ۶۰۰ نانومتر با زمان پرتوگیری بیشتر از ۱۰ ثانیه					
فتوشیمیایی[e]					
$۴۰۰ \le \lambda < ۶۰۰$	۱۰s	۱۰۰s	$۱۰۰\, C_B$ J m$^{-۲}$	$۳/۹\times ۱۰^{-۳}C_B$ J	۱) برای $\alpha > \gamma_{ph}$ از $\gamma = \gamma_{ph}$ mrad استفاده کنید.
$۴۰۰ \le \lambda < ۶۰۰$	۱۰۰s	۳۰ks	$۱/۰\, C_B$ W m$^{-۲}$	$۳۹\, C_B$ μW	۲) برای $\gamma_{ph} \le \alpha$ محدودیتی اعمال نمی‌شود.
گرمایی[e]					
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	۱۰ s	۳۰ ks	۱۰ W m$^{-۲}$	۰/۳۹ mW	برای $\alpha \le ۱/۵$ mrad
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	۱۰ s	$T_۲$ s	$۱۸\, C_E\, t^{۰/۷۵}$ J m$^{-۲}$	$۷/۰\times ۱۰^{-۴}C_E\, t^{۰/۷۵}$ J	برای $\alpha > ۱/۵$ mrad
$۴۰۰ \le \lambda < ۷۰۰$	$T_۲$ s	۳۰ ks	$۱۸\, C_E\, T_۲^{-۰/۲۵}$ W m$^{-۲}$	$۷/۰\times ۱۰^{-۴}C_E\, T_۲^{-۰/۲۵}$ W	برای $\alpha > ۱/۵$ mrad
فروسرخ با طول موج کوتاه[d]					برای دریچه با اندازه ۷ mm
$۷۰۰ \le \lambda < ۱۰۵۰$	۱۰۰ fs	۱۰ ps	$۱/۰\, C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۳/۸\times ۱۰^{-۸}\, C_E$ J	
$۷۰۰ \le \lambda < ۱۰۵۰$	۱۰ ps	۵ μs	$۲/۰\, C_A\, C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۷/۷\times ۱۰^{-۸}\, C_A\, C_E$ J	
$۷۰۰ \le \lambda < ۱۰۵۰$	۵ μs	۱۰ s	$۱۸\, C_A\, C_E\, t^{۰/۷۵}$ J m$^{-۲}$	$۷/۰\times ۱۰^{-۴}C_A\, C_E.t^{۰/۷۵}$ J	
$۱۰۵۰ \le \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰۰ fs	۱۰ ps	$۱/۰\, C_C\, C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۳/۸\times ۱۰^{-۸}C_C\, C_E$ J	
$۱۰۵۰ \le \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰ ps	۱۳μs	$۲۰\, C_C\, C_E$ mJ m$^{-۲}$	$۷/۷\times ۱۰^{-۷}\, C_C\, C_E$ J	
$۱۰۵۰ \le \lambda < ۱۴۰۰$	۱۳ μs	۱۰ s	$۹۰\, C_C\, C_E\, t^{۰/۷۵}$ J m$^{-۲}$	$۳/۵\times ۱۰^{-۳}C_C\, C_E\, t^{۰/۷۵}$ J	
$۷۰۰ \le \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰ s	۳۰ ks	$۱۰\, C_A\, C_C$ W m$^{-۲}$	$۳/۹\times ۱۰^{-۴}\, C_A\, C_C$W	برای $\alpha \le ۱/۵$ mrad

ادامه جدول ۷

$700 \le \lambda < 1400$	۱۰ s	T_2 s	$18 C_A.C_C C_E t^{0.75}$ J m^{-2}	$7.0\times10^{-4} C_A C_C C_E t^{0.75}$ J	برای $\alpha > 1.5$ mrad
$700 \le \lambda < 1400$	T_2 s	۳۰ ks	$18 C_A.C_C C_E T_2^{-0.25}$ Wm^{-2}	$7.0\times10^{-4} C_A C_C C_E T_2^{-0.25}$W	برای $\alpha > 1.5$ mrad
فروسرخ با طول موج متوسط یا بلند[d]					اندازه دریچه[b]: برای $t < 0.35$ s برابر با ۱ mm برای $0.35 \le t < 10$s برابر با $1.5t^{0.375}$mm برای $t \ge 10$ s برابر با ۳٫۵ mm
$1400 \le \lambda < 1500$	۱ ns	۱ ms	۱ kJ m^{-2}		
$1400 \le \lambda < 1500$	۱ ms	۱۰ s	$5.6\, t^{0.25}$ kJ m^{-2}		
$1500 \le \lambda < 1800$	۱ ns	۱۰ s	۱۰ kJ m^{-2}		
$1800 \le \lambda < 2600$	۱ ns	۱ ms	۱٫۰ kJ m^{-2}		
$1800 \le \lambda < 2600$	۱ ms	۱۰ s	$5.6\, t^{0.25}$ kJ m^{-2}		
$2600 \le \lambda < 1$ mm	۱ ns	۱۰۰ ns	۱۰۰ J m^{-2}		
$2600 \le \lambda < 1$ mm	۱۰۰ ns	۱۰ s	$5.6\, t^{0.25}$ kJ m^{-2}		
$1400 \le \lambda < 1$ mm	۱۰ s	۳۰ ks	۱ kW m^{-2}		

[a] t بر حسب ثانیه.

[b] برای زمان پرتوگیری t، حد بالایی $< t \le$ حد پایینی است. به‌عنوان مثال چنانچه حد پایینی زمان پرتوگیری ۱۰۰ fs و حد بالایی آن ۱۰ ps است، آنگاه ۱۰ps $> t \le$ ۱۰۰ fs. همچنین اگر حد پایینی زمان پرتوگیری ۱۰ ps و حد بالایی آن ۵ µs باشد، آنگاه ۵ µs $> t \le$ ۱۰ ps.

[c] چنانچه قطر باریکه کم‌تر از یک میلی‌متر و عرض پالس کم‌تر از ۰٫۳۵ s باشد، آنگاه مقدار واقعی شدت تابش و نه میانگین آن روی دریچه به قطر یک میلی‌متر باید با حد پرتوگیری مقایسه شود.

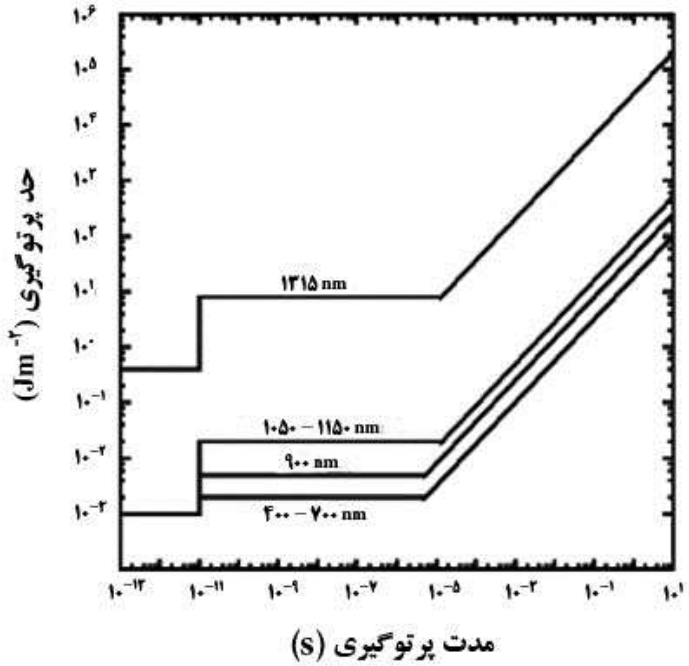
[d] در محدوده طول موج‌های مرئی برای لکه‌های بزرگ روی شبکیه، حد گرمایی پرتوگیری شبکیه چشم که برحسب دز تابشی قرنیه داده شده‌است ممکن است از حد پرتوگیری پوست بیش‌تر باشد. در این شرایط به‌منظور حفاظت از قسمت‌های بیرونی چشم، حد پرتوگیری پوست هم برای چشم اعمال می‌شود. برای پرتوگیری چشم فقط در محدوده طول موج‌های فروسرخ، دو برابر حد پرتوگیری پوست باید اعمال شود. برای آنالیز کلی ایمنی، حدود پرتوگیری پوست و چشم هردو باید اعمال شوند. بنابراین، این محدودیت اضافی برای پرتوگیری چشم (استفاده از حد پرتوگیری پوست به‌عنوان حد دوم) وقتی مطرح است که فقط چشم پرتوگیری می‌کند.

[e] برای منابع کوچک با زاویه دید ۱٫۵ mrad یا کمتر، حدود دوگانه پرتوگیری در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۶۰۰ نانومتر، برای زمان‌های بیشتر از ۱۰ ثانیه و کمتر از T_1 به حدود گرمایی و برای زمان‌های بیشتر از ۱۰ ثانیه و بیشتر از T_1 به حدود فتوشیمیایی کاهش می‌یابد (به جداول ۴، ۵ و ۶ مراجعه شود).

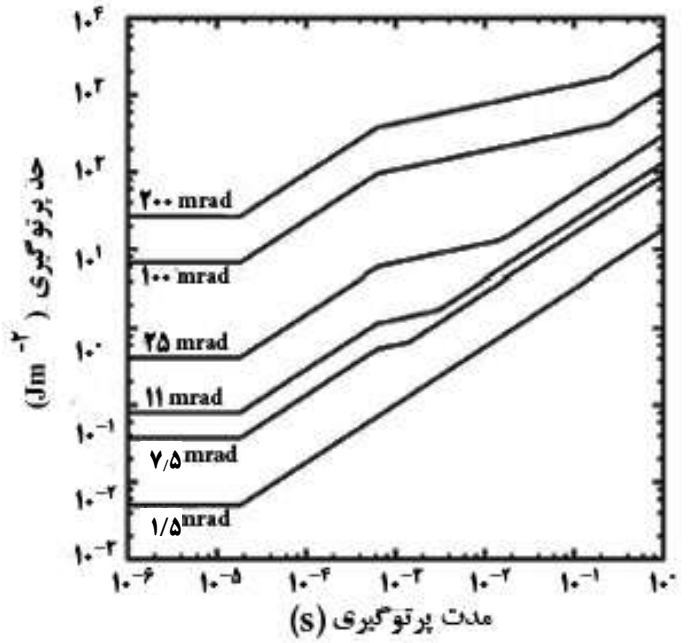
جدول۸- حدود پرتوگیری چشم با پرتوهای لیزر در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر برحسب تابندگی یا دز تابندگی

طول موج nm	مدت پرتوگیری		حد پرتوگیری	محدودیت‌ها
	حد پایینی	حد بالایی	تابندگی یا دُز تابندگی	
نور مرئی				
برای $t \leq ۱۰$ s و $\alpha \geq \alpha_{max}$				
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۱۰۰ fs	۱۰ ps	۰٫۱۷ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	کلیه موارد فقط برای منابع بزرگ با تابندگی ثابت
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۱۰ ps	۵٫۰ μs	۰٫۳۴ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۵٫۰ μs	۰٫۶۲۵ ms	۳٫۱ $t^{۰٫۷۵}$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۰٫۶۲۵ ms	۰٫۲۵ s	۷۶ $t^{۰٫۲۵}$ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۰٫۲۵ s	۱۰ s	۰٫۱۵ $t^{۰٫۷۵}$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
برای $t \geq ۱۰$ s ؛ حدود دوگانه				
فتوشیمیایی				حدود تابندگی بر اساس اثرات فتوشیمیایی برای همه αها معتبر است، اما متوسط‌گیری پرتوگیری باید بر اساس γ_{ph} صورت گیرد.
$۴۰۰ \leq \lambda < ۶۰۰$	۱۰ s	۱۰ ks	۱٫۰ C_B MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۶۰۰$	۱۰ ks	۳۰ ks	۱۰۰ C_B W m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
گرمایی برای $\alpha \geq ۱۰۰$ mrad				
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۱۰ s	۱۰۰ s	۰٫۱۵ $t^{۰٫۷۵}$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۷۰۰$	۱۰۰ s	۳۰ ks	۴۷ kW m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
فروسرخ با طول موج کوتاه				
برای $\alpha \geq \alpha_{max}$				
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰۰ fs	۱۰ ps	۰٫۱۷ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰ ps	۵٫۰ μs	۰٫۳۴ $C_A C_C$ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۵٫۰ μs	۰٫۶۲۵ ms	۳٫۱ $t^{۰٫۷۵}$ $C_A C_C$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۰٫۶۲۵ ms	۰٫۲۵ s	۷۶ $t^{۰٫۲۵}$ $C_A C_C$ kJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۰٫۲۵ s	۱۰ s	۰٫۱۵ $t^{۰٫۷۵}$ $C_A C_C$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰ s	۳۰ ks	۱۰ $C_A C_C$ W m$^{-۲}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰ s	۱۰۰ s	۰٫۱۵ $t^{۰٫۷۵}$ $C_A C_C$ MJ m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
$۷۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰۰ s	۳۰ ks	۴۷ $C_A C_C$ kW m$^{-۲}$ sr$^{-۱}$	
در همه موارد t بر حسب ثانیه است.				

برخی از حدود پرتوگیری چشم، برحسب مدت پرتوگیری و در طول موج‌های خاص در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. وابستگی حدود گرمایی شبکیه به مدت زمان پرتوگیری برای تعدادی از زوایای دید منبع نور در شکل ۱۱ ارائه شده‌است.

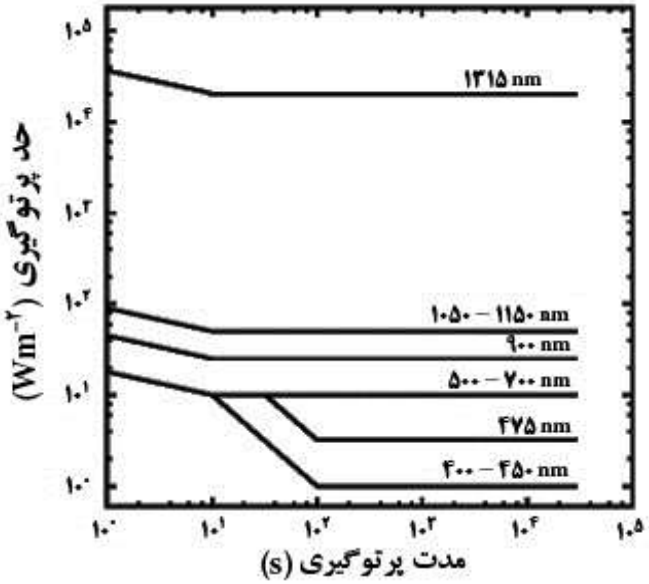


شکل۱۰-حدود پرتوگیری از لیزرهای پالسی به عنوان منابع نور نقطه‌ای برای طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر

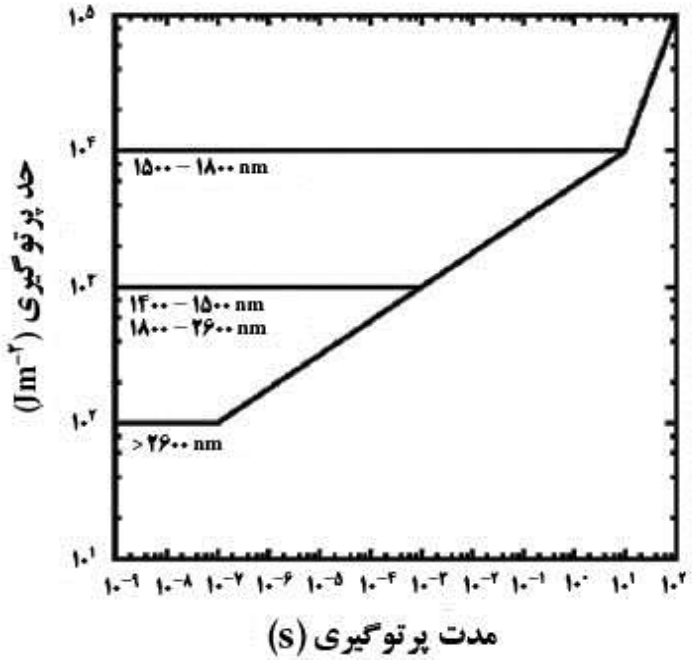


شکل۱۱-نمودار وابستگی حدود گرمایی شبکیه به مدت زمان پرتوگیری برای تعدادی از زوایای دید منبع نور برای طول موج‌های ۴۰۰ الی ۷۰۰ نانومتر

نمودار حدود پرتوگیری با لیزرهای پیوسته به عنوان منابع نور نقطه‌ای در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر در شکل ۱۲ ارائه شده‌است. نمودارهای حدود پرتوگیری چشم از پرتوهای لیزر در محدوده‌های فروسرخ میانی و دور در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.



شکل۱۲- نمودار حدود پرتوگیری چشم با لیزرهای پیوسته به عنوان منابع نور نقطه‌ای در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر



شکل ۱۳- نمودارهای حدود پرتوگیری چشم و پوست از پرتوهای لیزر در محدوده‌های فروسرخ میانی و دور

۷ حدود پرتوگیری پوست

در مورد پوست، حدود پرتوگیری در سطح پوست مشخص می‌شوند. حدود پرتوگیری پوست درجدول ۹ آمده‌است.

جدول ۹- حدود پرتوگیری پوست از پرتوهای لیزر[a]

طول موج nm	مدت پرتوگیری		حد پرتوگیری	محدودیت‌ها
	حد پایین	حد بالا	شدت یا دُز تابشی	
فرابنفش				
$۱۸۰ \leq \lambda < ۴۰۰$	۱ ns	۳۰ ks	مانند حدود پرتوگیری برای چشم به جدول ۷ مراجعه شود.	دریچه با اندازه [b]۳٫۵ mm
نور مرئی و فروسرخ با طول موج کوتاه				دریچه با اندازه [b]۳٫۵ mm
$۴۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱ ns	۱۰۰ ns	$۲۰۰\ C_A$ J m$^{-۲}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰۰ ns	۱۰ s	$۱۱\ C_A\, t^{۰٫۲۵}$ kJ m$^{-۲}$	
$۴۰۰ \leq \lambda < ۱۴۰۰$	۱۰s	۳۰ks	$۲٫۰\ C_A$ kW m$^{-۲}$	
فروسرخ با طول موج متوسط یا بلند[c]				
$۱۴۰۰ \leq \lambda < ۱$ mm	۱ns	۳۰ks	مانند حدود پرتوگیری برای چشم به جدول ۷ مراجعه شود.	دریچه با اندازه [b]۳٫۵ mm

[a] t بر حسب ثانیه.

[b] چنانچه قطر باریکه کم‌تر از یک میلی‌متر باشد، آنگاه مقدار واقعی شدت تابش و نه میانگین آن روی دریچه‌ای به قطر ۳٫۵ mm باید با حد پرتوگیری مقایسه شود.

[c] برای طول موج‌های بالاتر از ۱۴۰۰nm، مدت پرتوگیری بیشتر از ۱۰ s و مساحت سطحی از پوست که پرتوگیری می‌کند بیشتر از ۰٫۱ m^{۲}، حد پرتوگیری به ۱۰۰ W m$^{-۲}$ کاهش می‌یابد. چنانچه مساحت سطحی از پوست که پرتوگیری می‌کند بین ۰٫۰۱ مترمربع (که برای آن حد پرتوگیری ۱۰۰۰ W m$^{-۲}$ است) و ۰٫۱ متر مربع (که حد پرتوگیری ۱۰۰ W m$^{-۲}$ است) باشد، حد پرتوگیری با مساحت سطحی از پوست که پرتوگیری می‌کند نسبت عکس دارد.

۸ طول موج‌های چندگانه

موارد زیر برای پرتوگیری از تابش لیزری که شامل بیش از یک طول موج است، مانند ترکیبی از چند باریکه، اعمال می‌شود.

برای طول موج‌های مختلف، اگر محل[1] جذب یکی باشد، مثلا قرنیه یا شبکیه، و مکانیسم آسیب هم یکسان باشد، مثلا گرمایی، ترمومکانیکی یا فتوشیمیایی، اثرات به‌طور طیفی جمع‌پذیر درنظر گرفته می‌شوند. برای پرتوگیری از طول موج‌هایی که عمدتاً در بافت‌های مختلف جذب می‌شوند، مثلاً یکی در قرنیه و دیگری در شبکیه، پرتوگیری‌ها باید مستقل در نظر گرفته شوند.

در مواردی که محل جذب یکی است، اما مکانیسم‌های آسیب متفاوت هستند، مثلا وقتی که عرض پالس و/یا اندازه تصویر متفاوت است، فرضیه‌های موجود نمی‌توانند با اطمینان اثرات برهم‌کنش را برای ترکیب‌های مختلف ممکن پیش‌بینی کنند. محتمل به نظر نمی‌آید که هر مکانیسم آسیب مستقل از بقیه رفتار کند و هیچ برهم‌کنشی وجود نداشته باشد. برای اهداف کاربردی، و درصورت کمبود اطلاعات، در صورتی که چندین طول موج هم‌زمان توسط یک بافت جذب شود، پرتوگیری‌ها تجمعی در نظر گرفته می‌شوند. به‌دلیل غیرخطی بودن آسیب‌های ناشی از گرما، اگر مکانیسم گرمایی دخیل باشد، این فرض باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد.

۹ پرتوگیری‌های تکرار شونده

در یک روز، پرتوگیری تکراری از لیزر می‌تواند نتیجه یکی از این موارد باشد:

چند بار پرتوگیری از یک لیزر پیوسته یا

پرتوگیری از تکرار پالس لیزر و

پرتوگیری از باریکه‌های لیزرهای اسکنر[2].

باریکه‌های اسکنر، باعث پرتوگیری تکراری پالسی چشم می‌شوند. هم زمان عرض یک پالس و هم مجموع زمان کل پرتوگیری باید تعیین شوند. زمان کل پرتوگیری از یک قطار پالس مشابه با زمان پرتوگیری پیوسته تعیین می‌شود. یعنی زمان کل پرتوگیری برابر با زمان طی شده از لحظه شروع پرتوگیری (شروع اولین پالس) تا لحظه پایان آخرین پالس شامل زمان‌های بین پالس‌های متوالی است.

براساس اطلاعاتی که در حال حاضر در مورد پالس‌هایی که عرض آن‌ها در محدوده نانوثانیه است وجود دارد، پیشنهاد می‌شود آستانه برای انرژی هر پالس با ضریبی در حدود $n^{-0.25}$ کاهش یابد؛ که n تعداد پالس‌ها است.

تمامی قواعد عمومی زیر باید برای کلیه پرتوگیری‌های تکراری ناشی از پالس‌های تکرار شونده و یا سیستم‌های جاروبگر لیزری رعایت شود:

[1] Site
[2] Scanner

۱- پرتوگیری از هر یک از پالس‌ها در یک قطار پالس نباید از حد پرتوگیری برای یک تک پالس با عرض پالس مشابه، بیش‌تر شود.
۲- پرتوگیری از هر مجموعه پالس، یا زیرمجموعه از پالس‌ها در یک قطار پالس، که در مدت زمان T صورت می‌گیرد، نباید از حد پرتوگیری برای زمان T بیش‌تر شود. T از عرض یک پالس تا مدت زمان کل پرتوگیری تغییر می‌کند؛ و
۳- برای حدود گرمایی شبکیه، یک ضریب اضافی C_P نیز با شرایط زیر به حد مربوط به یک تک پالس اعمال می‌شود. مقدار C_P برابر با $n^{-0.25}$ است (به جز در مواردی که غیر از آن ذکر شده‌باشد) که در آن n تعداد دفعات تکرار پالس‌ها در مدت زمان پرتوگیری T_2 است (به جدول ۶ مراجعه شود).

الف - برای $\alpha \leq 5$ mrad با عرض پالس بیش‌تر از T_i (5 μs برای طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۰۵۰ نانومتر)، C_P=۱٫۰ است.

ب - برای $\alpha > 5$ mrad با عرض تک پالس بیش‌تر از T_i، چنانچه $\alpha \leq \alpha_{max}$ و $n > 40$ باشد، C_P = ۰٫۴، و در صورتی که $\alpha > \alpha_{max}$ و $\alpha < 100$mrad و $n > 625$ باشد، C_P = ۰٫۲ و اگر $\alpha \geq 100$mrad باشد، C_P = ۱٫۰ است.

ج - برای عرض پالس کم‌تر یا مساوی T_i، و مدت زمان پرتوگیری کم‌تر یا مساوی با ۰٫۲۵ s، C_P = ۱٫۰ است. برای مدت پرتوگیری (مورد استفاده در ارزیابی ایمنی به عنوان بیش‌ترین زمان مورد انتظار برای پرتوگیری) طولانی‌تر از ۰٫۲۵ s و بیش‌تر از ۶۰۰ پالس در مدت پرتوگیری، $C_P = 5\ n^{-0.25}$ است. در شرایطی که پرتو مرئی است، این محدودیت فقط برای پرتوگیری‌های عمدی اعمال می‌شود.

۱۰ پرتوگیری‌های مزمن

پرتوگیری مزمن از تابش لیزر معمولا به‌ندرت پیش می‌آید. مجموعه تجربیات حاصل از لیزرهای درحال استفاده هیچ شاهدی دال بر اثرات ناشی از پرتوگیری‌های مزمن (اثرات تأخیری) ارائه نمی‌دهد. اطلاعات علمی کافی برای استخراج راهنمای پرتوگیری مزمن وجود ندارد. هرچند، انتظار نمی‌رود در مقایسه با پرتوگیری ناهمدوس محیطی خطرات ویژه‌ای در ارتباط با پرتوگیری مزمن از لیزر وجود داشته باشد. حد مرتبط با پرتوگیری طولانی‌مدت از لیزرهای UV-B و UV-C، به‌طور مؤثر همان حدود قابل کاربرد برای چشمه‌های غیرلیزری هستند.

۱۱ تدابیر احتیاطی ویژه

حدود ارائه شده در این استاندارد هم برای عموم مردم و هم برای افرادی که به‌طور مستقیم با لیزر کار می‌کنند به‌کار می‌رود. باید توجه شود که تعداد کمی افراد حساس به نور ممکن است در مقادیر کم‌تر از حدود ارائه شده، دچار عوارض ناشی از پرتوهای فرابنفش شوند. به‌علاوه حدود پرتوگیری در محدوده طول موج‌های ۳۰۰ الی ۴۰۰

نانومتر نباید برای نوزادان و افراد دارای عدسی مصنوعی در چشم، به کار رود. لذا باید برای پیشگیری از پرتوگیری چنین افرادی از پرتوهای فرابنفش لیزر تدابیر احتیاطی سخت‌گیرانه‌تری باید به کار گرفته شود.
این حدود پرتوگیری به‌منظور محدود کردن کاربردهای لیزر به عنوان عاملی ضروری در درمان‌های پزشکی تدوین نشده‌است. اما در مورد پرتوگیری‌های تشخیصی، باید بر اساس این شرایط، ملاحظات ویژه‌ای برای پرتوگیری در نظر گرفته شود.
حدود ارائه شده برای پرتوگیری چشم، همان‌طور که در این مدرک گفته شده است، از آسیب دیدن چشم در اثر مکانیسم تخریب غیرخطی (بسیار کوتاه مدت)، مکانیسم‌های تخریب گرمایی و آسیب فتوشیمیایی شبکیه ناشی از طول موج‌های کوتاه نور پیش‌گیری می‌کند. اما در شرایطی که مردمک‌ها با استفاده از دارو گشاد شده‌اند و نور روی شبکیه متمرکز شده‌است، نوع دیگری از آسیب فتوشیمیایی شبکیه ممکن است سبب نگرانی شود. این حالت برای طول موج‌های خارج از محدوده خطر نور آبی یعنی محدوده‌ای که گیرندگان مخروطی نور به شدت طول موج میانی (سبز) و طول موج بلند (قرمز) را جذب می‌کنند، یعنی محدوده ۵۰۰ الی ۶۰۰ نانومتر مطرح است. برای بروز این شرایط همچنین لازم است که پرتوگیری طولانی باشد و به ندرت در اثر بیش‌اشباع[1] سلول‌های مخروطی[2] روی می‌دهد. گرچه سابق بر این تصور می‌شد که این شرایط، در عمل پیش نمی‌آید، اما در پرتوگیری از برخی از تجهیزات چشم پزشکی این پدیده ممکن است روی دهد و در این مواقع باید احتیاط لازم صورت گیرد.

[1] Oversaturation
[2] Cone Opsins