بررسی عوامل مؤثر بر انتشار لیزرهای پرانرژی در محیط‌های دریایی

محمودرضا عباسی

گروه علوم پایه، دانشکده علوم، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین(علیه السلام)،
phys.ocean.abbasi@gmail.com

چکیده:

این مقاله به فرآیندهای فیزیکی کلیدی مرتبط با انتشار پرتوهای لیزری با توان متوسط در یک محیط دریایی می‌پردازد. تعداد زیادی از فرآیندهای فیزیکی بر مقدار انرژی لیزری که می تواند به هدف تحویل داده شود تأثیر می گذارد و آن را محدود می‌کند. این اثرات به هم مرتبط هستند و شامل شکوفایی حرارتی، تلاطم، و جذب و پراکندگی مولکولی/آئروسل هستند. این فرآیندها با تغییر ضریب شکست هوا بر مشخصات شدت لیزر تأثیر می‌گذارند که باعث انحراف جبهه موج پرتو لیزر می‌شود. اعوجاج جبهه موج منجر به افزایش گسترش پرتو لیزر عرضی می شود و می تواند مقدار انرژی قابل انتشار را به شدت محدود کند. محیط دریایی به دلیل وجود بخار آب و محتوای آئروسل نسبتاً بالا، انتشار لیزر با انرژی بالا چالش برانگیز است. در رژیم مادون قرمز، مولکول های آب و ذرات معلق در هوا منبع اصلی جذب و پراکندگی انرژی لیزر هستند و محدودیتی را برای لیزرهای با انرژی بالا نشان می دهند.

واژه های کلیدی:

لیزر، انرژی بالا، جو، انتشار، جذب، پراکندگی، شکوفایی حرارتی

Investigating factors affecting the emission of high-energy lasers in marine environments

Mahmud Reza Abbasi

Imam Hussain officer and guard training university, Science College, Basic Science, Department,
phys.ocean.abbasi@gmail.com

Abstract

This article addresses key physical processes associated with the propagation of high-average power laser beams in a maritime environment. A number of physical processes affect and limit the amount of laser energy that can be delivered to a target. These effects are interrelated and include thermal blooming, turbulence, and molecular/aerosol absorption and scattering. These processes affect the laser intensity profile by modifying the refractive index of the air, which causes the laser beam wavefront to distort. Wavefront distortion results in enhanced transverse laser beam spreading, and can severely limit the amount of energy that can be propagated. The maritime environment is particularly challenging for high energy-laser (HEL) propagation because of its relatively high water vapor and aerosol content. In the infrared regime, water molecules and aerosols constitute the dominant source of absorption and scattering of laser energy, and represent a limitation for HELs propagating in a maritime atmosphere.

Keywords:

Laser, high energy, atmosphere, emission, absorption, scattering, thermal bloom

۱- مروری بر لیزرهای پرانرژی

اصطلاح «سلاح های انرژی هدایت شده» برای توصیف سلاح های فناوری پیشرفته الکترومغناطیسی (EM) از جمله امواج مایکروویو پرقدرت و لیزرهای پرانرژی(HEL) استفاده می شود. این سلاح ها معمولا از انرژی EM مانند مایکروویو و اشعه مادون قرمز استفاده می‌کنند. یکی از مزیت‌های کلیدی HEL نسبت به سلاح‌های جنبشی سنتی، مانند موشک‌ها و تفنگ‌ها، این است که برای رهگیری هدف نیازی به شلیک پرتابه ندارند[۱].

به طور خاص برای HEL، مزایای دیگر عبارتند از: (۱) هزینه کمتر درگیری زیرا نیازی به پرتابه نیست، (۲) انتقال سریعتر انرژی با سرعت نور در مقایسه با سلاح‌های سنتی، (۳) مدت زمان عملیاتی بیشتر، محدود شده فقط با قدرت و ذخیره انرژی در دسترس و (۴) سطوح مختلف کُشندگی [۱]. با این حال، معایبی نیز برای سلاح های HEL وجود دارد، از جمله (۱) نیاز به درگیری تنها در خط دید، (۲) عملکرد وابسته به آب و هوا، (۳) زمان توقف محدود برای درگیری با یک هدف، که توانایی انجام چندگانه همزمان را محدود می‌کند(مدت زمان ماندن لیزر روی هدف) و (۴) آسیب احتمالی جانبی به هواپیما و یا ماهواره ها[۱].

کاربرد لیزرها برای مقاصد نظامی برای چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای کاربردهای انرژی هدایت شده، سه نوع اصلی لیزر (گاز/شیمیایی، الکترون آزاد و حالت جامد) بر اساس محیط فعال لیزر وجود دارد [۲]. این موارد در بخش بعدی به اختصار مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲- انواع لیزر

۲-۱- لیزرهای گازی/شیمیایی

لیزرهای گازی/شیمیایی از یک محیط گازی و از طریق فرآیند احتراق به لیزر دست می یابند. اولین لیزر گازی با قدرت بالا توسط نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۷۲ تحت پروژه DELTA توسعه یافت. برای دستیابی به توانی تا ۱۰۰ کیلووات در طول موج ۱۰,۶ میکرومتر از یک محیط افزایش CO2 استفاده کرد[۳]. از آنجا که طول موج عملیاتی ۱۰,۶ میکرومتر برای استفاده در محیط دریایی مناسب نیست، بنابراین در دهه ۱۹۸۰ تمرکز به لیزرهای شیمیایی تغییر کرد. نیروی دریایی آمریکا لیزر شیمیایی پیشرفته مادون قرمز (MIRACL) را در سال ۱۹۸۰ با استفاده از فلوراید دوتریوم توسعه داد که در طول موج حدود ۳,۸ میکرومتر لیزر می شود. این تنها سلاح لیزری بود که قادر به دستیابی به خروجی نسبتاً پرقدرت مگاوات بود. لیزرهای شیمیایی در سطح مگاوات انرژی تولید می‌کردند، لیزرهای شیمیایی اغلب بزرگ بودند، یکپارچه‌سازی آنها دشوار بود، در "ماده تولید لیزر" محدود بودند و بسیاری از آنها از گازهای سمی استفاده می‌کردند[۳].

۲-۲- لیزرهای الکترون آزاد

لیزرهای الکترون آزاد (FEL[2]) از یک شتاب دهنده ذره برای افزایش سرعت یک پرتو الکترون آزاد تا نزدیک به سرعت نور استفاده می‌کنند، قبل از اینکه آن را از یک سری آهنرباهای متناوب به نام موج ساز عبور دهند. این باعث می‌شود که الکترون‌ها در طول موج خاصی نوسان کنند و نور منسجم ساطع کنند. مزیت قابل توجه FEL این است که در طول موج مناسبی کار کند که تضعیف جوی را به حداقل می رساند و امکان انتشار لیزری بهتر را فراهم می‌کند. از دیگر مزایای استفاده از FEL این است که از گازهای سمی استفاده نمی شود (برخلاف مواد شیمیایی) و حذف راحت تر گرمای زائد از محیط لیزر را دارد (که در لیزرهای حالت جامد دشوارتر است) [۳].

۲-۳- لیزرهای حالت جامد

چالش‌هایی که هم لیزرهای گازی/شیمیایی و هم لیزرهای FEL با آن مواجه بودند منجر به تغییر تمرکز به سمت لیزرهای حالت جامد(SSL[3]) شد که ارزان‌تر و قابل استفاده‌تر روی سکوهای روی زمین، دریایی و هوابرد بودند. پیشرفت‌های قابل توجه در چند دهه گذشته در فناوری SSL برای کاربردهای تجاری، مانند جوشکاری، منجر به استفاده از SSL تجاری برای کاربردهای انرژی هدایت‌شده شده‌است[۳].

SSL های رایج مورد استفاده برای کاربردهای تجاری و تحقیقاتی در حال حاضر بر پایه جامدات آغشته به

[1] high-energy laser
[2] Free electron laser
[3] Solid state laser

ایتربیوم (Yb) یا نئودیمی (Nd) هستند. هر دو نوع در طول موجی در حدود ۱ میکرومتر کار می‌کنند که انتقال کافی در جو را نشان می دهد. مزیتی که SSL نسبت به سایر لیزرها دارد اندازه جمع و جور و کارایی آنهاست. در حال حاضر دو نوع اصلی از طرح های لیزر حالت جامد وجود دارد که در حال توسعه هستند:

الف- لیزرهای ورقه ای که یک پرتو لیزر با توان خروجی ۱۰۵ کیلووات در ۱,۰۶۴ میکرومتر تولید می‌کند. این پرتو لیزر همچنین دارای کیفیت پرتو مناسبی در هگام برخورد به هدف است. با این حال، SSL ورقه ای به راحتی تا سطوح توان MW مقیاس‌پذیر نیستند، زیرا حذف گرما همچنان یک چالش برای آنها است.

ب- لیزرهای فیبری. SSL فیبری از دیودهای لیزری به عنوان پمپ برای تحریک محیط بهره استفاده می‌کند. پرتو لیزر حاصل از یک فیبر عبور می‌کند. یکی از مزیت‌های لیزر فیبر نسبت سطح به حجم بزرگ آن است که امکان خنک‌سازی کارآمدتری را در مقایسه با نوع ورقه ای فراهم می‌کند. مزایای دیگر SSL فیبری این است که آنها فشرده تر از لیزرهای رقه ای هستند و اینکه لیزرهای فیبری پرقدرت به صورت تجاری در دسترس هستند. یک نوع لیزر ~۳۳ کیلووات در طول موج ۱,۰۶۴ میکرومتر کار می‌کند. البته کیفیت پرتو این نوع لیزر پایین است زیرا لیزرهای هر یک از فیبرهای SSL به طور نامنسجمی برای دستیابی به توان بالاتر ترکیب می شوند[۳].

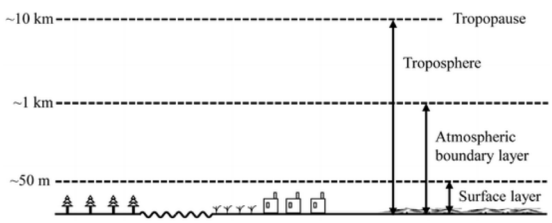
۳- انتشار لیزر در اتمسفر دریایی

جذب و پراکندگی انرژی لیزر توسط مولکول ها، بخار آب و ذرات معلق در هوا کاملا تابع طول موج است. بنابراین، انتخاب طول موج لیزر برای به حداکثر رساندن انرژی لیزری که می تواند به یک هدف برسد، حیاتی است. یکی از مزایای عمده استفاده از FEL برای سیستم سلاح لیزری، علاوه بر پتانسیل آن برای متوسط توان و راندمان بالا، توانایی آن برای کار در یک طول موج از پیش تعیین شده‌است. جذب انرژی لیزر، باعث گرم شدن موضعی هوا می شود. کاهش موضعی حاصل در چگالی هوا و ضریب شکست، باعث می‌شود پرتو لیزر تحت شکوفایی حرارتی قرار گیرد، یعنی از دست دادن کانونی شدن پرتو[۴].

این فرآیند مضر را می توان با انتخاب طول موج عملیاتی در یک پنجره اتمسفر که در آن جذب کم است، به میزان قابل توجهی کاهش داد. در یک محیط دریایی، جذب بخار آب نقش اصلی را در تعیین طول موج بهینه ایفا می‌کند. بخار آب دارای یک پنجره انتقال در مرکز ۱,۰۴۵ میکرومتر است که به اندازه کافی گسترده است تا امکان انتشار یک قطار از پالس های فوق کوتاه مشخصه FEL ها را فراهم کند. یعنی، پهنای طیفی مرتبط با پالس‌های FEL به خوبی در پنجره بخار آب در ۰,۰۰۴ ± ۱,۰۴۵ میکرومتر قرار دارد که در شکل ۲ نشان داده شده‌است. ساختار خط دقیق در پنجره‌های اتمسفر در ۱,۶ میکرومتر و ۲,۲ میکرومتر منجر به جذب موثر بالاتر برای پالس‌های FEL بسیار کوتاه می‌شود. همه این فرآیندها در رژیم پارامتر مورد علاقه در اینجا مهم نیستند. با این حال، این قابلیت برای مدل‌سازی انتشار پالس‌های لیزری با شدت‌های بسیار بالاتر برای تعدادی از کاربردهای دیگر وجود دارد[۴].

۴- فرآیندهای جوی موثر بر انتشار لیزر در اتمسفر دریایی

جو به طور کلی از چهار لایه مجزا تشکیل شده‌است که لایه مورد علاقه در اینجا تروپوسفر خواهد بود. این لایه از سطح تا حدود ۱۰ کیلومتر قرار دارد. در داخل تروپوسفر (شکل ۱)، لایه متمایز دیگری به نام لایه مرزی جو(ABL) وجود دارد که تقریباً ۱ کیلومتر بالاتر از سطح است اما ساختار حرارتی آن در طول روز متفاوت است [۱۵]. این واریانس ناشی از فعل و انفعالات بین سطح زمین و بادها است. در ABL، محتوای بخار آب و غلظت ذرات معلق در هوا نسبت به ارتفاع ثابت است[۵].



شکل ۱- تروپوسفر و زیرلایه های آن

انتشار یک پرتو لیزر در اتمسفر تحت تأثیر اجزای مختلف اتمسفر مانند گازهای جوی خواهد بود. از پرتوهای لیزر این اثرات نامطلوب شامل شکوفایی حرارتی، آشفتگی، جذب مولکولی/آئروسل و پراکندگی است و هر یک از این اثرات ممکن است با کاهش شدت پیک لیزر، کارایی لیزر را کاهش دهد. در ادامه، این فرآیندهای کلیدی را مورد بحث

قرار می‌دهیم که بر انتشار لیزر در اتمسفر دریایی به طور کلی تأثیر می‌گذارند.

۱-۴- تضعیف پرتو لیزر

مولکول ها و آئروسل های موجود در اتمسفر وقتی پرتو لیزر را از طریق جو منتقل می‌کنند، پرتو را جذب و پراکنده می‌کنند[۶]. ترکیب این دو اثر به بهترین وجه توسط قانون بیر توضیح داده شده‌است:

$$p(r) = p_0 e^{-\varepsilon r} \qquad (۱)$$

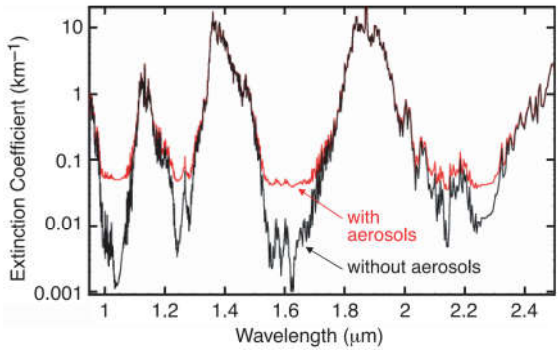
در معادله ۱، کل توان تحویل شده به هدف را در فاصله دور از منبع نشان می دهد و p_0 توان خروجی اولیه در منبع است. عبارت ε نشان‌دهنده ضریب تضعیف کل است که چگونگی کاهش قدرت لیزر را در حین انتشار کمی نشان می‌دهد.

این ضریب از چهار قسمت اصلی تشکیل شده‌است که در معادله ۲ نشان داده شده‌است.

$$\varepsilon = \alpha_m + \alpha_a + \beta_a + \beta_m \qquad (۲)$$

در رابطه ۲، α و β به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی را نشان می دهند. زیرنویس های m و a به سهم نسبی مولکول ها و ذرات معلق در جو در هر دو فرآیند اشاره دارد[۶].

شکل ۲ ضریب تضعیف، یعنی مجموع پراکندگی و جذب را به عنوان تابعی از طول موج نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده‌است، چندین پنجره انتقال مولکولی در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک به ۱، ۱,۶ و ۲,۲ میکرومتر وجود دارد[۶].



شکل۲- ضریب تضعیف هوا با و بدون ذرات معلق براساس طول موج

شکل ۲ اثرات روی ضریب تضعیف با و بدون ذرات معلق در جو (به ترتیب خطوط قرمز و سیاه) را نشان می دهد.

هنگامی که جذب مولکولی کوچک است، اثرات تضعیف نسبتاً بارزتر است، همانطور که در شکل ۲ منعکس شده‌است (که در آن ضریب تضعیف بر اساس مقیاس لگاریتمی ترسیم می شود). هنگامی که ذرات معلق در هوا وجود دارند، ضریب تضعیف به طور قابل توجهی (۱۰۰~برابر) در مناطق حدود ۱ میکرومتر و ۱,۶ میکرومتر بالاتر است[۶].

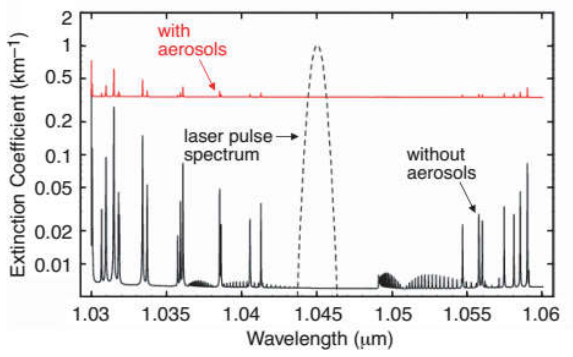
۲-۴- جذب

پراکندگی و جذب آئروسل می تواند نقش مهمی در محدود کردن انرژی لیزری که می تواند به هدف برسد، ایفا می‌کنند. ذرات معلق دریایی از قطرات آب تشکیل شده‌اند که در طیف وسیعی از شعاع (۰/۰۱ -۱۰μm) و چگالی حدود $۱۰^{۳}cm^{-3}$ توزیع شده‌اند.

جذب زمانی اتفاق می افتد که انرژی فوتون های منتقل شده توسط پرتو لیزر، اجزای تشکیل دهنده جو (مولکول ها یا ذرات معلق در هوا) را به سطوح انرژی بالاتر برانگیزد. این انتقال انرژی در نهایت می‌تواند جو را گرم کند. برای جذب مولکولی، اگرچه نیتروژن و اکسیژن تا حد زیادی فراوان‌ترین مولکول‌های تشکیل‌دهنده هوا هستند، اما دارای گشتاورهای دوقطبی الکتریکی غیردائمی هستند و بنابراین نسبتاً عاری از خطوط جذب در فروسرخ هستند. برعکس، اگرچه H_2O (بخار آب) و CO_2 درصد بسیار کمی از جو را تشکیل می دهند، اما به دلیل پیوندهای نامتقارنشان منبع اصلی جذب انرژی در طیف مادون قرمز هستند. برای جذب آئروسل، اثرات مشابه است اما بیشتر به اندازه و خواص توده ای آئروسل ها بستگی دارد.

جذب مولکولی انرژی لیزر در خطوط مجزا اما نزدیک به هم (طول موج) اتفاق می افتد. به عنوان مثال، شکل ۳ جذب هوا را در نزدیکی پنجره انتقال ۱ میکرومتری نشان می دهد. انرژی لیزر جذب شده به حالت‌های چرخشی و ارتعاشی مولکول‌های هوا تبدیل می‌شود. انرژی چرخشی/ارتعاشی از طریق فرآیندهای برخوردی هوا را گرم می‌کند[۶].

برای انتشار HEL در محیط دریایی، مولکول های آب تا حد زیادی مهم ترین جاذب IR در ارتفاعات پایین هستند. در پنجره جوی نزدیک به ۱ میکرومتر، جذب مولکولی برای یک پالس لیزر فوق کوتاه عمدتاً توسط جذب پیوسته، که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، تعیین می شود. با این حال، هنوز نیاز به آزمایش برای تعیین دقیق ضریب جذب پیوسته وجود دارد.



شکل۳- ضریب تضعیف بر حسب طول موج و وجود پنجره جوی نزدیک به ۱ میکرومتر

میانگین محتوای آب ذرات معلق در هوا معمولاً کمتر از هوای مرطوب ا ست. به عنوان مثال، در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و رطوبت ن سبی ۵۰ در صد، چگالی جرم بخار آب $۱/۵\times۱۰^{-۵}$ گرم بر سانتی متر مکعب ا ست، در حالی که چگالی جرم متوسط آئروسل های دریایی معمولاً بسیار کمتر است، حدود $۱۰^{-۹}$گرم بر سانتی متر مکعب. برای آب اقیانوسی، ضرایب جذب در طول موج های ۱/۰۴۵، ۱/۶۲۵و۲/۲۶۴ میکرومتر به ترتیب برابر ۷، ۲۰ و ۵۰ در سانتی متر ا ست. توجه دا شته با شید که برای آب خالص، ضریب جذب تا حدودی کمتر از آب اقیانوس است[۶].

برخلاف بخار آب، هیچ پنجره جذبی برای آب مایع وجود ندارد، زیرا فرکانس برخورد مولکولی در مایعات۱/۳ برابر بیشتر است.

۴-۳- پراکندگی

پراکندگی زمانی اتفاق می‌افتد که فوتون‌های منتقل شده توسط لیزر در جهت‌های تصادفی توسط اجزای اتمسفر هدایت شوند. نوع پراکندگی که رخ می دهد به طول موج لیزر و اندازه پراکنده بستگی دارد و می توان آن را با استفاده از نظریه پراکندگی Mie توصیف کرد. نظریه پراکندگی Mie فرض می‌کند (۱) همه ذرات اتمسفر کروی هستند، (۲) ذرات پراکنده همگن هستند و ضریب شکست یکسانی دارند، و (۳) نور فرودی یک موج مسطح است. هنگامی که اندازه ذره بسیار کوچک است (کوچکتر از طول موج لیزر)، از حد پراکندگی ریلی برای توضیح اثرات پراکندگی در جو استفاده می شود. منابع اصلی پراکندگی رایلی مولکول های N_2 و O_2 در هوا هستند. اثرات پراکندگی رایلی برای طول موج های کوتاه تر، قوی تر است. به همین دلیل است که آسمان در روز، آبی به نظر می‌رسد (زیرا اجزای نور آبی نور خورشید بیشتر پراکنده می‌شوند) و غروب‌ها قرمز هستند. وقتی اندازه آئروسل با طول موج لیزر قابل مقایسه باشد، از توصیف کامل پراکندگی Mie استفاده می‌شود. منابع اصلی پراکندگی Mie در اتمسفر پایین قطرات آب، دود و گرد و غبار است. برای پراکندگی اجسام با اندازه های قابل مقایسه یا بزرگتر از طول موج نور، بازده پراکندگی نسبتاً مستقل از طول موج است. به همین دلیل است که ابرها سفید یا خاکستری هستند زیرا تمام رنگ های نور خورشید "سفید" به طور مساوی توسط قطرات بزرگتر آب در ابر پراکنده می شوند.

اگرچه میانگین چگالی جرم آب در آئروسل های دریایی کوچک است، اما می تواند تأثیر زیادی بر پراکندگی تابش لیزر داشته باشد. ضریب پراکندگی آئروسل در محدوده طول موج مورد نظر می تواند به بزرگی $\beta_A \sim ۰/۲\ km^{-1}$ باشد[۷].

۴-۴- شکوفایی حرارتی

شکوفایی حرارتی در نتیجه فرآیند جذبی که قبلاً توضیح داده شد رخ می دهد و تأثیر قابل توجهی بر انتشار پرتو لیزر در توان های بالا (صدها کیلووات) و بردهای طولانی (چند کیلومتر) دارد. به دلیل افزایش دما ناشی از گرما هنگام جذب، چگالی هوا و ضریب شکست تغییر می‌کند. هوای گرم شده منبسط می شود و ضریب شکست را کاهش می دهد و در نتیجه یک "عد سی" ت شکیل می شود. این "عدسی" پرتو لیزر را از کانونی شدن خارج می‌کند و باعث پخش شدن آن می شود که باعث کاهش تابش به هدف می شود.

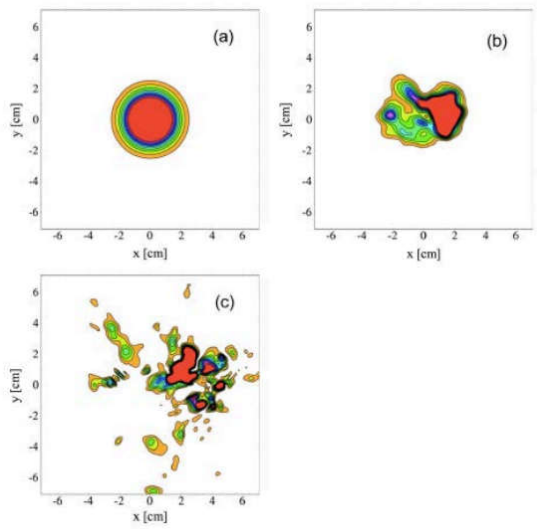
وجود باد می تواند به کاهش اثرات شکوفایی حرارتی کمک کند زیرا ستون هوا را که در آن پرتو در حال انتشار است با وارد کردن "هوای جدید" خنک می‌کند. پرتو لیزر نیز به سمت باد خم می شود و در نتیجه یک نقطه هلالی شکل مشخصه روی هدف ایجاد می شود. از طرف دیگر، انتخاب طول موجی که به طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیند جذب قرار نگیرد، می تواند به کاهش اثرات شکوفایی حرارتی کمک کند. در شکوفایی حرارتی فرآیدی حساس به مکانیسم های گرمایشی موجود در هوا است. گر مایش آئروسل نیز با گرم کردن هوای اطراف توسط مکانیسم‌های مختلفی بر شکوفایی حرارتی تأثیر می‌گذارد[۷].

۴-۵- آشفتگی

اثرات تلاطم به دلیل تغییرات تصادفی در چگالی هوا، عمدتاً به دلیل نوسانات دما در هوا است. این تغییر در

چگالی هوا در طول مسیر انتشار لیزر منجر به ضریب شکست متغیر در طول مسیر می‌شود که باعث سرگردانی و عدم تمرکز پرتو لیزر می‌شود. این نوسانات ذاتی هوا هستند و توسط لیزر القا نمی شوند. از این رو، بر خلاف شکوفایی حرارتی، تأثیر تلاطم بر انتشار لیزر مستقل از شدت لیزر است. اثر تلاطم را می توان با پارامتر ساختار شکست (C_n^2) و پارامتر فرید[11] (r_0) تعیین کرد[۷].

پارامتر ساختار شکست (C_n^2) برای توصیف شدت تلاطم موضعی استفاده می شود. مقدار بزرگ این پارامتر (10^{-13} $m^{-2/3}$) نشان دهنده تلاطم نسبتاً قوی است در حالی که مقدار کوچکتر (10^{-18} $m^{-2/3}$) نشان دهنده تلاطم ضعیف است. شکل ۴ اثرات افزایش آشفتگی (خلاء تا تلاطم شدید) را بر شدت پرتو لیزر در ۰٫۵ کیلومتر برای طول موج ۱٫۰۴۵ میکرومتر نشان می دهد. با افزایش مقدار C_n^2، پرتو لیزر شروع به "شکستن" می‌کند همانطور که در شکل ۴ (ج) نشان داده شده‌است. همچنین C_n^2 تابعی از ارتفاع با مقادیر معمولاً کوچکتر در ارتفاعات بالاتر است[۷].



شکل۴- اثرات افزایش آشفتگی (خلاء تا تلاطم شدید) را بر شدت پرتو لیزر در ۰٫۵ کیلومتر برای طول موج ۱٫۰۴۵ میکرومتر با افزایش مقدار پارامتر ساختار شکست

پارامتر Fried (r_0) به عنوان قطری تعریف می شود که پرتو لیزر روی آن انسجام عرضی را در طول انتشار حفظ می‌کند و با پارامتر ساختار شکست (C_n^2) رابطه معکوس دارد. زمانی که تلاطم ضعیفی وجود داشته باشد r_0 بزرگ به دست می آید و این به انسجام پرتو در سراسر مسیر انتشار تبدیل می شود. برعکس، هنگامی که تلاطم شدید وجود دارد، r_0 کوچک است و پرتو لیزر نامنسجم می شود و به پرتوهای جداگانه در سراسر جبهه موج می شکند(شبیه اثرات نشان داده شده در بالا در شکل ۴) [۷].

۵- بحث و نتیجه گیری

تسلیحات انرژی هدایت شده مبتنی بر لیزر به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از کشتی های نیروی دریایی آینده در نظر گرفته شده‌است. لیزر الکترون آزاد، به ویژه، برای کاربردهای دریایی مناسب است. می توان آن را برای عملکرد در طیف گسترده ای از طول موج ها طراحی کرد و قادر به تولید توان متوسط بالا در راندمان بالا است.

در این مقاله، فرآیندهای فیزیکی کلیدی که بر انتشار لیزرهای پرانرژی در یک محیط دریایی تأثیر می‌گذارند، مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. این فرآیندها شامل شکوفایی حرارتی، تلاطم، جذب و پراکندگی مولکولی/آئروسل است. پراکندگی و جذب ذرات معلق در هوا و همچنین جذب بخار آب می تواند یک محدودیت عمده برای انتشار HEL در یک محیط دریایی باشد.

۶- منابع و مراجع

[1] A. Rossiter, “High-Energy Laser weapons: Overpromising readiness,” *Parameters*, vol. 48, no. Winter 2018-19, pp. 33–44, 2018.

[2] Y. Kalisky, “Solid-state lasers (SSL) in defense programs,” in Handbook of SolidState Lasers, Elsevier, 2013, pp. 598–615.

[3] D. Carroll, “Overview of High Energy Lasers: Past, Present, and Future?,” in 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Honolulu, Hawaii, 2011.

[4] R. O’Rourke, “Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense,” p. 64.

[5] X. Lee, “Introduction,” in Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology, X. Lee, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–10.

[6] P. Sprangle, J.R. Renano, A. Ting, B. Hafizi, and D.F. Gordon, “Propagation of Short, High-Intensity Laser Pulses in Air,”J. Dir.Energy 1, 73 (2003).

[7] P. Sprangle, B. Hafizi, A. Ting, and R. Fischer, “High-power lasers for directed energy applications,” Appl. Opt., vol. 54, no. 31, p. F201, 2015.

[11] Fried