

ناحیه خطر (NHZ) در کار با لیزر

فاطمه ویسی^۱
شهریار ابوالحسینی^۲

خلاصه

مقدمه: امروزه به کارگیری لیزر در جراحی و درمان، گستره وسیعی از پژوهش‌های محققان و دانشمندان را به خود اختصاص داده است. یکی از مهم‌ترین خصوصیات رفتاری لیزر به‌هنگام برخورد با بافت، اثرات گرمایی و حرارتی آن می‌باشد.

روش بررسی: سازوکارهای آسیب زیست‌شناختی ناشی از نور لیزر هم شامل اثرات گرمایی حاصل از انرژی جذب‌شده و همچنین واکنش‌های فوتوشیمیایی است. به‌علت توان بالای برخی از آن‌ها پرتوگیری بسیار کوتاه‌مدت لیزر نیز اثرات جبران‌ناپذیری به‌همراه خواهد داشت. اکثر جراحات و سوانح در مراکز کار با لیزر به‌واسطه بازتاب‌های غیرمنتظره می‌باشد و پیش از آن که کاربر متوجه شود، حادثه رخ داده است. لیزرهای کلاس B۳ و ۴ قادرند از طریق اثرات گرمایی به پوست آسیب برسانند، لیکن خطر اصلی متوجه چشم می‌باشد و وخامت آسیب چشمی به انرژی، توان و زاویه تابش باریکه بستگی دارد که عمده‌ترین تغییرات وابسته به طول موج است [۳ و ۲]. در کار با پرتو، فاصله از عوامل حائز اهمیت است. با افزایش فاصله از منبع مولد پرتوی لیزر و افزایش اندازه باریکه لیزر، چگالی شدت پرتو کاهش می‌یابد از این رو با مشخص نمودن فاصله‌ای که در آن شدت پرتو کمتر از حد مجاز تابش است، می‌توان کنترل مناسب‌تری بر وضعیت کار پرتوی داشت و با ارزیابی فاصله‌های مختلف، فراخور هر حالت موارد ایمنی مشخصی را به کار برد [۴].

روش بررسی: هنگامی که بیشینه حد مجاز تابش^۱، برای لیزر مشخص شد [۳]، ناحیه خطر را می‌توان مشخص نمود. ناحیه خطر، فضای پیرامون لیزر است که مقدار پرتوی لیزر موجود در آن بیش از حد مجاز تابش است، البته سهم پرتوهای بازتابی و پراکنده لیزر را نیز باید در نظر گرفت. به‌واسطه وجود واگرایی، چنانچه فاصله از باریکه لیزر (و بازتاب‌های آن) افزایش یابد، چگالی شدت پرتو کاهش خواهد یافت [۵] و مکان‌هایی که دارای شدت کمتر از حد مجاز تابش هستند، مرز ناحیه خطر خواهد بود. لذا با تعیین ناحیه خطر برای لیزرهای مختلف می‌توان مقایسه‌ای بین لیزرهای مختلف انجام داد [۶].

یافته‌ها: لیزر فارغ از اندازه و توان، دارای خطرات بالقوه می‌باشد و ابزاری برای تفریح و سرگرمی نیست. به‌هنگام استفاده از باریکه‌های لیزر بایستی فاصله خطر را تعیین نمود. در لیزرهای پزشکی که تنوع طول موج و توان وجود دارد نیز در نظر گرفتن ناحیه خطر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

نتیجه‌گیری: کنترل اجرایی از روش‌های کنترل خطرات لیزر است. از این رو با تعیین نواحی مختلف در مراکز کار با لیزر می‌توان فراخور هر ناحیه دستورالعمل‌های خاص آن ناحیه را تدوین و اجرا نمود [۲].

واژه‌های کلیدی: ایمنی لیزر، حد مجاز تابش، ناحیه خطر

۱. کارشناس آزمایشگاه، پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران
۲. مسئول فیزیک بهداشت، پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

نویسنده مسئول: شهریار ابوالحسینی، تلفن: ۰۹۱۰۶۹۶۴۳۷۷
پست الکترونیک: sabolhosseini@aeoi.org.ir

مقدمه

بدانیم.

از این رو برای لیزرهای پالسی از قواعد زیر استفاده می‌کنیم [۳].

- در هر تک پالس از قطار پالس، پرتوگیری از مقدار حد نباید تجاوز نماید.

- در قطار پالس در مدت زمان T نباید از مقدار حد در مدت زمان T تجاوز نماید.

- برای آسیب حرارتی، پرتوگیری هر تک پالس در داخل قطار پالس‌ها نباید از مقدار حد برای تک پالس بیشتر شود.

جدول ۱: زمان پرتوگیری در بازه‌های طول موجی [۳]

ناحیه طیفی	طول موج (نانومتر)	زمان پرتوگیری
فرابنفش	۱۸۰ - ۴۰۰	مدت زمان وجود باریکه تا ۸ ساعت
نور مرئی	۴۰۰ - ۷۸۰	۰,۲۵ ثانیه
فروسرخ	۷۸۰ - ۱۰ ^۶	۱۰ ثانیه

تعیین ناحیه خطر

هنگامی که حد مجاز تابش برای لیزر مشخص شد، ناحیه خطر را می‌توان مشخص نمود. ناحیه خطر، فضای پیرامون لیزر است که چگالی شدت باریکه‌های مستقیم، بازتابی و پراکنده لیزر از حد بیشتر است. به واسطه وجود واگرایی، چنانچه فاصله از منبع لیزر (بازتاب‌های آن) افزایش یابد، شدت پرتو کاهش خواهد یافت و مکانی که مقدار شدت از حد کمتر شده باشد، به عنوان مرز ناحیه خطر در نظر گرفته خواهد شد (جدول ۱). [۳، ۴]

فاصله ناحیه خطر از رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

$$r_{\text{NHZ}} = \frac{1}{\varphi} \left[\left(\frac{4 \times P}{\pi \times \text{MPE}} \right) - a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن φ واگرایی برحسب رادیان، P شدت توان متوسط برحسب وات بر مترمربع (برای لیزرهای پیوسته) یا چگالی انرژی برحسب ژول بر مترمربع (برای لیزرهای پالسی) و a قطر باریکه خروجی لیزر برحسب سانتی‌متر است. با مطالعه و مقایسه داده‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود که با توجه به توان لیزر، فاصله ناحیه خطر تغییر می‌نماید.

پرتوهای فرابنفش از ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر، پتانسیل آسیب فوتوشیمیایی به چشم و پوست را دارند [۲]. بدین معنی که به‌هنگام استفاده از آن در درازمدت، احتمال بروز سرطان پوست و آب‌مروارید افزایش می‌یابد. بیشتر انرژی پرتوی فرابنفش به عدسی آسیب می‌رساند و باعث کدر شدن و ایجاد آب‌مروارید می‌گردد [۱۰ و ۱۱].

نور مرئی از ۴۰۰ تا ۷۸۰ نانومتر توسط چشم دیده می‌شود. همین عامل می‌تواند چشم را در برابر خطرات محافظت نماید. هرچند که در شدت‌های بالا، نور مرئی اثرات مخربی بر روی شبکه خواهد داشت [۱۰ و ۱۱].

پرتوهای مادون قرمز نزدیک ۷۸۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر، توسط چشم دیده نمی‌شوند، ولی از بخش‌های چشم عبور می‌کنند و بر روی شبکه متمرکز می‌شوند. این پرتوها برای شبکه خطر دارند و منجر به آسیب می‌شوند. بیشتر ملاحظات ایمنی در استفاده از لیزر به این ناحیه مربوط می‌شوند. پرتوهای مادون قرمز دور از ۱۴۰۰ تا ۱۰۶۰۰ نانومتر، توسط آب موجود در قرنیه جذب می‌شوند و به شبکه نمی‌رسند. طول موج‌های مادون قرمز دور می‌توانند به سایر بخش‌های چشم آسیب برسانند و جذب در ناحیه بزرگ تری پخش می‌شود. علاوه بر آن بافت‌های سلولی سریعاً جایگزین می‌شوند. این اثرات تحت عنوان اثرات آبی معرفی می‌شوند. شدت آسیب‌های شبکه به نوع بافت آسیب‌دیده نیز بستگی دارد. بافت‌های مخروطی که برای دیدن رنگ استفاده می‌شوند، در صورت آسیب به آرامی ترمیم می‌شوند ولی به حالت اول خود بر نمی‌گردند. بافت‌های استوانه‌ای که برای دیدن با نور کم استفاده می‌شود، در صورت آسیب، اندکی ترمیم می‌شوند. ایجاد زخم بر روی شبکه، اغلب به‌طور آبی اتفاق می‌افتد و باعث مشاهده یک نقطه تاریک بر روی تصویر می‌شود و این زمانی است که کاربر یا پزشک متوجه آسیب خواهد شد [۱۰ و ۱۱].

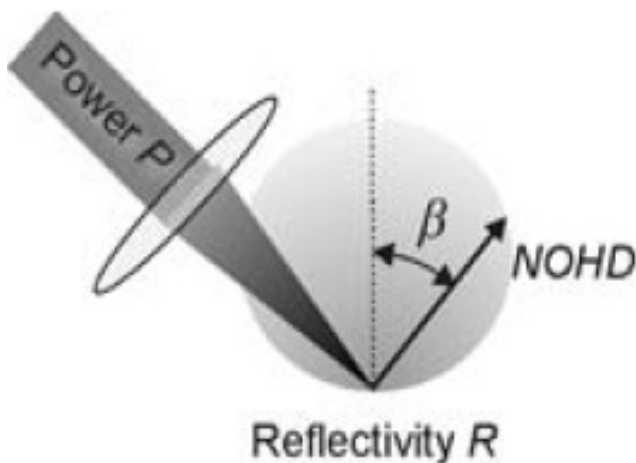
باتوجه به انواع خطرات در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی خصوصاً در محدوده‌های فوق بایستی جهت حفاظت در برابر خطرات بالقوه آن تمهیداتی اندیشید. ساده‌ترین روش، رعایت فاصله است که می‌تواند مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

روش بررسی

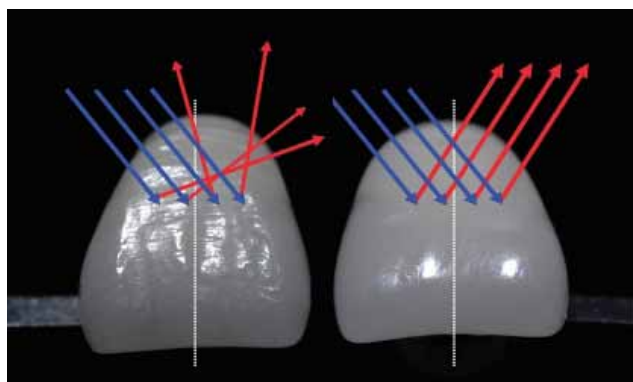
ارزیابی خطر

مبنای اصلی در ارزیابی خطر، تعیین مقدار بیشینه تابش مجاز پرتوی لیزر است. یکی از پارامترهای مهم جهت تعیین آن، مدت زمان پرتوگیری است [۸].

برای لیزرهای پیوسته می‌توانیم از جدول ۱ جهت تعیین زمان پرتوگیری استفاده نماییم. روش محاسبه برای لیزرهای پالسی پیچیده‌تر است. علاوه بر طول موج، مقدار طول پالس در نیم پهنه بیشینه قدرت لیزر را نیز باید



شکل ۲: بازتاب نور لیزر با تابش غیر عمود



شکل ۳: شبیه‌سازی بازتاب از سطح دندان

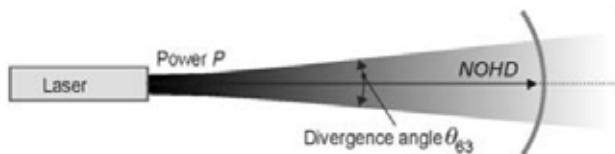
در این حالت ناحیه خطر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$NOHD = \sqrt{\frac{R P \cos\theta}{\pi MPE}} \quad (4)$$

در شکل ۴ همانند تابش لیزر از یک سطح منحنی همانند آینه دندانپزشکی است.

در این حالت ناحیه خطر از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$NOHD = \frac{2}{d_{63}} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} \quad (5)$$



شکل ۴: بازتاب نور لیزر از سطح منحنی

جدول ۱: زمان پرتوگیری در بازه‌های طول موجی [۳]

λ (nm)	P(W)	MPE(W/cm ²)	NHZ(m)
۳۸۰	۹۰	۰.۰۰۱	۱
	۳.۵		۰.۲۰
	۰.۳		۰.۰۶
۲۵۵	۰.۲۵	۳.۰×۱۰ ^{-۶}	۱
	۰.۰۱۰		۰.۲۰
	۰.۰۰۱		۰.۰۶

با توجه به آنکه در هنگام کاربرد لیزر را در جهات مختلف قرار می‌دهد (همانند لیزر دندانپزشکی) ناحیه خطر از روابط تغییر یافته دیگری نیز قابل دسترس است. در شکل‌های ۱ تا ۴ حالات مختلف نشان داده شده‌اند.

اگر در برابر باریکه لیزر یک عدسی با فاصله کانونی b قرار داشته باشد، رابطه ۱ به صورت زیر تغییر خواهد نمود:

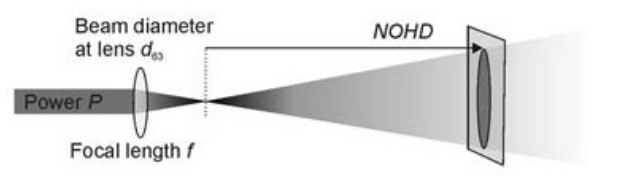
$$r_{NHZ} = \frac{b}{a} \left[\frac{4P}{\pi MPE} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در موارد کاربردی مانند استفاده از لیزر دندانپزشکی و یا پوست می‌توان با محاسبه فاصله اسمی خطر (NOHD) برآوردی از فاصله امن به دست آورد.

در این حالت ناحیه خطر از رابطه:

$$NOHD = \frac{2f}{d_{63}} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} \quad (3)$$

حالت نشان داده شده در شکل ۱ به هنگام کار با لیزرهای پوست بیشتر مشهود است. در شکل ۲ همانند تابش لیزر به دندان است، در این حالت احتمال بازتاب نور لیزر از ابزارآلات و یا نواحی پرشده دندان نیز وجود دارد. در شکل ۳، شکل شبیه‌سازی شده بازتاب از سطح دندان نشان داده شده است.



شکل ۱: ناحیه خطر نور لیزر پس از عبور از عدسی

جدول ۲: ضریب تصحیح برای طول موج‌های سبز، قرمز و آبی

رنگ	طول موج (nm)	ضریب CF
Green	555	۱/۰
Red	۶۷۰	۰/۰۳۲۱
Blue	۴۷۳	۰/۱۰۵۳۶
Cyan	۴۸۸	۰/۱۹۴۱۴
Violet	۴۰۵	۰/۰۰۰۸

ناحیه آزاد (LFZED)

در این ناحیه شدت پرتو به اندازه کافی کاهش می‌یابد و ایمن است.

$$r_{LFZED} = r_{CZED} \times 10 \quad (10)$$

محاسبات

در شکل ۱ نشانگر لیزری که امروزه در دسترس همگان قرار دارد، نشان داده شده است. از این وسیله به عنوان نشانگر و یا وسیله تفریحی استفاده می‌شود. این لیزر از نوع دیود می‌باشد و دارای توان حدود ۱۰۰۰ میلی وات، واگرایی ۲/۵ میلی رادیان و قطر باریکه ۲ میلی متر است. با قراردادن روزنه لیزر بر روی پوست در مدت چند ثانیه احساس سوزش خواهیم داشت. بر اساس روابطی که در بالا ذکر شد، فواصل خطر را برای این لیزر به ظاهر ساده محاسبه می‌نماییم، مشاهده خواهد شد که این لیزر به چه میزان خطرناک است. محاسبه فواصل در جدول ۳ آمده و به طور طرح وار در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

حال با انجام مقایسه ساده‌ای با انواع لیزرهای پزشکی و صنعتی می‌توان برآوردی از میزان خطر آن‌ها داشت. باریکه بازتابی لیزر نیز توانایی بروز حادثه را دارد، لذا در صورتی که بازتاب آینه‌ای و یا پراکنده داشته باشیم،



شکل ۵: نمونه لیزر تحت آزمون

در برخی از دستگاه‌های لیزر پزشکی باریکه لیزر به وسیله فیبر نوری هدایت می‌شود، رابطه ۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$NOHD = \frac{1.7}{NA} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} \quad (6) \text{ حالت چندمد}$$

$$r_{NHZ} = \frac{\omega}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi P}{2 MPE}} \quad \text{حالت تکمد}$$

که در آن NA، عدد روزنه فیبر نوری و ω قطر میدان مد در حالت تک مد فیبر نوری بر حسب μm می‌باشند. باتوجه به واگرایی لیزر در فواصل مختلف می‌توان انتظار اثرات متفاوتی را داشت. از این رو انواع فاصله را جهت اعمال مقررات ایمنی می‌توان تعیین نمود.

پس از محاسبه فاصله خطر، باتوجه به حساسیت سیستم بینایی به نور شدید می‌توان برآوردی از فاصله‌هایی که حساسیت خاصی بر روی چشم دارند نیز به دست آورد. این موارد معمولاً به هنگام استفاده از لیزر در فضای آزاد کاربرد دارد. لیزرهایی که جهت نمایش و یا تبلیغات استفاده می‌شوند از این دسته‌اند.

ناحیه اسمی خطر چشمی (NOHD)

در این ناحیه باریکه لیزر توانایی ایجاد آسیب جدی بر روی چشم را دارد و میزان شدت نور لیزر نباید از مقدار حد تجاوز نماید.

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{0.5 \times P} \quad (7)$$

که در آن ϕ واگرایی بر حسب میلی رادیان P توان متوسط بر حسب میلی وات است.

ناحیه حساس (SZED)

در این ناحیه باریکه دارای درخشندگی کافی می‌باشد و توانایی ایجاد اختلال موقت در بینایی را دارد.

$$r_{SZED} = \frac{1}{\phi} \sqrt{12.7 \times P \times CF} \quad (8)$$

که در آن ϕ واگرایی بر حسب میلی رادیان P توان متوسط بر حسب میلی وات است. CF ضریب تصحیح است. (جدول ۲)

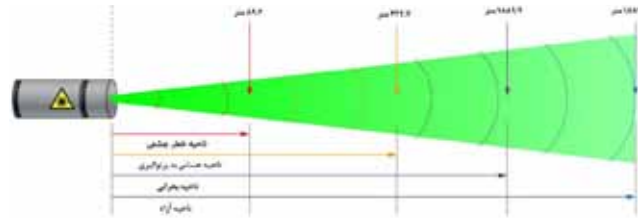
ناحیه بحرانی (CZED)

در این ناحیه روشنایی پرتو به حدی است که در صورت عدم توجه و حواس پرتی در عملکرد بینایی ایجاد اختلال می‌نماید.

$$r_{CZED} = r_{SZED} \times 4.47 \quad (9)$$

نتیجه‌گیری

لیزر فارغ از اندازه و توان دارای خطرات بالقوه می‌باشد و ابزاری برای تفریح و سرگرمی نیست و هنگام استفاده از باریکه‌های لیزر بایستی مرز ناحیه خطر را تعیین نمود. با توجه به کاربرد گسترده لیزرهای پزشکی خصوصاً جهت پاک‌سازی پوست و مو، از آنجا که عموماً دارای هندپیس با درجه آزادی حرکت و قابلیت حرکت به تمام جهات و زوایا می‌باشند، ضروری است که ناحیه اطراف لیزر مورد توجه خاص قرار گیرد. کنترل اجرایی از روش‌های کنترل خطرهای لیزر است. از این رو با تعیین نواحی مختلف در مراکز کار با لیزر می‌توان به فراخور هر ناحیه دستورالعمل‌های خاص آن ناحیه را تدوین و اجرا نمود.



شکل ۶: طرح‌واره فاصله‌های خطر

جدول ۳: اندازه فاصله‌ها برای لیزر دیود قلمی

فاصله (متر)	ناحیه
۸۹,۴	NOHZ
۴۲۲,۷۹	SZED
۱۸۸۹,۹	CZED
۱۸۸۹۹	LF

از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود:

$$R_{NHZ} = \left[\frac{\rho P \cos \theta}{\pi MPE} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

که ρ معرف ضریب بازتاب و θ زاویه بازتاب نسبت به خط عمود بر سطح است [۷۶]. در جدول ۴ محاسبات نوعی برای لیزرهای پزشکی سری Alex انجام شده است.

با مقایسه لیزرهای مختلف ذکر شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود که ناحیه خطر برای لیزرهای مختلف تفاوت دارد و ضروری است که برای هر دستگاه ارزیابی جداگانه صورت پذیرد. محاسبات و مدل‌سازی روابط فوق در نرم‌افزار متلب انجام شده است.

References:

1. Cember H. Introduction to Health Physics, 5th, Pergamon press. 1998: 554-63.
2. ISIRI 8567, Non-Ionization Exposure limits
3. ISIRI 20610, Limits of Exposure to Laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 micrometer, 2015: 15-28.
4. ISIRI 3501,
5. Svelto O., Principal of Laser, Springer, 4th Edition, 1998: 26-37.
6. ICNIRP Guideline, Health Physics 2013; 105(3): 271-95.
7. Ken Barat, Laser safety tools and training.
8. Henderson Roy, Laser Safety, IOP Publishing 2004:101-5& 334-41.
9. Markolf H. Niemz, Laser-Tissue Interactions,

جدول ۴: اندازه فاصله‌ها برای لیزر دیود قلمی

ناحیه خطر (متر)	حد مجاز تابش (ژول بر مترمربع)	اندازه لکه (میلی‌متر)	انرژی (ژول)	طول موج (نانومتر)
۰,۲۵	۴۵۷۲,۱۰۴	0.5	2	۲۹۲۶
۲	۰,۲۰۵۱۵۶	4	7	۱۰۷۹
۰,۵	۰,۳۳۸۴۵۴	1	2	۵۴۰
۱,۵	۰,۱۷۰۲۳۳	3	2	۶۹۴
۱,۵	۰,۱۷۰۲۳۳	3	2	۷۵۵