



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۲۰۶۱۰

چاپ اول

۱۳۹۴

INSO

20610

1st.Edition

2016

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 μ m**

ICS: 31.260

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه 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 و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، 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 پیشنهادهای در کمیته 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 در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت 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 شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ 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 پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی 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 بین‌المللی 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 زمینه 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، گواهینامه 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:

کاردان، محمدرضا
(دکترای مهندسی هسته‌ای)

سمت و/یا نمایندگی

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 مکترونیک)

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

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

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 پانصد و 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 μ m, 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 به منظور اعمال حفاظت کافی در برابر اثرات بیولوژیکی زیانبار و قطعی است که تاکنون برای این پرتوها شناخته شده است.

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 در نظر 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

۱-۲

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 زاویه فضایی است. تابندگی معادل شار خارج شده از واحد سطح در واحد زاویه فضایی است. تابندگی برای منبع نور تعریف می‌شود.

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

۳-۲

چشمه بزرگ

Large source

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

۴-۲

چشمه ظاهری

Apparent source

برای باریکه‌های گوسی^۱ (TEM_{00})، مرکز انحنای جبهه موجی^۳ 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 در نظر گرفته می‌شود.

۷-۲

چشمه نقطه‌ای

Point source

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

^۱ Gaussian beam

^۲ 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 می‌یابد.

^۳ Wavefront

دز تابشی

Radiant exposure

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

$$H = \int_{t_1} E(t) dt \quad (1)$$

که در آن:

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

$E(t)$ شدت تابش در لحظه t بر حسب 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 به دست می‌آید:

$$H = E t_1 \quad (2)$$

که در آن:

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

E شدت تابش بر حسب وات بر مترمربع ($W m^{-2}$)؛ و

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

دز تابشی قرنیه

Corneal radiant exposure

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

دز تابندگی

Radiance dose

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

$$D = \int_{t_1} L(t) dt \quad (3)$$

که در آن:

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

$$D = L t_1 \quad (4)$$

که در آن:

D دز تابندگی بر حسب ژول بر مترمربع بر استرادیان ($\text{J m}^{-2} \text{sr}^{-1}$)؛
 L تابندگی بر حسب وات بر مترمربع بر استرادیان ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$)؛ 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 بر حسب رادیان (rad) یا میلی رادیان (mrad) بیان می شود.

۱۲-۲

زاویه دید چشمه یا منبع (زاویه دید)

Angular subtense

زاویه دید چشمه یا منبع (اندازه منبع)^۱، α ، بر حسب رادیان (rad) است و از معادله زیر به دست می آید:

$$\alpha = \frac{d_s}{r} \quad (5)$$

که در آن:

r فاصله چشم از منبع نور و

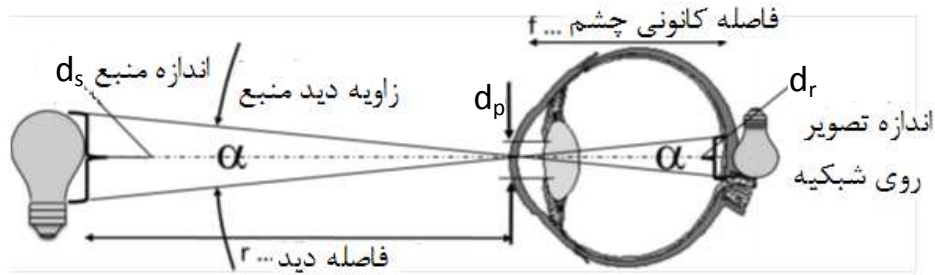
d_s بُعد متوسط منبع نور^۲ است.

در این معادله، r و d_s باید با یکای مشابه جایگزین شوند.

در شکل ۱ نحوه تعیین زاویه دید منبع مشخص شده است. 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
$t < 625 \times 10^{-6}$	۰٫۰۰۵
$625 \times 10^{-6} \leq t < ۰٫۲۵$	$۰٫۲ t^{۰٫۱۵}$
$t \geq ۰٫۲۵$	۰٫۱
توجه: مقدار t باید بر حسب ثانیه جایگزین شود تا مقدار α_{max} بر حسب رادیان به دست 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 $۱٫۵ \times 10^{-3}$ رادیان را زاویه دید کمینه می‌نامند ($\alpha_{min} = ۱٫۵ \times 10^{-3} \text{ rad} = ۱٫۵ \text{ mrad}$).

۱۵-۲

زاویه فضایی (Ω)

Solid angle

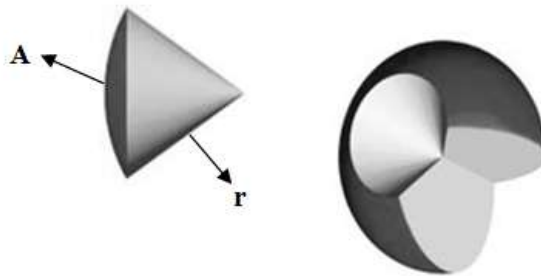
زاویه فضایی رأس مخروطی است که از یک کره جدا شده است به گونه‌ای که رأس مخروط روی مرکز کره باشد. این زاویه مطابق با شکل ۲، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (۶)$$

که در آن:

A مساحت قطاع کروی 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

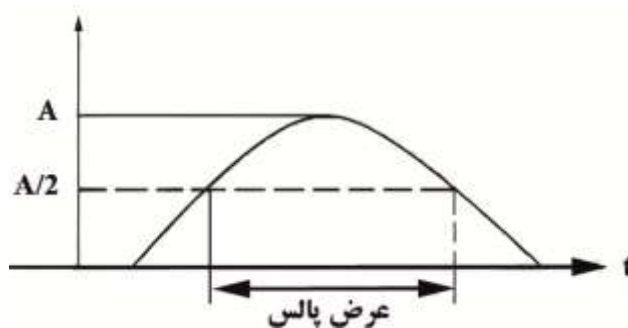
توان تابیده شده به واحد سطح در یک نقطه را شدت تابش (E) در آن نقطه می‌نامند. به عبارت دیگر، شدت تابش در یک نقطه نسبت توان تابیده شده به جزئی از یک سطح به مساحت آن جزء است. یادآوری- یکای شدت تابش در دستگاه بین‌المللی یکاها وات بر متر مربع ($W m^{-2}$) است.

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 شده است.



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 10^6 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 10^6 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.

Field of view

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

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^۱ پرتوگیری (عرض پالس)، و در بعضی موارد قطر شدت تابش^۲ (اندازه تصویر) بستگی دارد.

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

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

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**۱-۴ اندازه تصویر**

عملکرد بیشتر چشمه‌های لیزری نظیر چشمه‌های نقطه‌ای است، یعنی روی شبکه تصویر گسترده ایجاد نمی‌کنند. هرچند در موارد کمی مثلاً در هنگام مشاهده انعکاس پخشی^۳، آرایه‌هایی از دیودهای لیزری، یا چشمه لیزری پخشی^۴، شرایط چشمه گسترده غالب می‌شود.

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

¹ Duration

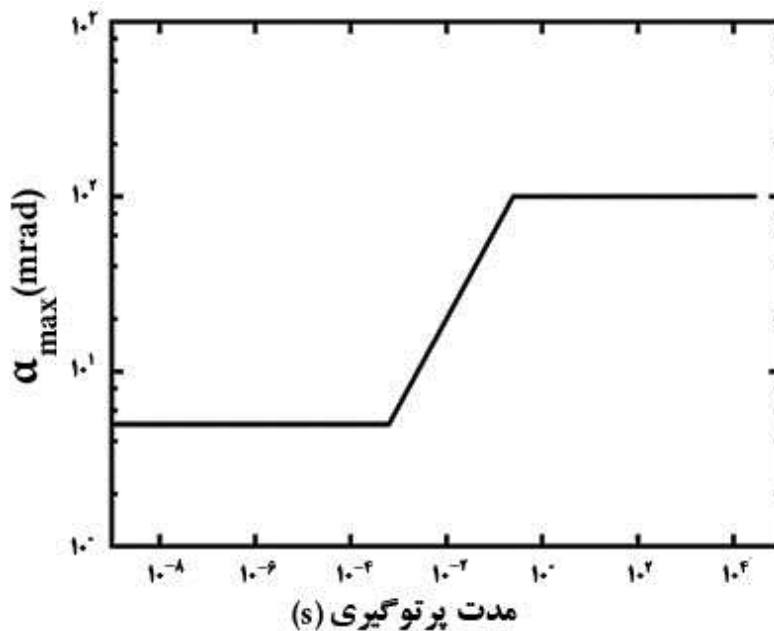
² Irradiance

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 شبکه در اثر پخش شعاعی گرما^۱، تابعی از اندازه تصویر روی شبکه است. اگر قطر تصویر روی شبکه بزرگتر از یک مقدار بحرانی که منجر به بروز α_{max} می‌گردد شود، پخش شعاعی گرما، در صورتی که به صورت دز تابشی شبکه 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 (0.3°) برای پالس‌های کوتاه تا ۱۰۰ میلی‌رادیان (5.7°) برای پرتوگیری‌های موج پیوسته، CW، افزایش می‌یابد (به شکل ۴ و جدول ۱ مراجعه شود).



شکل ۴- نمودار بستگی زاویه بحرانی ایجاد شده برای چشمه‌های متوسط، α_{max} ، به مدت پرتوگیری

ضریب تصحیح، C_E (جدول ۵) 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 $1/5$ میلی‌رادیان است).

برای چشمه‌های بزرگ، در صورتی که برای تعیین سطح پرتوگیری میدان دید $\gamma = \alpha_{max}$ به کار رود، ضریب تصحیح C_E معادل با $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ خواهد شد. برای یک چشمه همگن^۲ و دایره‌ای شکل، سطح پرتوگیری می‌تواند با یک میدان دید باز^۱ تعیین شود، و در این صورت ضریب تصحیح، C_E ، با معادله ۸ بیان می‌شود.

¹ Radial heat flow

² Homogeneous

$$C_E = \frac{\alpha^2}{\alpha_{min} \alpha_{max}} \quad (8)$$

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_{max} و α_{min} 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} ، برابر است. در مورد پرتوگیری چشم از هر گونه لیزر پیوسته، مدت پرتوگیری با حداکثر مدت زمان پیش‌بینی 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 نشده است. 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 نشده است 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

۱-۵ اندازه تصویر روی شبکه

در محدوده ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر، یعنی "ناحیه طول موج‌های خطرناک برای شبکه"، حد پرتوگیری چشمی برای آسیب ناشی از گرمای شبکه 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 شبکه، با در نظر گرفتن تطابق^۱ 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^۲ 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.

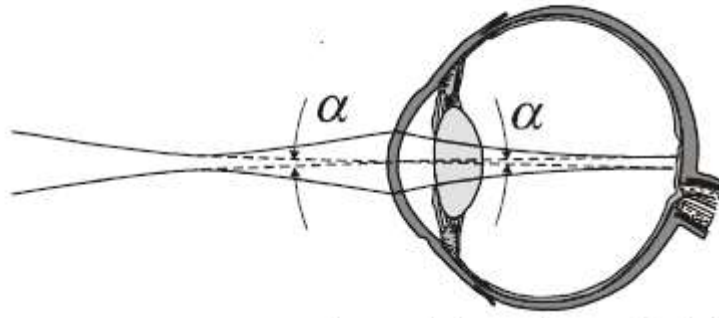
برای باریکه‌های دارای واگرایی کم، مکان چشمه ظاهری در بی‌نهایت و α برابر با واگرایی باریکه است. هرچند که زاویه α نباید با واگرایی باریکه اشتباه شود. زاویه دید چشمه ظاهری برای باریکه لیزری که به چشم برخورد می‌کند هیچوقت نمی‌تواند بزرگتر از واگرایی باریکه لیزر باشد، اما می‌تواند کوچکتر باشد (به شکل ۵ مراجعه شود). در علم اپتیک تمایز بین یک چشمه نقطه‌ای و چشمه گسترده مرسوم است. در متن‌های مرتبط با زمینه ایمنی لیزر، چشمه‌های گسترده به چشمه‌های گسترده متوسط^۳ و چشمه‌های گسترده بزرگ^۴ 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



شکل ۵- پارامتر α برای یک موقعیت مکانی معین چشم در باریکه، زاویه‌ای که چشمه ظاهری می‌سازد به نحوی 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 درجه‌های 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 درجه محدود کننده بستگی داشته باشد.

برای شبکیه، با توجه به قطر یک مردمک باز، قطر درجه برای متوسط‌گیری برابر با ۷ mm تعیین شده است. هنگام استفاده از درجه‌های 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.

به منظور توضیح دادن درجه‌های متوسط‌گیری، نقاط داغ کوچک تابشی در اثر تمرکز نور که در باریکه پهن‌تری قرار دارند باید تشخیص داده شوند. با در نظر گرفتن آن‌ها، درجه‌های متوسط‌گیری که در زیر توضیح داده می‌شوند، در صورتی که قطر باریکه از درجه متوسط‌گیری خیلی کوچک‌تر نباشد، همچنان برای شرایط نقاط داغ کوچک تابش نیز معتبر هستند.

در صورت پراکنده شدن نور در بافت از نظر بیولوژیکی، درجه یک میلی‌متری انتخاب می‌شود. بنابراین در شرایط پرتوگیری پالسی قرنیه و زجاجیه با پرتوهای فرابنفش و فروسرخ با طول موج‌های بیش‌تر از $1.4 \mu\text{m}$ ، درجه یک میلی‌متری پیشنهاد می‌شود.

درجه متوسط‌گیری 3.5 mm برای هر دو حالت پرتوگیری پالسی و پیوسته پوست که پراکندگی نور بیش‌تر روی می‌دهد، توجیه‌پذیر به نظر می‌رسد. به علاوه، 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 3.5 mm ، منتفی شود. برای پرتوگیری پیوسته قرنیه و زجاجیه با پرتوهای فرابنفش با طول موج‌های کم‌تر از 400 nm نیز شرایط به همان گونه 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، به ندرت در شدت‌های تابش موضعی بسیار زیاد در سطوح با قطر کمتر از ۳٫۵ mm منظور می‌شوند.

مشکل دیگر در ناحیه فرسرخ دور در طول موج‌های بالاتر از ۱۰۰ μm بروز می‌کند، به این صورت که با دریچه یک میلی‌متری پراش^۱ 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 تقریباً 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 محدود کننده براساس ناحیه پرتوگیری	
		چشم mm	پوست mm
$180 \leq \lambda < 400$	۱٫۰ ns - ۰٫۳۵ s	۱٫۰	۳٫۵
	۰٫۳۵ ns - ۱۰ s	$1.5 t^{-1/375}$	۳٫۵
	۱۰ s - ۳۰ ks	۳٫۵	۳٫۵
$400 \leq \lambda < 1400$	۱ ns - ۳۰ ks	۷٫۰	۳٫۵
$1400 \leq \lambda < 10^5$	۱٫۰ ns - ۰٫۳۵ s	۱٫۰	۳٫۵
	۰٫۳۵ ns - ۱۰ s	$1.5 t^{-1/375}$	۳٫۵
	۱۰ s - ۳۰ ks	۳٫۵	۳٫۵
$10^5 \leq \lambda < 10^6$	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 قابل توجهی 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 $1/e$ برابر یا 0.37 مقدار بیشینه شدت تابش است به عنوان قطر باریکه در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵ زاویه پذیرش

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

برای منابع نقطه‌ای، زاویه پذیرش 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 بزرگ 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.

جدول ۳- 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	$\geq \alpha_{min}^b$
بزرگ یکنواخت	گرمایی فتوشیمیایی	تابندگی	تمامی مقادیر	α
متوسط یکنواخت	فتوگرمایی	شدت تابش	تمامی مقادیر	$\geq \alpha$
متوسط غیریکنواخت	فتوگرمایی	شدت تابش	تمامی مقادیر	به اندازه کافی کوچک $\alpha_{min} \leq \gamma \leq \alpha_{max}$
$\alpha \leq 11$ mrad	فتوشیمیایی	شدت تابش	10 s - 10 ks	$\geq \alpha$
$\alpha > 11$ mrad	فتوشیمیایی	شدت تابش	10 s - 100 s	11
			100 s - 10 ks	$1/1 t^{1/5}$
			10 ks - 30 ks	110

^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 (۳۰ ks - ۱۰ s) 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 $\gamma_{ph} = 11 \text{ mrad}$ 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 ۱۰ ks است و اندازه منبع $\alpha > \gamma_{ph}$ است، برای مقایسه نتیجه با حد پرتوگیری بر حسب شدت تابش، باید از زاویه پذیرش $\gamma_{ph} = 11 \times t^{1/5} \text{ mrad}$ 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 بر حسب شدت تابش بیان شده‌است باید ۱۱۰ میلی‌رادیان باشد. زاویه راس مخروط برابر با ۱۱ یا ۱۱۰ میلی‌رادیان به ترتیب تقریباً با زاویه فضایی برابر با 10^{-4} یا 10^{-2} 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 شبکه‌های ناشی از گرما و ناشی از آثار فتوشیمیایی حدود پرتوگیری جداگانه‌ای بر حسب 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 شبکه‌ها، 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):

$$EL_B = EL_{B\cdot min} C_B(\lambda) \quad (9)$$

ضریب تصحیح، C_B (به شکل ۶ و جدول ۴ مراجعه شود) که برای $400 \text{ nm} < \lambda \leq 600 \text{ nm}$ 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 حاصل ضرب کمترین حد پرتوگیری $EL_{Th\cdot min}$ در آن محدوده (که حد پرتوگیری برای محدوده طول موج مرئی است) در ضریب تصحیح ترکیبی^۱، $C_A(\lambda) C_C(\lambda)$:

$$EL_{Th} = EL_{Th\cdot min} C_A(\lambda) C_C(\lambda) \quad (10)$$

ضریب تصحیح، C_A (به شکل ۷ و جدول ۴ مراجعه شود)، که برای $400 \text{ nm} < \lambda \leq 1400 \text{ nm}$ تعریف شده است، با نحوه وابستگی جذب پیگمنت اپیتلیوم^۲ در شبکیه به طول موج مرتبط است و برای حدود پرتوگیری پوست نیز به کار می‌رود.

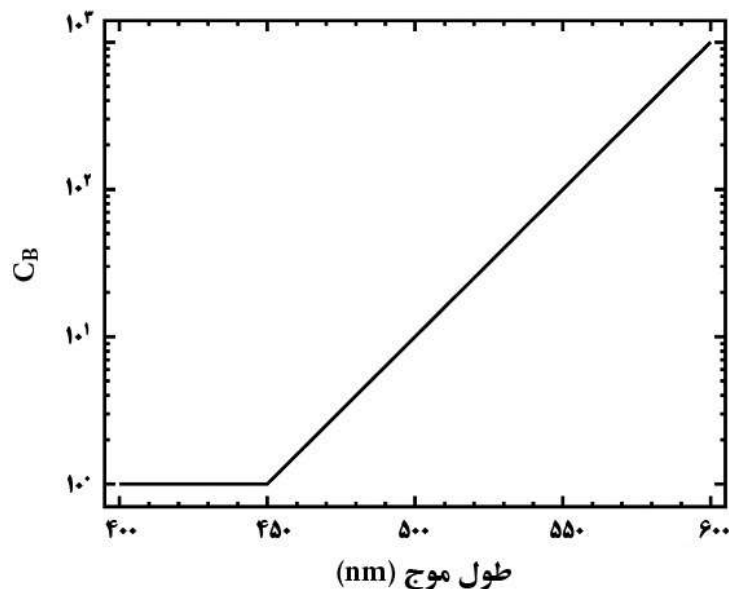
ضریب تصحیح، C_C (به شکل ۷ و جدول ۴ مراجعه شود)، که برای $700 \text{ nm} < \lambda \leq 1400 \text{ nm}$ تعریف شده است، براساس وابستگی عبور محیط شفاف پیش - شبکیه به طول موج است.

جدول ۴- ضرایب تصحیحی که در حدهای پرتوگیری در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک به کار رفته‌اند

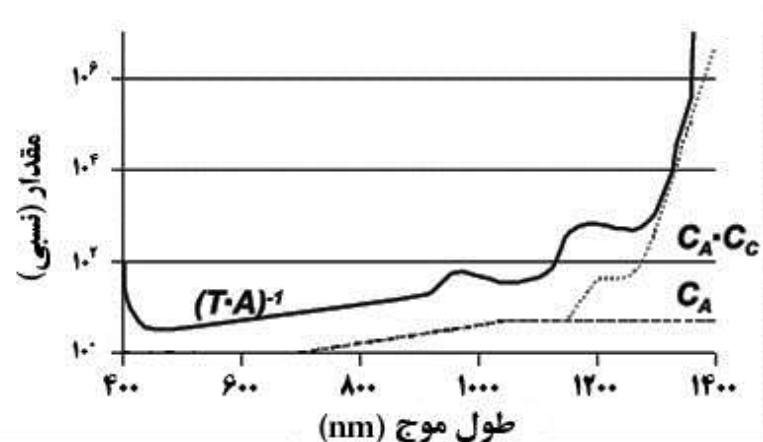
$400 \text{ nm} \leq \lambda < 700 \text{ nm}$	برای	$C_A = 1.0$
$700 \text{ nm} \leq \lambda < 1050 \text{ nm}$	برای	$C_A = 1.0^{-(\lambda/1000 - 700)^2}$
$1050 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$	برای	$C_A = 5.0$
$400 \text{ nm} \leq \lambda < 450 \text{ nm}$	برای	$C_B = 1.0$
$450 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$	برای	$C_B = 1.0^{-(\lambda/1000 - 450)^2}$
$700 \text{ nm} \leq \lambda < 1150 \text{ nm}$	برای	$C_C = 1.0$
$1150 \text{ nm} \leq \lambda < 1200 \text{ nm}$	برای	$C_C = 1.0^{-(\lambda/1000 - 1150)^2}$
$1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$	برای	$C_C = \lambda + 1.0^{-(\lambda/1000 - 1250)^2} a$
<p>^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 بر مبنای زیرنویس c جدول ۷ مقایسه شود. مقدار کمتر بین این دو حد، اعمال می‌شود.</p>		

¹ Combined

² Pigment epithelium



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



شکل ۷-مقایسه بستگی طیفی ضرایب تصحیح C_A و C_C به میزان جذب طیفی مؤثر نسبی در RPE¹. 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 به صورت نقطه چین 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 به طور فزاینده‌ای کدر می‌شود، افزایش می‌یابد.

¹ Retinal pigmented epithelial

پرتوگیری از باریکه‌های همگرا شده^۱ لیزر در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر کم‌ترین اندازه تصویر را روی شبکه ایجاد می‌کند (چشمه نقطه‌ای). برای یک توان معین، این شرط پرتوگیری منجر به کم‌ترین حد برای آستانه آسیب می‌شود. بنابراین، حدود پرتوگیری برای آسیب شبکه ناشی از گرما با پیش‌شرط کوچک‌ترین چشمه^۲ بیان می‌شود. پرتوگیری از چشمه‌های گسترده با یک ضریب تصحیح، C_E ، که به زاویه دید^۳ دید^۳ چشمه ظاهری، α ، بستگی دارد بیان می‌شود. (به معادله ۱۱ مراجعه شود که برای طول موج‌های بزرگ‌تر از ۱۰۵۰ نانومتر اعمال می‌شود).

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

ضریب تصحیح C_E (جدول ۵) برای لحاظ کردن تغییرات آستانه آسیب شبکه با اندازه تصویر، که با زاویه چشمه ظاهری مشخص می‌شود، به کار می‌رود (شکل ۴).
حدود پرتوگیری به صورت حاصلضرب C_E در حدود پرتوگیری چشمه نقطه‌ای (یعنی "پیش‌فرض" یا بدترین شرایط برای مشاهده یک چشمه لیزری) بیان می‌شود.

جدول ۵- ضریب تصحیح برای لحاظ کردن تأثیر اندازه چشمه

برای چشمه‌هایی که زاویه α (برحسب میلی‌رادیان) را ایجاد می‌کنند		
$\alpha \leq \alpha_{min}$	برای	$C_E = 1.0$
$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$	برای	$C_E = \alpha / \alpha_{min}$
$\alpha \geq \alpha_{max}$ (با $\gamma = \alpha_{max}$) ^a	برای	$C_E = \alpha_{max} / \alpha_{min}$
$t < 625 \mu s$ ^b	برای	$\alpha_{max} = 5 \text{ mrad}$
$625 \mu s \leq t \leq 0.25 \text{ s}$	برای	$\alpha_{max} = 200 \cdot t^{1/5} \text{ mrad}$
$t > 0.25 \text{ s}$	برای	$\alpha_{max} = 100 \text{ mrad}$
		و
		$\alpha_{min} = 1.5 \text{ mrad}$
^a توجه: برای $\alpha > \alpha_{max}$ حد پرتوگیری می‌تواند برحسب تابندگی بیان شود. نماد γ به اندازه‌گیری میدان دید ^۴ (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 انرژی 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 به صورت 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 شبکه‌های وقتی که به صورت تابندگی در شبکه بیان می‌شود، اساساً مستقل از اندازه تصویر است. حدود پرتوگیری برای چشمه‌های بزرگ در زوایای بزرگتر از α_{max} می‌توانند با کمیت‌های متفاوتی، یعنی تابندگی^۱ ($W m^{-2} sr^{-1}$) و انتگرال زمانی تابندگی^۲ (دز تابندگی) با واحد $J m^{-2} sr^{-1}$ بیان شوند. حدود پرتوگیری برای چشم در جدول‌های ۷ و ۸ و مقادیر پارامترهای به کار رفته در این جدول‌ها، در جداول ۳، ۴ و ۵ آمده‌است. به منظور 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 شبکه 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 شبکه 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 شبکه بر اساس تابندگی یا دز تابندگی نیز امکان‌پذیر است که چنانچه از میدان دید مناسب برای متوسط‌گیری به منظور 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 شبکه در مورد منابع بزرگ ($\alpha > \alpha_{max}$) و همچنین برای آسیب‌های فتوشیمیایی شبکه در مورد تمامی منابع با هر ابعادی ارائه شده‌است.

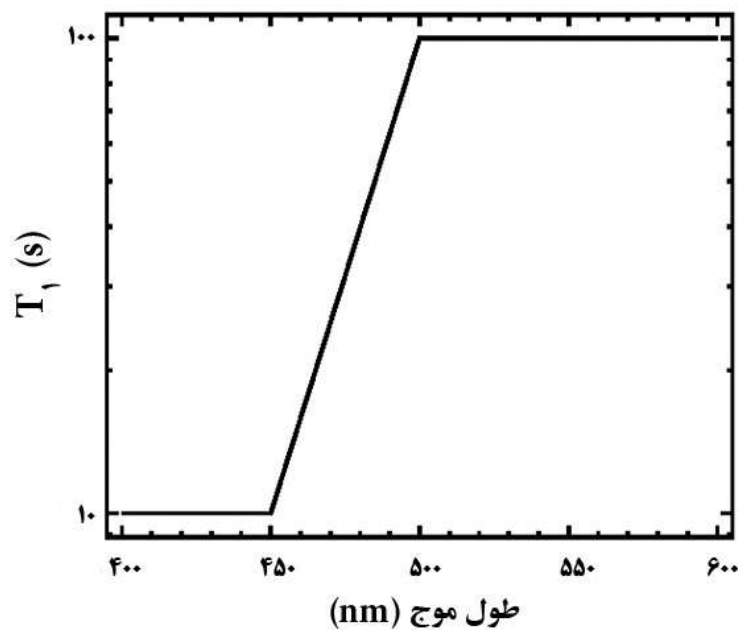
برای مدت‌های پرتوگیری کوتاه‌تر از موارد ارائه شده در جدول‌های ۷ و ۸ (مثلاً کمتر از یک نانوثانیه در محدوده طول موج فرابنفش)، پرتوگیری باید به مقدار شدت تابش محدود شود که با استفاده از حد پرتوگیری داده شده برحسب دز تابشی برای مدت پرتوگیری کمتر (مثلاً یک نانوثانیه) محاسبه شده است.

زمان T_1 (به جدول ۶ و شکل ۸ مراجعه شود) برای چشمه‌های کوچک $\alpha \leq \alpha_{min}$ ($C_E = 1/0$)، به کار می‌رود، و زمان پرتوگیری بحرانی است که برای کمتر از آن حد پرتوگیری گرمایی شبکه 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.

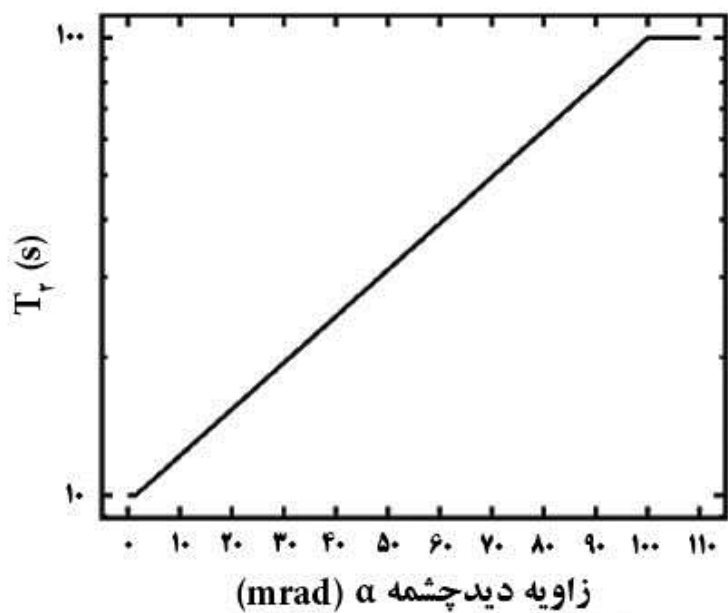
¹ Radiance

² Time-integrated radiance



شکل ۸- نمودار زمان بحرانی پرتوگیری، T_1 ، بر حسب طول موج.

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



شکل ۹- بستگی T_2 به زاویه دید چشمه

جدول ۶- مقادیر T_1 و T_r برای تعیین حدود پرتوگیری

$\lambda < 450 \text{ nm}$	برای	$T_1 = 10 \text{ s}$
$450 \text{ nm} \leq \lambda < 500 \text{ nm}$	برای	$T_1 = 10 \times 10^{-(\lambda/500 - 450)^2} \text{ s}$
$\lambda \geq 500 \text{ nm}$	برای	$T_1 = 100 \text{ s}$
$\alpha < 1.5 \text{ mrad}$	برای	$T_r = 10 \text{ s}$
$1.5 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$	برای	$T_r = 10 \times 10^{-(\alpha/100 - 1.5)^2} \text{ s}$
$\alpha > 100 \text{ mrad}$	برای	$T_r = 100 \text{ s}$

جدول ۷- حدود پرتوگیری چشم با پرتوهای لیزری، بیان شده بر حسب شدت تابش برای قرنیه؛ حدود برای شبکه بر حسب توان یا انرژی عبورکننده از دریچه‌ای با اندازه ۷ mm نیز ارائه شده است.^a و^b

محدودیت‌ها	حد پرتوگیری توان یا انرژی عبوری از دریچه ۷ میلی‌متری	حد پرتوگیری شدت تابش یا دُز تابشی	مدت پرتوگیری		طول موج nm
			حد بالا	حد پایین	
اندازه دریچه ^b : برای $t < 0.35 \text{ s}$ برابر با ۱ mm برای $0.35 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$ برابر با $1.5t^{0.375} \text{ mm}$ برای $t > 10 \text{ s}$ برابر با ۳.۵ mm					فرابنفش
		$30 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$180 \leq \lambda < 302$
		$40 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$302 \leq \lambda < 303$
		$60 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$303 \leq \lambda < 304$
		$100 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$304 \leq \lambda < 305$
		$160 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$305 \leq \lambda < 306$
		$250 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$306 \leq \lambda < 307$
		$400 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$307 \leq \lambda < 308$
		$630 \text{ J m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$308 \leq \lambda < 309$
		$1.0 \text{ kJ m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$309 \leq \lambda < 310$
		$1.6 \text{ kJ m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$310 \leq \lambda < 311$
		$2.5 \text{ kJ m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$311 \leq \lambda < 312$
		$4.0 \text{ kJ m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$312 \leq \lambda < 313$
		$6.3 \text{ kJ m}^{-2} *$	۳۰ ks	۱ ns	$313 \leq \lambda < 315$

ادامه جدول ۷

		$5,6 t^{1/25} \text{ kJ m}^{-2}$	۱۰ s	۱ ns	$315 \leq \lambda < 400$
		10 kJ m^{-2}	۳۰ ks	۱۰ s	$315 \leq \lambda < 400$
* در محدوده $180 \text{ nm} \leq \lambda < 315 \text{ nm}$ و برای مدت پرتوگیری ۱ ns تا ۱۰ s حد پرتوگیری همچنین نباید بیشتر از $5,6 t^{1/25} \text{ kJ m}^{-2}$ در نظر گرفته شود.					
برای تمامی موارد اندازه درجه برابر با $\gamma \text{ mm}$					نور مرئی ^c
	$3,8 \times 10^{-8} C_E \text{ J}$	$1,0 C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۱۰ ps	۱۰۰ fs	$400 \leq \lambda < 700$
	$7,7 \times 10^{-8} C_E \text{ J}$	$2,0 C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۵ μs	۱۰ ps	$400 \leq \lambda < 700$
	$7 \times 10^{-8} C_E t^{1/25} \text{ J}$	$18 C_E t^{1/25} \text{ J m}^{-2}$	۱۰ s	۵ μs	$400 \leq \lambda < 700$
					حدود دوگانه پرتوگیری با لیزرهای نور مرئی در محدوده طول موج ۴۰۰ الی ۶۰۰ نانومتر با زمان پرتوگیری بیشتر از ۱۰ ثانیه
					فتوشیمیایی ^e
۱) برای $\alpha > \gamma_{ph}$ از $\gamma = \gamma_{ph} \text{ mrad}$ استفاده کنید.	$3,9 \times 10^{-3} C_B \text{ J}$	$1,0 C_B \text{ J m}^{-2}$	۱۰۰ s	۱۰ s	$400 \leq \lambda < 600$
۲) برای $\gamma_{ph} \leq \alpha$ محدودیتی اعمال نمی‌شود.	$39 C_B \mu\text{W}$	$1,0 C_B \text{ W m}^{-2}$	۳۰ ks	۱۰۰ s	$400 \leq \lambda < 600$
					گرمایی ^e
برای $\alpha \leq 1,5 \text{ mrad}$	$0,39 \text{ mW}$	$1,0 \text{ W m}^{-2}$	۳۰ ks	۱۰ s	$400 \leq \lambda < 700$
برای $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$	$7,0 \times 10^{-8} C_E t^{1/25} \text{ J}$	$18 C_E t^{1/25} \text{ J m}^{-2}$	$T_r \text{ s}$	۱۰ s	$400 \leq \lambda < 700$
برای $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$	$7,0 \times 10^{-8} C_E T_r^{-1/25} \text{ W}$	$18 C_E T_r^{-1/25} \text{ W m}^{-2}$	۳۰ ks	$T_r \text{ s}$	$400 \leq \lambda < 700$
برای درجه با اندازه $\gamma \text{ mm}$					فروسرخ با طول موج کوتاه ^d
	$3,8 \times 10^{-8} C_E \text{ J}$	$1,0 C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۱۰ ps	۱۰۰ fs	$700 \leq \lambda < 1050$
	$7,7 \times 10^{-8} C_A C_E \text{ J}$	$2,0 C_A C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۵ μs	۱۰ ps	$700 \leq \lambda < 1050$
	$7,0 \times 10^{-8} C_A C_E t^{1/25} \text{ J}$	$18 C_A C_E t^{1/25} \text{ J m}^{-2}$	۱۰ s	۵ μs	$700 \leq \lambda < 1050$
	$3,8 \times 10^{-8} C_C C_E \text{ J}$	$1,0 C_C C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۱۰ ps	۱۰۰ fs	$1050 \leq \lambda < 1400$
	$7,7 \times 10^{-8} C_C C_E \text{ J}$	$2,0 C_C C_E \text{ mJ m}^{-2}$	۱۳ μs	۱۰ ps	$1050 \leq \lambda < 1400$
	$3,5 \times 10^{-8} C_C C_E t^{1/25} \text{ J}$	$9,0 C_C C_E t^{1/25} \text{ J m}^{-2}$	۱۰ s	۱۳ μs	$1050 \leq \lambda < 1400$
برای $\alpha \leq 1,5 \text{ mrad}$	$3,9 \times 10^{-8} C_A C_C \text{ W}$	$1,0 C_A C_C \text{ W m}^{-2}$	۳۰ ks	۱۰ s	$700 \leq \lambda < 1400$

ادامه جدول ۷

برای $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$	$7,0 \times 10^{-7} C_A C_C C_E t^{1/5} \text{ J}$	$18 C_A C_C C_E t^{1/5} \text{ J m}^{-2}$	$T_r \text{ s}$	10 s	$700 \leq \lambda < 1400$
برای $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$	$7,0 \times 10^{-7} C_A C_C C_E T_r^{-1/5} \text{ W}$	$18 C_A C_C C_E T_r^{-1/5} \text{ W m}^{-2}$	30 ks	$T_r \text{ s}$	$700 \leq \lambda < 1400$
اندازه درجه ^b : برای $t < 0,35 \text{ s}$ برابر با 1 mm برای $0,35 \leq t < 10 \text{ s}$ برابر با $1,5 t^{1/5} \text{ mm}$ برای $t \geq 10 \text{ s}$ برابر با $3,5 \text{ mm}$					فروسرخ با طول موج متوسط یا بلند ^d
		1 kJ m^{-2}	1 ms	1 ns	$1400 \leq \lambda < 1500$
		$5,6 t^{1/5} \text{ kJ m}^{-2}$	10 s	1 ms	$1400 \leq \lambda < 1500$
		10 kJ m^{-2}	10 s	1 ns	$1500 \leq \lambda < 1800$
		$1,0 \text{ kJ m}^{-2}$	1 ms	1 ns	$1800 \leq \lambda < 2600$
		$5,6 t^{1/5} \text{ kJ m}^{-2}$	10 s	1 ms	$1800 \leq \lambda < 2600$
		100 J m^{-2}	100 ns	1 ns	$2600 \leq \lambda < 1 \text{ mm}$
		$5,6 t^{1/5} \text{ kJ m}^{-2}$	10 s	100 ns	$2600 \leq \lambda < 1 \text{ mm}$
		1 kW m^{-2}	30 ks	10 s	$1400 \leq \lambda < 1 \text{ mm}$

^a t بر حسب ثانیه.

^b برای زمان پرتوگیری t ، حد بالایی $t < \leq$ حد پایینی است. به عنوان مثال چنانچه حد پایینی زمان پرتوگیری 100 fs و حد بالایی آن 10 ps است، آنگاه $10 \text{ ps} \leq t < 100 \text{ fs}$. همچنین اگر حد پایینی زمان پرتوگیری 10 ps و حد بالایی آن $5 \mu\text{s}$ باشد، آنگاه $10 \text{ ps} \leq t < 5 \mu\text{s}$.

^c چنانچه قطر باریکه کم تر از یک میلی متر و عرض پالس کم تر از $0,35 \text{ s}$ باشد، آنگاه مقدار واقعی شدت تابش و نه میانگین آن روی درجه به قطر یک میلی متر باید با حد پرتوگیری مقایسه شود.

^d در محدوده طول موج های مرئی برای لکه های بزرگ روی شبکه، حد گرمایی پرتوگیری شبکه چشم که بر حسب دز تابشی قرنیه داده شده است ممکن است از حد پرتوگیری پوست بیش تر باشد. در این شرایط به منظور حفاظت از قسمت های بیرونی چشم، حد پرتوگیری پوست هم برای چشم اعمال می شود. برای پرتوگیری چشم فقط در محدوده طول موج های 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 به عنوان حد دوم) وقتی مطرح است که فقط چشم پرتوگیری می کند.

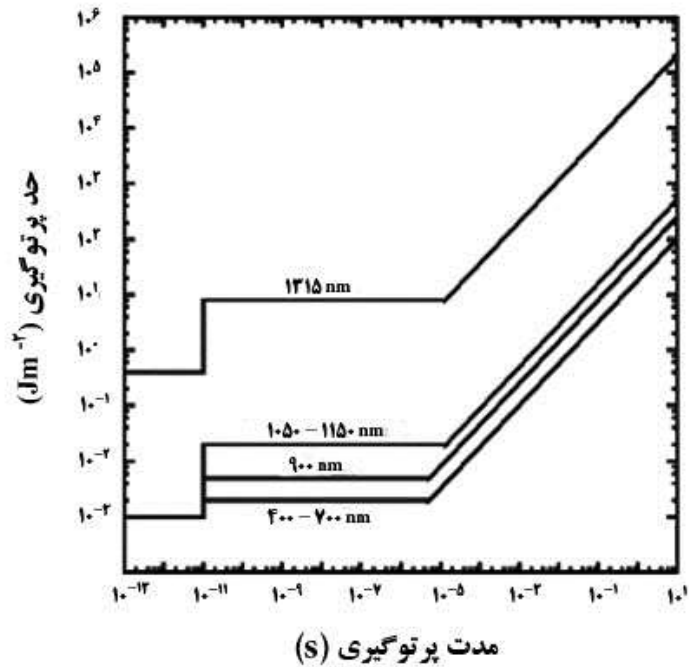
^e برای منابع کوچک با زاویه دید $1,5 \text{ mrad}$ یا کمتر، حدود دوگانه پرتوگیری در محدوده طول موج های 400 الی 600 نانومتر، برای زمان های بیشتر از 10 ثانیه و کمتر از T_1 به حدود گرمایی و برای زمان های بیشتر از 10 ثانیه و بیشتر از T_1 به حدود فتوشیمیایی کاهش می یابد (به جداول ۴، ۵ و ۶ مراجعه شود).

جدول ۸- حدود پرتوگیری چشم با پرتوهای لیزر در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر برحسب تابندگی یا دز تابندگی

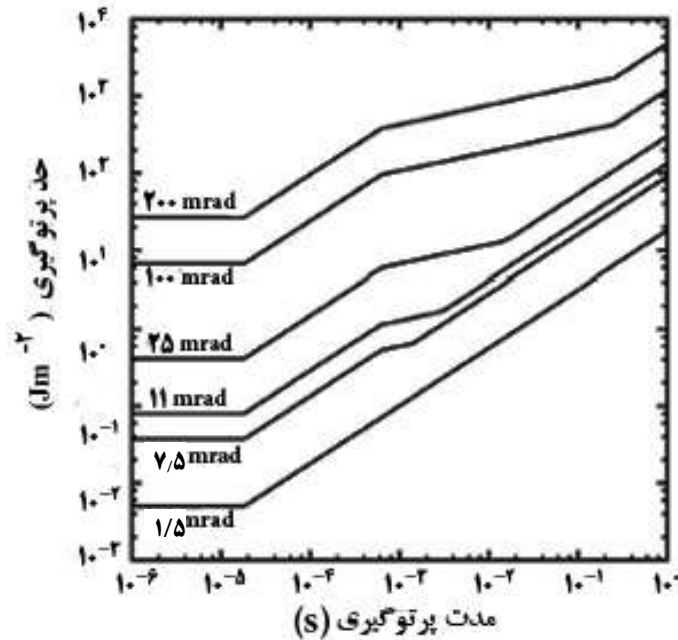
محدودیت‌ها	مدت پرتوگیری		طول موج nm	
	حد پرتوگیری تابندگی یا دز تابندگی	حد بالایی حد پایینی		
			نور مرئی	
			برای $t \leq 10$ s و $\alpha \geq \alpha_{max}$	
کلیه موارد فقط برای منابع بزرگ با تابندگی ثابت	$0.17 \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	10 ps	100 fs	$400 \leq \lambda < 700$
	$0.34 \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	50 μs	10 ps	$400 \leq \lambda < 700$
	$3.1 t^{1/75} \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	0.625 ms	50 μs	$400 \leq \lambda < 700$
	$76 t^{1/25} \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	0.25 s	0.625 ms	$400 \leq \lambda < 700$
	$0.15 t^{1/75} \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	10 s	0.25 s	$400 \leq \lambda < 700$
				برای $t \geq 10$ s؛ حدود دوگانه
حدود تابندگی بر اساس اثرات فتوشیمیایی برای همه α ها معتبر است، اما متوسط‌گیری پرتوگیری باید بر اساس γ_{ph} صورت گیرد.				فتوشیمیایی
	$1.0 C_B \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	10 ks	10 s	$400 \leq \lambda < 600$
	$100 C_B \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	30 ks	10 ks	$400 \leq \lambda < 600$
				گرمایی برای $\alpha \geq 100$ mrad
	$0.15 t^{1/75} \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	100 s	10 s	$400 \leq \lambda < 700$
	$47 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	30 ks	100 s	$400 \leq \lambda < 700$
				فروسرخ با طول موج کوتاه
				برای $\alpha \geq \alpha_{max}$
	$0.17 \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	10 ps	100 fs	$700 \leq \lambda < 1400$
	$0.34 C_A C_C \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	50 μs	10 ps	$700 \leq \lambda < 1400$
	$3.1 t^{1/75} C_A C_C \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	0.625 ms	50 μs	$700 \leq \lambda < 1400$
	$76 t^{1/25} C_A C_C \text{ kJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	0.25 s	0.625 ms	$700 \leq \lambda < 1400$
	$0.15 t^{1/75} C_A C_C \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	10 s	0.25 s	$700 \leq \lambda < 1400$
	$1.0 C_A C_C \text{ W m}^{-2}$	30 ks	10 s	$700 \leq \lambda < 1400$
	$0.15 t^{1/75} C_A C_C \text{ MJ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	100 s	10 s	$700 \leq \lambda < 1400$
	$47 C_A C_C \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	30 ks	100 s	$700 \leq \lambda < 1400$

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 شبکه به مدت زمان پرتوگیری برای تعدادی از زوایای دید منبع نور در شکل ۱۱ ارائه شده‌است.

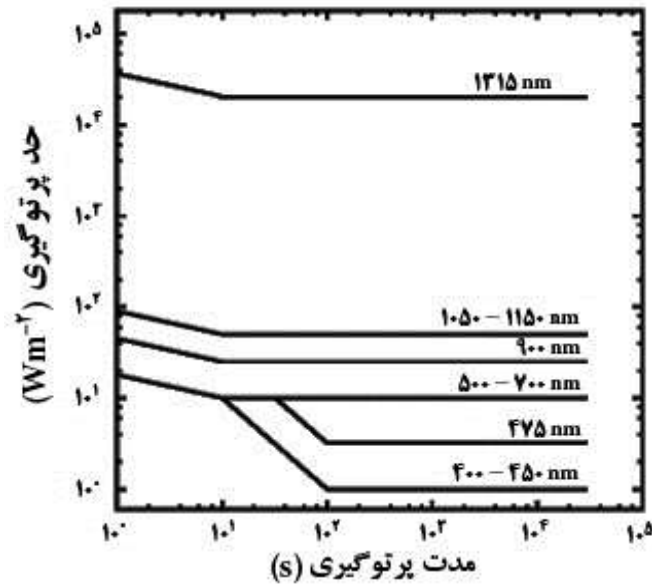


شکل ۱۰- حدود پرتوگیری از لیزرهای پالسی به عنوان منابع نور نقطه‌ای برای طول موج‌های ۴۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر

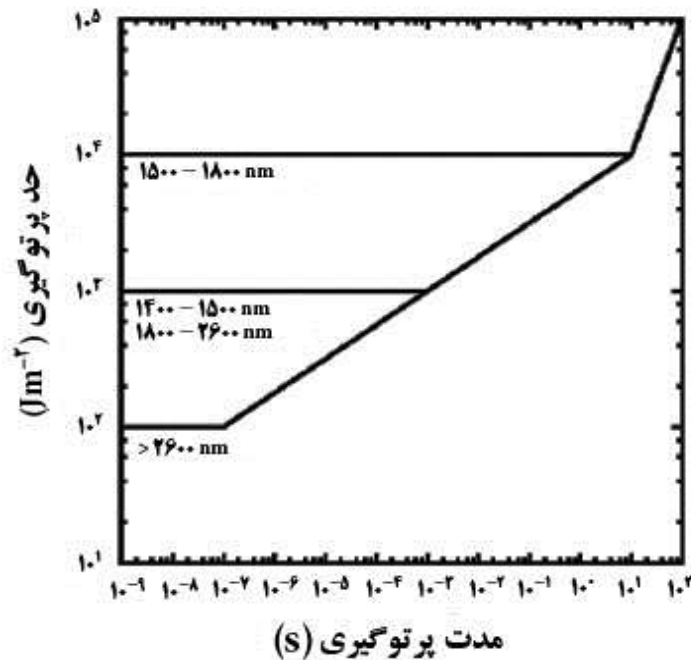


شکل ۱۱- نمودار وابستگی حدود گرمایی شبکه به مدت زمان پرتوگیری برای تعدادی از زوایای دید منبع نور برای طول موج‌های ۴۰۰ الی ۷۰۰ نانومتر

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 فرسرخ میانی و دور در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۲- 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 فرسرخ میانی و دور

۷ حدود پرتوگیری پوست

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

جدول ۹- حدود پرتوگیری پوست از پرتوهای لیزر^a

محدودیت‌ها	حد پرتوگیری شدت یا دُز تابشی	مدت پرتوگیری		طول موج nm
		حد بالا	حد پایین	
				فرابنفش
دریچه با اندازه ^b ۳/۵ mm	مانند حدود پرتوگیری برای چشم به جدول ۷ مراجعه شود.	۳۰ ks	۱ ns	$180 \leq \lambda < 400$
دریچه با اندازه ^b ۳/۵ mm				نور مرئی و فرورسرخ با طول موج کوتاه
	$200 C_A J m^{-2}$	۱۰۰ ns	۱ ns	$400 \leq \lambda < 1400$
	$11 C_A t^{1/25} kJ m^{-2}$	۱۰ s	۱۰۰ ns	$400 \leq \lambda < 1400$
	$210 C_A kW m^{-2}$	۳۰ ks	۱۰ s	$400 \leq \lambda < 1400$
				فرورسرخ با طول موج متوسط یا بلند ^c
دریچه با اندازه ^b ۳/۵ mm	مانند حدود پرتوگیری برای چشم به جدول ۷ مراجعه شود.	۳۰ ks	۱ ns	$1400 \leq \lambda < 1 \text{ mm}$

^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 ۱۴۰۰ nm، مدت پرتوگیری بیشتر از ۱۰ s و مساحت سطحی از پوست که پرتوگیری می‌کند بیشتر از 0.1 m^2 ، حد پرتوگیری به 100 W m^{-2} کاهش می‌یابد. چنانچه مساحت سطحی از پوست که پرتوگیری می‌کند بین 0.1 مترمربع (که برای آن حد پرتوگیری 1000 W m^{-2} است) و 0.1 متر مربع (که حد پرتوگیری 100 W m^{-2} 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^۱ جذب یکی باشد، مثلاً قرنیه یا شبکیه، و مکانیسم آسیب هم یکسان باشد، مثلاً گرمایی، ترمومکانیکی یا فتوشیمیایی، اثرات به‌طور طیفی جمع‌پذیر در نظر 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، مثلاً 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 در صورت 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^۲.

باریکه‌های اسکنر، باعث پرتوگیری تکراری پالسی چشم می‌شوند. هم‌زمان 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 نانو ثانیه 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 شبکه، یک ضریب اضافی C_P نیز با شرایط زیر به حد مربوط به یک تک پالس اعمال می‌شود. مقدار C_P برابر با $n^{-0.75}$ است (به جز در مواردی که غیر از آن ذکر شده باشد) که در آن n تعداد دفعات تکرار پالس‌ها در مدت زمان پرتوگیری T_i است (به جدول ۶ مراجعه شود).
- الف - برای $\alpha \leq 5 \text{ mrad}$ با عرض پالس بیش‌تر از T_i ($5 \mu\text{s}$ برای طول موج‌های 400 الی 1050 نانومتر)، $C_P = 1.0$ است.
- ب - برای $\alpha > 5 \text{ mrad}$ با عرض تک پالس بیش‌تر از T_i ، چنانچه $\alpha \leq \alpha_{max}$ و $n > 40$ باشد، $C_P = 0.4$ ، و در صورتی که $\alpha > \alpha_{max}$ و $\alpha < 100 \text{ mrad}$ و $n > 625$ باشد، $C_P = 0.2$ و اگر $\alpha \geq 100 \text{ mrad}$ باشد، $C_P = 1.0$ است.
- ج - برای عرض پالس کم‌تر یا مساوی T_i ، و مدت زمان پرتوگیری کم‌تر یا مساوی با 0.25 s ، $C_P = 1.0$ است. برای مدت پرتوگیری (مورد استفاده در ارزیابی ایمنی به عنوان بیش‌ترین زمان مورد انتظار برای پرتوگیری) طولانی‌تر از 0.25 s و بیش‌تر از 600 پالس در مدت پرتوگیری، $C_P = 5 n^{-0.75}$ است. در شرایطی که پرتو مرئی است، این محدودیت فقط برای پرتوگیری‌های عمدی اعمال می‌شود.

۱۰ پرتوگیری‌های مزمن

پرتوگیری مزمن از تابش لیزر معمولاً به‌ندرت پیش می‌آید. مجموعه تجربیات حاصل از لیزرهای درحال استفاده هیچ شاهدهی 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 300 الی 400

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^۱ سلول‌های مخروطی^۲ 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