

علمی - پژوهشی

بررسی و شبیه‌سازی پارامتر C_n^2 و تأثیر آن بر توزیع شدت میانگین، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی باریکه لیزری منتشر شده در اتمسفر

مهدی صفر بیرانوند^۱، سجاد قآنی غلامحسینی^۲، ناصر سیاهوشی^{۳*}

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ۳- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰)

چکیده

یکی از عمده‌ترین مشکلات انتشار لیزر در اتمسفر، تلاطم و نوسانات ضریب شکست اتمسفر است که پارامترهای لیزر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله اثرات پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2) بر توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی باریکه لیزری منتشر شده با پروفایل گاوسی، طول موج ۱۰۶۴ nm، اندازه شعاع کمره ۱ cm و توان ۱ W بررسی شده است. به منظور پیش‌بینی مقادیر پارامتر C_n^2 ، مدل‌های هافناگل - والی (HV) و هافناگل - آندریس - فیلیپس (HAP) باهم مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در هر دو مدل با افزایش ارتفاع، پارامتر C_n^2 کاهش می‌یابد. همچنین گرچه مدل HV برای تعیین پارامتر C_n^2 در ارتفاعات بالا با حضور باد مناسب است، اما در ارتفاعات پایین و در ساعات مختلف روز، به‌خوبی نتایج تجربی و مدل HAP رفتار پارامتر C_n^2 را مشخص نمی‌کند. شبیه‌سازی انتشار لیزر در اتمسفر نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر C_n^2 ، میانگین توزیع شدت باریکه کاهش و اندازه لکه افزایش می‌یابد؛ همچنین شعاع انحنا کاهش یافته و طول ریلی ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی را در پیش می‌گیرد. علی‌رغم وجود مشکلات انتشار لیزر در اتمسفر، نتایج این مقاله و بررسی‌های آینده برای کاهش و جبران این اثرات امری ضروری به نظر می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2)، مدل هافناگل - والی، مدل هافناگل - آندریس - فیلیپس، انتشار باریکه لیزر، اتمسفر متلاطم، میانگین توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا، طول ریلی.

Investigation and Simulation of the C_n^2 Parameter and its Effects on the Average Intensity Distribution, Spot Size, Radius of Curvature, and Rayleigh Length of the Laser Beam Propagation in the Atmosphere

M. Safarbiranvand, S. Qaani Gholamhosseini, N. Siahvoshi*

Imam Hossein University

(Received: 2023/04/04; Accepted: 2023/08/11)

Abstract

One of the significant problems of laser propagation in the atmosphere is the atmospheric turbulence and fluctuations of refractive index, which affects the laser parameters. In this article, the effects of atmospheric refractive index structure parameter (C_n^2) on the intensity distribution, spot size, radius of curvature, and Rayleigh length of the laser beam propagated with Gaussian profile, wavelength 1064 nm, size of beam waist 1 cm and power 1 W have been investigated. In order to predict C_n^2 parameter values, Hufnagel-Valley (HV) and Hufnagel-Andrews-Phillips (HAP) models were compared. The simulation results show that in both models, the C_n^2 parameter decreases with the increase in height. Also, although the HV model is suitable for determining the C_n^2 parameter at high altitudes with the presence of wind, it does not determine the behavior of the C_n^2 parameter as well as the experimental results and the HAP model at low altitudes and at different hours of the day. The simulation of laser propagation in the atmosphere shows that with the increase of the C_n^2 parameter, the average intensity distribution decreases and the spot size increases; Also, the radius of curvature is reduced and the Rayleigh length first goes up and then goes down. Despite the problems of laser propagation in the atmosphere, the results of this article and future investigations seem necessary to reduce and compensate for these effects.

Keywords: Average Intensity Distribution, Hufnagel-Andrews-Phillips and Hufnagel-Valley Models, Laser Beam Propagation, Radius of Curvature, Rayleigh Length, Refractive Index Structure Parameter (C_n^2), Spot Size, Turbulent, Atmosphere.

*Corresponding Author E-Mail: N-Siahvashi@Ihu.Ac.Ir

۱. مقدمه

از سال‌ها پیش لیزر به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون همدوسی، تک‌رنگی، جهت‌مندی و گستردگی طول‌موج در بازه طیفی فرابنفش تا فروسرخ مورد توجه بسیار قرار گرفته است؛ به طوری که در بسیاری از کاربردها مانند پزشکی، صنعت، مخابرات و حوزه دفاعی استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای نظامی لیزر می‌توان به ارتباطات، نشان‌رویی، فاصله‌یابی، ردیابی هدف، سیستم‌های ناوبری و سامانه‌های انرژی مستقیم اشاره نمود [۱]. این کاربردهای وسیع ناشی از توانایی‌ها و ویژگی‌هایی از جمله سرعت بالا، نامرئی‌بودن، برخورداری از سکوت نسبی، آسیب‌زدن به نقاط کلیدی، قابلیت کنترل شلیک، رهگیری و انهدام اهداف است. از طرفی استفاده از لیزر در کاربردهای پدافندی اعم از پدافند عامل و غیرعامل بسیار گسترش یافته است. از این جمله می‌توان به مخابرات و حوزه دفاعی در فضای آزاد اشاره کرد. با انتشار باریکه لیزری در اتمسفر و بازگشت آن به آشکارساز، می‌توان آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از حملات زیستی دشمن را شناسایی کرد و با تجزیه و تحلیل و مکان‌یابی نور دریافتی، هشدار خطر صادر نمود. همچنین در سامانه‌های ارتباطی و رادار لیزری، با فرستادن پیام به وسیله باریکه لیزری، می‌توان از شنودشدن آن جلوگیری نمود [۱-۳]. فریب موشک‌ها با استفاده از لیزر نیز از دیگر کاربردهای این حوزه محسوب می‌شود که در آن، باریکه لیزری روی گیرنده سر موشک متمرکز شده و یک هدف واهی را به موشک نشان می‌دهد. همچنین از لیزر برای تخریب یا انهدام راکت، موشک، پرنده‌های بدون سرنشین، بمب‌افکن‌ها و قایق‌های تندرو استفاده می‌شود [۱، ۴، ۵]؛ بنابراین، کاربردهای لیزر در فضای آزاد از اهمیت زیادی برخوردار است و باید اثرات اتمسفر روی باریکه لیزری منتشر شده بررسی شوند.

اگرچه منابع لیزری برای آسیب رساندن به اهداف در فواصل دور از اهمیت زیادی برخوردار است، اما وجود اتمسفر را شاید بتوان از بزرگ‌ترین چالش‌هایی دانست که می‌تواند عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. وجود مولکول‌های هوا موجب پراکندگی و جذب باریکه لیزری می‌شوند؛ همچنین پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2) که در زمان‌ها و شرایط مختلف، رفتار متفاوتی دارد و پارامترهای باریکه لیزری، به‌ویژه باریکه لیزری توان بالا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای پیش‌بینی مقدار پارامتر (C_n^2)، مدل‌های گوناگونی ارائه و کارهای زیادی انجام شده است [۶، ۷]؛ کیانگ و همکاران برای پیش‌بینی پارامتر C_n^2 در ارتفاعات مختلف از مدل هافناگل - والی (HV) استفاده کردند [۸]؛ علاوه بر آن کانیوت رفتار پارامتر C_n^2 را در ارتفاعات و سرعت‌های متفاوت باد برای مدل هافناگل - والی (HV) شبیه‌سازی نمود [۷].

جایزینسکی و همکاران برای پیش‌بینی رفتار C_n^2 از مدل HV استفاده کردند [۹]. آندریس و همکاران برای پیش‌بینی پارامتر C_n^2 ، مدلی پیشرفته‌تری از مدل HV به نام هافناگل - آندریس - فیلیپس (HAP) ارائه دادند [۱۰]. دالی محمود و همکاران رفتار پارامتر C_n^2 را در سرعت باد و ارتفاعات متفاوت در مدل HAP بررسی و شبیه‌سازی کردند [۱۱]. رسولی و همکاران رفتار پارامتر C_n^2 را در سطح زمین، با استفاده از تاکتیک مویره^۳ به دست آوردند [۱۲]. هادی بخشی و همکارش، مقدار پارامتر C_n^2 را به صورت تجربی محاسبه کردند [۱۳].

از طرفی باتوجه به اهمیت انتشار باریکه لیزر در اتمسفر، کارهای بسیاری در رابطه با تأثیرات اتمسفر بر پارامترهای باریکه نیز صورت گرفته است، نبی هادیلو و همکاران کیفیت باریکه منتشر شده در اتمسفر متلاطم را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. حامد قاسمی و همکارش انحرافات باریکه لیزری ناشی از اتمسفر متلاطم را بررسی کردند [۱۵]. شیشی‌هانگ چو توزیع شدت باریکه گاوسی منتشر شده در اتمسفر متلاطم را نشان داد و به بررسی تغییرات توزیع شدت با تغییر پارامتر C_n^2 پرداخت [۱۶]، شاولینگ به بررسی پارامترهای باریکه ترکیبی لیزری منتشر شده در اتمسفر متلاطم پرداخت [۱۷-۱۹]. چیپ و همکاران به تجزیه و تحلیل برخی از باریکه‌های مدل شل^۴ منتشر شده در اتمسفر پرداختند [۲۰]. در پژوهش‌های داخلی انجام شده، مقایسه‌ای بین مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پارامتر C_n^2 انجام نشده است. علاوه بر آن، در بررسی تأثیرات پارامتر C_n^2 بر انتشار باریکه لیزر تنها پارامتر توزیع شدت بررسی شده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، ضمن مقایسه دو مدل HV و HAP و انتخاب مدل مناسب، اثرات پارامتر C_n^2 روی میانگین توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی باریکه منتشر شده در اتمسفر متلاطم بررسی خواهد شد.

۲. روش تحقیق

در این بخش اصول و مبانی حوزه اتمسفر، از جمله نظریات حاکم بر این حوزه، فیزیک و معادلات آن و پارامترهای مؤثر ارائه خواهد شد. ابتدا به معرفی اتمسفر پرداخته و ویژگی‌های آن بیان خواهد شد. سپس پارامتر ساختار ضریب شکست (C_n^2) به عنوان پارامتر تأثیرگذار بر انتشار باریکه لیزری در اتمسفر معرفی و بررسی می‌شود و روابط حاکم بر آن بیان می‌شود. نهایتاً فیزیک و معادلات حاکم بر تأثیر اتمسفر بر پارامترهای باریکه لیزری ارائه می‌گردد.

^۲ Hufnagel/Andrews/Phillips (HAP)

^۳ Moir E

^۴ Schell-Model

^۱ Hufnagel-Valley Model (HV)

۲-۱. اتمسفر

گرداب‌های کوچک با خواص مستقل می‌دهند؛ این گرداب‌های بزرگ و کوچک، زیر محدوده اینرسی را تشکیل می‌دهند [۶].

۲-۲. پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2)

برای انتشار باریکه لیزری در اتمسفر، ضریب شکست محیط و نوسانات آن، یکی از پارامترهای مهم محسوب می‌شود. در اتمسفر متلاطم و آشوبناک به دلیل نوسانات دما و فشار، ضریب شکست با یک رفتار تصادفی همراه است. معیاری از نوسانات ضریب شکست محیط و در نتیجه شدت تلاطم اتمسفر با پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر یا اصطلاحاً C_n^2 اندازه‌گیری می‌شود و مقادیر آن برای تلاطم ضعیف معمولاً کم‌تر از $10^{-10} \text{ m}^{-2/3}$ و برای تلاطم قوی بیش‌تر از $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ متغیر است [۶]. به دلیل وابستگی ضریب شکست به دما و فشار محیط، پارامتر C_n^2 نیز به این متغیرهای ترمودینامیکی اتمسفر وابسته است؛ بنابراین با تغییرات ارتفاع، موقعیت جغرافیایی و زمان تغییر پیدا می‌کند. در مسیرهای افقی به دلیل تغییرات قابل‌اغماض دما در اتمسفر هم‌دما، مقدار C_n^2 ثابت می‌ماند و همچنین در طول روز به دلیل تابش نور خورشید به سطح زمین و گرم‌تر شدن هوای اطراف آن، مقدار C_n^2 بیشتر از هنگام غروب و شب است [۶، ۷]. برای تعیین رفتار پارامتر C_n^2 در اتمسفر متلاطم با افزایش ارتفاع، نظریه‌های مختلفی ارائه شده است که به دودسته پارامتری (وابسته به متغیرهای سرعت باد، زمان و پارامترهای هواشناسی) و غیرپارامتری تقسیم می‌شوند. از جمله مدل‌های پارامتری می‌توان به مدل هافناگل - والی و هافناگل - آندریس - فیلیپس اشاره کرد [۸].

هافناگل برای پیش‌بینی اثرات اتمسفر هم‌دما، به بررسی و مدل‌سازی پارامتر C_n^2 پرداخت و پس از آن والی با اصلاح مدل هافناگل برای لایه‌مرزی، مدل هافناگل - والی (HV) را ارائه داد [۶، ۷، ۲۲]. در مدل HV مقدار C_n^2 به ارتفاع از سطح دریا، وابسته است؛ همچنین اثرات باد و سرعت آن، بر تلاطم و نوسانات ضریب شکست اتمسفر نیز در این مدل در نظر گرفته شده است. پارامتر C_n^2 در این مدل از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27} \right)^2 (10^{-5} h)^{10} e^{\frac{-h}{1000}} + 2.7 \times 10^{-16} e^{\frac{-h}{1500}} + C_n^2(0) e^{\frac{-h}{100}} \quad (1)$$

در این رابطه $C_n^2(0)$ پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر در سطح زمین، h ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر و v سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است.

اندازه‌گیری‌های تجربی متعدد در طول روز و در شرایط آب‌وهوایی مختلف نشان داده است که برخلاف مدل HV، پارامتر C_n^2

اتمسفر پوشش گازی اطراف زمین است که تا ارتفاع چند صد کیلومتری به صورت لایه‌لایه ادامه دارد و ۹۸٪ حجم آن از اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است [۶]. تابش نور خورشید به سمت زمین در طول روز باعث گرم‌تر شدن هوای اطراف سطح زمین نسبت به هوای ارتفاعات بالاتر می‌شود و با گرم‌تر شدن آن، چگالی هوا کاهش پیدا کرده و جریانات هوایی به سمت بالا شکل می‌گیرند و با رطوبت موجود در ابر مخلوط می‌شوند؛ این امر باعث به‌وجود آمدن نوسانات تصادفی در ضریب شکست اتمسفر می‌شود [۷]. باریکه منتشر شده در اتمسفر، تحت‌تأثیر اثرات مخرب جذب، پراکندگی و شکست ناشی از ذرات موجود در اتمسفر قرار می‌گیرد. جذب زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات موجود در هوا بسته به طول موج، یک فوتون تابشی را جذب کرده و آن را به انرژی جنبشی مولکول تبدیل کنند. اگر مولکول‌های هوا، فوتون‌های تابشی را در جهت‌های مختلف منتشر کنند، پراکندگی رخ می‌دهد؛ علاوه بر این‌ها با عبور نور از محیط، ممکن است مسیرش به علت تغییر ضریب شکست، کج شود، زیرا ضریب شکست اتمسفر با تغییر فشار و دما تغییر می‌کند. این عوامل باعث تغییر در میزان واگرایی باریکه لیزری و نوسانات تابش می‌شوند [۶]. از دیگر اثرات اتمسفر در انتشار باریکه لیزری، ظهور پدیده عدسی‌شدگی گرمایی است. نور لیزر توسط مولکول‌های هوا جذب شده و با افزایش دمای محیط، تغییراتی در ضریب شکست اتمسفر پدید می‌آید که این امر موجب تشکیل یک عدسی و واگرایی باریکه می‌شود. همچنین اگر توان لیزر به‌اندازه کافی بالا باشد، برهم‌کنشی غیرخطی بین میدان باریکه لیزر و ذرات موجود در اتمسفر اتفاق می‌افتد که به آن پدیده شکوفه‌زنی حرارتی می‌گویند [۲۱].

جریان‌های آرام و متلاطم اتمسفر که از گرانروی این سیال ناشی می‌شود، موجب اثرگذاری بر باریکه لیزری می‌شود. در جریان‌های آرام، عامل‌های جریان هوا، مانند سرعت، یکنواخت هستند یا به صورت منظم تغییر می‌کنند. با افزایش سرعت، جریان آرام در یک عدد رینولدز^۱ بحرانی به جریان متلاطم تبدیل می‌شود و میدان سرعت به دلایل دینامیکی، ویژگی‌های یکنواخت خود را از دست می‌دهد و جریان‌های فرعی تصادفی به نام گرداب‌های متلاطم در اندازه چند ده متر تا چند صد متر (مقیاس بیرونی تلاطم یا L_0) به وجود می‌آیند؛ سپس اندازه این گرداب‌ها تحت نیروی اینرسی اتمسفر کاهش یافته و به‌اندازه مشخصی در حد میلی‌متر (مقیاس داخلی تلاطم یا l_0) می‌رسند که این فرآیند به نظریه آشبار انرژی^۲ معروف است. بنا بر نظریه کولموگروف، گرداب‌های بزرگ تأثیرات خود را از دست داده و جای خود را به

^۱ Reynolds Number

^۲ Energy Cascade Theory

$$E(X, Y, 0) = E_0 \exp\left(-\frac{R^2}{w_0^2}\right) \quad (۵)$$

در این رابطه E_0 دامنه میدان باریکه گاوسی لیزر، w_0 کمر باریکه و $R^2 = x^2 + y^2$ است. بنابراین، توزیع میانگین شدت باریکه در صفحه مشاهده به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۶].

$$\begin{aligned} \langle I(x, y, L) \rangle &= EE^* \\ &= \frac{1}{\lambda^2 L^2} \int \int \int_{-\infty}^{\infty} E(X_1, Y_1, 0) E^*(X_2, Y_2, 0) \times \\ &\exp\left[\frac{i}{kL}(xX_1 + yY_1 - xX_2 - yY_2)\right] \times \\ &\langle \exp[\psi(x, y, X_1, Y_1) + \psi^*(x, y, X_2, Y_2)] \rangle dX_1 dY_1 dX_2 dY_2 \end{aligned} \quad (۶)$$

در این رابطه (*) علامت مزدوج مختلط و L فاصله انتشار است. همچنین جمله آخر میانگین نوسانات فاز ناشی از تلاطم اتمسفر را بیان می‌کند که با رابطه (۷) نشان داده می‌شود.

$$\begin{aligned} \langle \exp[\psi(x, y, X_1, Y_1) + \psi^*(x, y, X_2, Y_2)] \rangle &= \\ \exp\left[-\frac{I(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 I^{5/6}}{\rho_0^{5/3}}\right] \end{aligned} \quad (۷)$$

در این رابطه $\rho_0 = (0.545 \bar{C}_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ طول همدوسی موج کروی منتشر شده در اتمسفر و \bar{C}_n^2 میانگین نوسانات پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر است که با رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\bar{C}_n^2 = \frac{1}{L} \int_0^L C_n^2(h) dh \quad (۸)$$

از دیگر پارامترهای مهم باریکه لیزری می‌توان به اندازه لکه $w(z)$ اشاره نمود. هر باریکه لیزری منتشر شده در خلأ به دلیل اثرات پراش دهانه تابش، دچار واگرایی ذاتی می‌شود. باین حال تلاطم اتمسفر و تغییرات ناگهانی ضریب شکست اتمسفر، مطابق رابطه (۹) موجب تغییرات در اندازه لکه باریکه لیزری منتشر شده در اتمسفر می‌شود [۱۷]:

$$w(z) = w_0^2 + \left(\frac{2}{kw_0}\right)^2 z^2 + Fz^{16/5} \quad (۹)$$

که در آن z فاصله انتشار از کمر باریکه، k عدد موج است و تأثیر تلاطم اتمسفر در اندازه لکه باریکه در جمله آخر، با رفتار توانی $۳/۲$ در z ظاهر شده است که $F = 8(0.545 \bar{C}_n^2)^{6/5} k^{2/5}$ است.

یکی دیگر از پارامترهای باریکه لیزری که تحت تأثیر اتمسفر متلاطم قرار می‌گیرد، شعاع انحنا است. تغییرات ضریب شکست

ارتفاعات پایین، با افزایش ارتفاع به صورت توانی و با توان منفی کاهش می‌یابد؛ بنابراین یک مدل واقعی‌تر برای پیش‌بینی رفتار C_n^2 توسط آندریس - فیلیپس به نام HAP معرفی شد که در رابطه (۲) ارائه شده است [۷ و ۲۳].

$$\begin{aligned} C_n^2(h) &= M \left[0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}(h+h_s))^{10} e^{-\frac{(h+h_s)}{1000}} + \right. \\ &\left. 2.7 \times 10^{-16} e^{-\frac{(h+h_s)}{1500}} + C_n^2(h_0) \left(\frac{h_0}{h}\right)^p \right] \end{aligned} \quad (۲)$$

در این رابطه h_s ارتفاع زمین از سطح دریا، $C_n^2(h_0)$ پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر در سطح زمین، h_0 ارتفاعی که مقدار پارامتر $C_n^2(h_0)$ اندازه‌گیری می‌شود، h ارتفاع اتمسفر از ارتفاع h_0 ، M ضریب آشفتگی تصادفی پس‌زمینه و p پارامتر قانون توان است و از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$p = \begin{cases} -0.11(12-TH)^2 + 1.83(12-TH) - 6.22, & 0.75 < TH < 3.5 \\ 1.45 - 0.02(TH-6)^2, & 3.5 < TH < 8.5 \\ -0.048TH^2 + 0.68TH - 1.06, & 8.5 < TH < 11.25 \end{cases} \quad (۳)$$

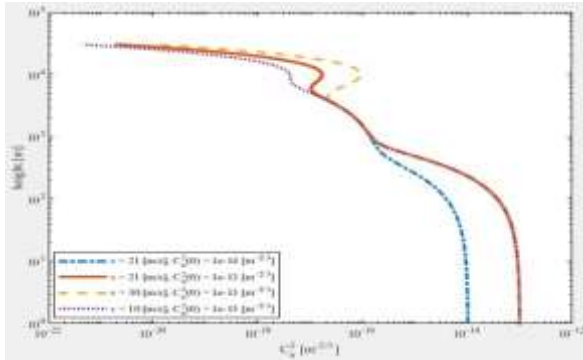
پارامتر p به ساعت زمانی روز (TH)، وابسته است که مقدارش بین (برای زمان طلوع خورشید) و ۱۲ (برای غروب خورشید) است.

۲-۳. پارامترهای باریکه لیزری با انتشار در اتمسفر

در انتشار باریکه لیزرهای موج پیوسته کم‌توان در اتمسفر، اثرات غیرخطی اتمسفر ظاهر نشده و می‌توان تنها اثرات مخرب اتمسفر را ناشی از نوسانات ضریب شکست اتمسفر و پارامتر C_n^2 آن دانست. اتمسفر متلاطم روی پارامترهای باریکه لیزری از قبیل توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی اثر دارد. یکی از پارامترهای مهم لیزر توزیع شدت باریکه در صفحه مشاهده است که تحت تأثیر اتمسفر قرار می‌گیرد و دچار نوساناتی در طول زمان می‌شود. میدان باریکه منتشر شده در اتمسفر به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود [۲۴ و ۲۵].

$$\begin{aligned} E(x, y, z = L) &= \frac{\exp(ikL)}{i\lambda L} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(X, Y, 0) \times \\ &\exp\left[\frac{ik}{L}(xX + yY) + \psi(x, y, X, Y)\right] dXdY \end{aligned} \quad (۴)$$

در این رابطه k عدد موج، L فاصله انتشار، λ طول موج، (x, y, L) نقاط عرضی در صفحه مشاهده، $(X, Y, 0)$ نقاط عرضی در دهانه تابش و $\psi(x, y, X, Y)$ تغییرات تصادفی فاز ناشی از تلاطم است و $E(X, Y, 0)$ میدان باریکه گاوسی است که با رابطه (۵) نمایش داده می‌شود [۲۶].



شکل ۱. پروفایل پارامتر C_n^2 برای مدل HV در سرعت باد و $C_n^2(0)$ های مختلف: $v=21$ m/s و $C_n^2(0)=10^{-14}$ m^{-2/3} (نقطه خط)، $v=21$ m/s و $C_n^2(0)=10^{-13}$ m^{-2/3} (خط توپر)، $v=30$ m/s و $C_n^2(0)=10^{-13}$ m^{-2/3} (خط چین)، $v=10$ m/s و $C_n^2(0)=10^{-13}$ m^{-2/3} (نقطه چین).

مطابق شکل (۱)، مقدار پارامتر C_n^2 با افزایش ارتفاع تا فاصله حدود ۱۰۰ m ثابت بود و تغییر نمی‌کند، با افزایش بیشتر ارتفاع این روند ثابت، تغییر کرده و C_n^2 کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش فاصله از سطح دریا، دما و فشار اتمسفر و در نتیجه تلاطم و نوسانات ضریب شکست اتمسفر کاهش می‌یابد. این روند کاهشی با افزایش بیشتر ارتفاع شیب تندی به خود می‌گیرد. نکته قابل توجه در این مدل آن است که در ارتفاعات پایین‌تر از ۱ km، روی هم افتادن منحنی‌های خط توپر، خط چین و نقطه چین نشان می‌دهد که مقدار C_n^2 در ارتفاعات نزدیک به سطح زمین تنها به $C_n^2(0)$ وابسته خواهد بود. همچنین در ارتفاعات ۱ تا ۴ km، جمله دوم رابطه (۱) بر روند نمایی پارامتر C_n^2 غالب شده و سرعت باد و پارامتر $C_n^2(0)$ در رفتار آن تأثیری ندارند (روی هم افتادن تمامی منحنی‌ها). در ارتفاعات بالای ۴ km، جمله اول غالب است و وجود بادهای پر سرعت، تلاطم و پارامتر C_n^2 را افزایش می‌دهد و به مقدار پارامتر $C_n^2(0)$ وابسته نمی‌باشد؛ به همین دلیل منحنی خط - نقطه بر روی منحنی خط توپر افتاده است. با این حال مدل HV برای تعیین پارامتر C_n^2 در ارتفاعات بالا و در عرض جغرافیایی میانی مناسب است و اما در ارتفاعات پایین و در ساعات مختلف زمانی روز، به خوبی نتایج تجربی رفتار پارامتر C_n^2 را مشخص نمی‌کند.

برای بررسی دقیق‌تر اثرات زمان طول روز بر تغییرات پارامتر C_n^2 از مدل HAP استفاده نموده و تغییرات پارامتر C_n^2 ناشی از زاویه تابش نور خورشید در ساعات مختلف طول روز بررسی شده است. وجود پارامتر p در جمله آخر رابطه (۲)، تغییرات رفتار پارامتر C_n^2 را در سطح زمین بیان می‌کند. شکل (۲) تغییرات پارامتر p را در ساعات مختلف طول روز نشان می‌دهد.

ذرات اتمسفر روی شعاع انحنای باریکه اثر می‌گذارد. با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان شعاع انحنای باریکه لیزری را پس از انتشار در اتمسفر متلاطم به دست آورد [۲۷، ۲۸]:

$$R(z) = \frac{w_0^2 + \left(\frac{2}{kw_0}\right)^2 z^2 + \frac{2}{3} Tz^3}{\left(\frac{2}{kw_0}\right)^2 z + Tz^2} \quad (10)$$

در این رابطه $T = 7.6113C_n^2$ تأثیر تلاطم اتمسفر بر شعاع انحنای باریکه، z فاصله انتشار، w_0 کمر باریکه و k عدد موج است. به راحتی می‌توان مشاهده کرد که در نبود تلاطم اتمسفر، رابطه (۱۰) به رابطه مرسوم شعاع انحنای باریکه در خلأ ساده می‌شود.

مکانی که شعاع انحنای باریکه لیزر به کمترین مقدار خود می‌رسد را طول ریلی (Z_R) می‌گویند. طول ریلی باریکه منتشرشده در اتمسفر را می‌توان با پیدا کردن کمینه رابطه (۱۰) به دست آورد [۱۹].

$$Z_R = -\frac{\left(\frac{4}{w_0^2}\right)}{2k^2T} + \frac{1}{2}\sqrt{A} + \frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{A}}\left(\frac{4}{w_0^2}\right)^3 + \frac{6w_0^2}{T}\right] - A \quad (11)$$

که در اینجا:

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}T^2} \left(\frac{3}{\sqrt{2}k^8B} + \frac{B}{6} \right)$$

$$B = \left\{ 54 \left(C^2 - \frac{4}{k^{24}} \right) \right\}^{1/3}, \quad C = \left(\frac{4}{w_0^2} + 6w_0^2T^2 \right)^2$$

۳. نتایج و بحث

در این بخش پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2) با در نظر گرفتن اثر ارتفاع، سرعت باد و نیز ساعات مختلف طول روز شبیه‌سازی شده است. همچنین تأثیرات آشوبناکی و نوسانات پارامتر C_n^2 بر انتشار باریکه لیزری و پارامترهای آن بررسی خواهد شد.

۳-۱. شبیه‌سازی پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2)

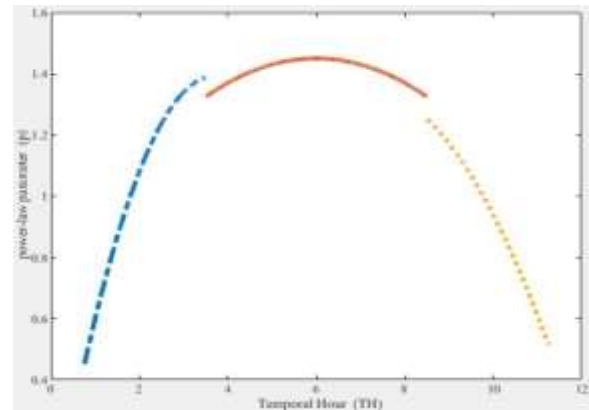
در این بخش به بررسی تغییرات پارامتر C_n^2 در ارتفاع‌های مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور دو مدل HV و HAP برای پیش‌بینی این پارامتر باهم مقایسه می‌شوند. شکل (۱) تغییرات پارامتر C_n^2 را تا ارتفاعات ۳۰ km برای مدل HV نشان می‌دهد. همچنین در شبیه‌سازی انجام‌شده برای این مدل سرعت باد ۱۰، ۲۱ و ۳۰ m/s و $C_n^2(0)$ برابر 10^{-13} و 10^{-14} m^{-2/3} در نظر گرفته شد.

مطابق شکل (۳)، این مدل رفتار پارامتر C_n^2 را در ارتفاعات پایین بر خلاف مدل HV به خوبی نمایش می‌دهد. مقدار پارامتر C_n^2 با فاصله گرفتن از سطح زمین در ارتفاعات پایین برای مقادیر مختلف $C_n^2(h_0)$ و زمان‌های طول روز کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، خطوط نقطه‌چین و خط چین به ترتیب در زمان‌های ۹،۳۵ و ۱،۱۲ دارای مقادیر C_n^2 ، 10^{-14} و $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ هستند؛ همچنین خط توپر رفتار پارامتر C_n^2 را در زمان ظهر (TH=۶) نشان می‌دهد که دارای بیشترین مقدار C_n^2 یعنی $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ است و با افزایش ارتفاع، خط توپر با شیب تندتری نسبت به خطوط نقطه چین و خط چین تغییر می‌کند. این امر ناشی از غالب شدن جمله آخر رابطه (۲) است. این روند تا ارتفاع حدوداً ۴۰۰ م ادامه یافته و پس از آن، همگی روند مشابهی را طی می‌کنند. بنابراین باتوجه به کارآمدی مدل HAP برای پیش‌بینی مقدار پارامتر C_n^2 ، هم در وجود باد و هم در ارتفاعات پایین و ساعات مختلف زمانی روز، از این مدل در شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده خواهد شد.

۳-۲. شبیه‌سازی تأثیر اتمسفر بر پارامترهای باریکه لیزر

در این بخش تأثیر اتمسفر متلاطم و پارامتر C_n^2 با استفاده از مدل HAP بر پارامترهای باریکه لیزری همچون توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی بررسی شده است. بدین منظور لیزر پیوسته‌ای با پروفایل گاوسی ایده‌آل ($M^2=1$)، شعاع کمره ۱ cm و توان ۱ W در نظر گرفته شده است و طول موج لیزر برابر ۱۰۶۴ nm اختیار شد تا در پنجره اتمسفری قرار نگیرد و بتوان اثرات اتمسفر بر باریکه لیزری را به خوبی مشاهده کرد. در ابتدا صفحه مشاهده در ارتفاع ۳ km از سطح زمین و لیزر قرار گرفت تا با انتشار عمودی لیزر در اتمسفر، تغییرات توزیع شدت آن مورد بررسی قرار گیرد. مدل HAP با عامل p برابر ۱،۳۳ و مقادیر $C_n^2(h_0)$ برابر 10^{-14} ، 10^{-16} و $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ در نظر گرفته شد تا مقدار C_n^2 میانگین به ترتیب 10^{-15} ، 10^{-17} و $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ باشد. شکل (۴) تغییرات توزیع شدت میانگین باریکه لیزری را باتوجه به رابطه (۶)، روی محور x برای مقادیر مختلف C_n^2 و خلأ نشان می‌دهد.

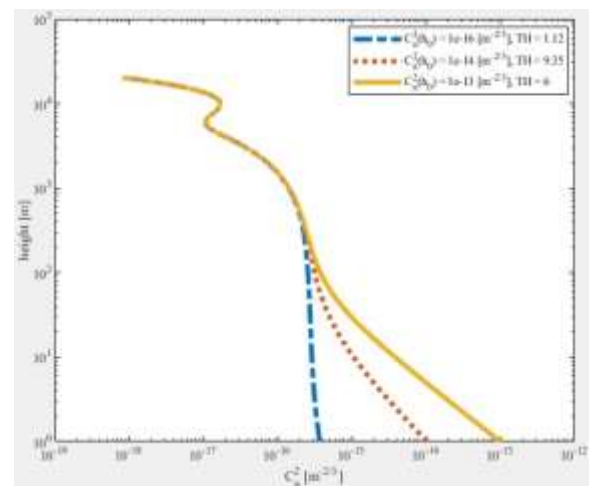
گرچه پروفایل گاوسی لیزر پس از انتشار در اتمسفر متلاطم دچار نوسانات شدت در طول زمان می‌شود، اما مطابق شکل (۴) توزیع شدت باریکه، گاوسی باقی می‌ماند که علت آن میانگین‌گیری زمانی از توزیع شدت است. همچنین قله توزیع شدت برای $C_n^2=0$ (محیط خلأ) بالاتر از سایر مقادیر C_n^2 است و هرچه مقدار C_n^2 بیشتر می‌شود، ارتفاع قله نیز کاهش یافته و اما شکل گاوسی خود را حفظ کند، زیرا شکل (۴) میانگینی از توزیع شدت را در مقادیر مختلف C_n^2 نشان می‌دهد. اما پهنای توزیع



شکل ۲. رفتار پارامتر p در ساعات مختلف روز: ۳ ساعت ابتدایی روز (خط نقطه)، ۶ ساعت میانی طول روز (خط توپر) و ۳ ساعت پایانی روز (نقطه‌چین).

مطابق شکل (۲)، در اوایل صبح به دلیل مایل تابیدن نور خورشید، پارامتر p (رابطه ۳) از کمترین مقدار خود یعنی ۰،۴۵ با شیب نسبتاً تندی شروع به افزایش می‌کند؛ سپس در چند ساعت میانی روز، پارامتر p به دلیل تابش نسبتاً مستقیم نور خورشید به کندی تغییر می‌کند (در زمان $3,5 < TH < 8,5$) و در وسط روز (TH=۶) به بیشترین مقدار خود یعنی ۱،۴۵ می‌رسد. در آخر با دور شدن از ساعات میانی روز و نزدیک شدن به غروب خورشید، پارامتر p با یک شیب نسبتاً تند کاهش می‌یابد.

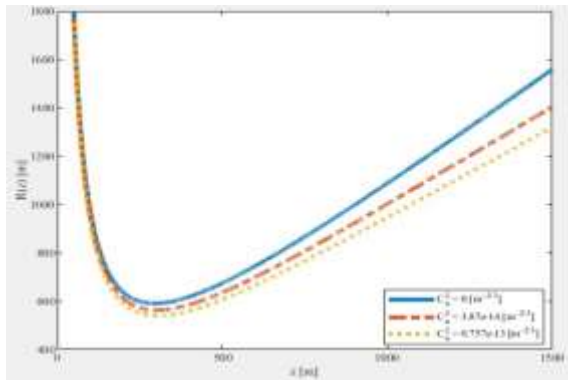
شکل (۳) رفتار پارامتر C_n^2 را برای مدل HAP (رابطه ۲) تا ارتفاع ۲۰ km نشان می‌دهد، که مقدار پارامترهای M ، v ، h_0 و h_s در آن به ترتیب برابر ۱، ۲۱ m/s، ۱ m و ۰ m است. همچنین مقدار $C_n^2(h_0)$ در ساعات زمانی روز ۶، ۹،۳۵ و ۱،۱۲ به ترتیب برابر 10^{-13} ، 10^{-14} و $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ است.



شکل ۳. پروفایل پارامتر C_n^2 برای مدل HAP در ساعات مختلف: $C_n^2(h_0)=10^{-14}$ و TH=9.35 (خط چین)، $C_n^2(h_0)=10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ و TH=1.12 (خط نقطه‌چین) و $C_n^2(h_0)=10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ و TH=6 (خط توپر).

علاوه بر واگرایی ذاتی خود، بزرگتر شده که این ناشی از متأثر شدن پرتوهای نور طی انتشار در اتمسفر است و هرچه مقدار C_n^2 بیشتر باشد، مقدار پهن‌شدگی بیشتری در اندازه کمر باریکه مشاهده می‌شود.

در ادامه تغییرات شعاع انحنای باریکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت نیز، انتشار باریکه لیزری به صورت افقی در نظر گرفته شده است. شکل (۶) تغییرات شعاع انحنای باریکه‌ی منتشرشده (رابطه ۱۰) در راستای z را نشان می‌دهد. این بررسی نیز با در نظر گرفتن مقادیر C_n^2 مذکور انجام شده است.

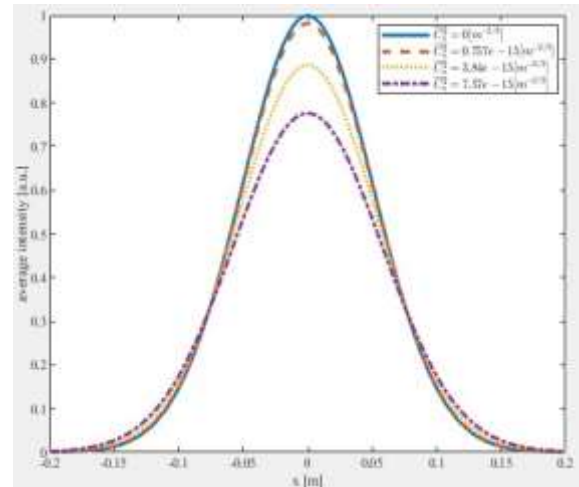


شکل ۶. تغییرات شعاع انحنای باریکه لیزری بر حسب انتشار در راستای z برای C_n^2 های مختلف: $0 \text{ m}^{-2/3}$ (خط توپر)، $3.87 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (خط چین) و $0.757 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (نقطه چین).

مطابق شکل (۶)، با افزایش فاصله انتشار، شعاع انحنای باریکه لیزری با طول موج 1064 nm ، در $C_n^2 = 0 \text{ m}^{-2/3}$ به صورت ذاتی تغییر کرده و در فاصله حدوداً 300 m به کمترین مقدار خود می‌رسد و سپس روند آن صعودی می‌شود. اما با انتشار باریکه در اتمسفر متلاطم، شعاع انحنا علاوه بر تغییرات ذاتی تحت تأثیر پارامتر C_n^2 قرار می‌گیرد، به طوری که با افزایش مقدار پارامتر C_n^2 ، اندازه لکه باریکه بیش تر شده (مطابق شکل ۵) و در نتیجه شعاع انحنای باریکه کاهش می‌یابد. همچنین شعاع انحنای باریکه منتشر شده در سه مقدار مذکور C_n^2 تا فاصله 95 m ، به دلیل کوتاه بودن فاصله انتشار و در نتیجه تأثیر کم اتمسفر، مقادیر تقریباً یکسان دارند.

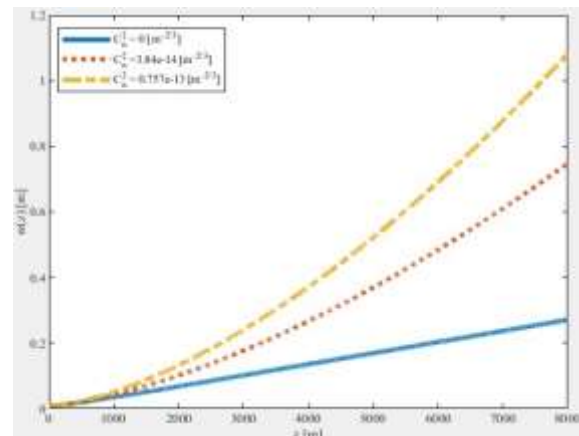
در آخر طول ریلی باریکه منتشرشده (رابطه ۱۱) در اتمسفر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با در نظر گرفتن پارامتر C_n^2 از 0 تا $4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ، مقادیر مختلف Z_R به دست آمده است. شکل (۷) تغییرات طول ریلی باریکه بر حسب تغییرات C_n^2 را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۷)، در خلأ و $C_n^2 = 0$ ، طول ریلی باریکه منتشرشده حدوداً 2953 m به دست می‌آید که با افزایش پارامتر C_n^2 ، طول ریلی روندی افزایشی داشته و در C_n^2 برابر با $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ به بیشینه خود یعنی 3094 m می‌رسد، سپس با افزایش پارامتر C_n^2 ، روند Z_R کاهشی می‌شود.

شدت (FWHM) برای هر سه مقدار C_n^2 تقریباً برابر است. همچنین دنباله توزیع شدت با افزایش پارامتر C_n^2 افزایش می‌یابد.



شکل ۴. میانگین توزیع شدت باریکه لیزری منتشر شده در اتمسفر متلاطم با میانگین C_n^2 های مختلف: $0 \text{ m}^{-2/3}$ (خط توپر)، $0.757 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (خط چین)، $3.84 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (نقطه چین)، $7.57 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (خط نقطه).

پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، اندازه لکه باریکه منتشرشده در اتمسفر (رابطه ۹) است. در این بررسی انتشار باریکه لیزری به صورت افقی در نظر گرفته شده است. این کار برای سه حالت و با مقادیر پارامتر C_n^2 برابر با 10^{-14} ، 3.84×10^{-14} و $7.57 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ انجام شده است. شکل (۵) تغییرات اندازه لکه باریکه بر حسب فاصله انتشار z را در اتمسفر با C_n^2 های مذکور نشان می‌دهد.



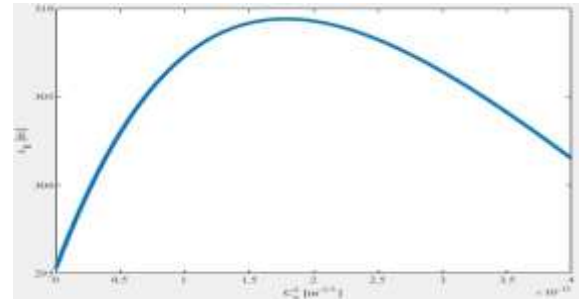
شکل ۵. تغییرات اندازه لکه باریکه لیزری بر حسب انتشار در راستای z برای C_n^2 های مختلف: $0 \text{ m}^{-2/3}$ (خط توپر)، $3.84 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (نقطه چین) و $0.757 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (خط چین).

مطابق شکل (۵)، در عدم حضور تلاطم اتمسفر و نوسانات ضریب شکست، اندازه لکه باریکه با افزایش فاصله انتشار، افزایش می‌یابد که نشان دهنده واگرایی ذاتی باریکه است. اما در حضور اتمسفر متلاطم و با افزایش مقدار پارامتر C_n^2 ، اندازه لکه باریکه

پارامترهای آن اثر گذاشته و کارایی آن را محدود می‌کند و باید روی آن بررسی‌های بیشتری صورت گیرد.

۵. مراجع‌ها

- [1] Ahmad, S. A.; Mohsin, M.; Ali, S. M. Z. "Survey and Technological Analysis of Laser and its Defense Applications"; Defence Technology 2021, 17.2, 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.012>.
- [2] Taheri, M.; Vahedi, M. "Optical Fiber Sensors and their Application with Passive Protection"; Unit, Printing and Publishing Institute of Imam Hossein University (AS), 2019.
- [3] Fadavi, A. "Lidar System and Its Application in Naval Operations" Military Science and Technology 2010, 7.17, 97-116.
- [4] Lyubomir, L.; Edmunds, T.; Risham Singh, G. "Applications of Laser Technology in the Army"; Journal of Defense Management 2021, 11, 210.
- [5] Eslami Majd, A.; Naseri, A.; Adaminejad, H. "Investigation of the Effective Parameters of the Second Laser for the Decoy of the Nest Finder Laser Searcher"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2019, 10.2, 131-140.
- [6] Andrews, L. C.; Phillips, R. L. "Laser Beam Propagation Through Random Media"; SPIE Publications: 2nd edition. 2005.
- [7] Canuet, O.; François, L. "Atmospheric Turbulence Profile Modeling for Satellite-Ground Laser Communication"; Master's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [8] Qiang, X.; Liu, J.; Cheng, D.; Xiong, S.; Ye, X. "Irradiance Scintillation for Laser Beam Propagation in Turbulent Atmosphere"; Proc. Soc. Photo-opt. Instrum. Eng. 2002, 4926, 168-174. <https://doi.org/10.1117/12.481687>.
- [9] Jabczyński, J. K.; Gontar, P. "Impact of Atmospheric Turbulence on Coherent Beam Combining for Laser Weapon Systems"; Defence Technology. 2021, 17.4, 1160-1167. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.021>.
- [10] Andrews, L. C.; Phillips, R. L.; Wayne, D.; Leclerc, T.; Sauer, P.; Crabbs, R.; Kiriazes, J. "Near-Ground Vertical Profile of Refractive-Index Fluctuations"; Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 2009, 7324, 11-22. <https://doi.org/10.1117/12.820369>.
- [11] Mahmood, D. A.; Naif, S. S.; Al-Jiboori, M. H.; Al-Rbayee, T. "Improving Hufnagel-Andrews-Phillips Model for Prediction Cn2 Using Empirical Wind Speed Profiles"; J. Atmos. Sol-Terr. Phys. 2022, 240, 105952. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105952>.
- [12] Rasouli, S.; Taghi Tavassoly, M. "Measurement of the Refractive-Index Structure Constant, C_n², and its Profile in the Ground Level Atmosphere by Moiré Technique"; Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 2006, 6364, 101-111. <https://doi.org/10.1117/12.683873>.
- [13] Bakhshi, H.; Darudi, A. "Analysis of Effective Beam Propagation Parameters on a FSO Link of Optics Lab. of University of Zanjan"; Icop. 2020, 26.0, 41-44.
- [14] Hadilou, N.; Siampoor, H.; Alavinejad, M. "Improvement of Beam Quality Factor of Gaussian Schell-Model Beams by Using of Phase Aperture in a Turbulent Atmosphere"; Icop. 2014, 20.0, 857-860.
- [15] Ghasemi, S. H.; Haghparast, A. "The Effects of Step Bulk Arrangement in Propagation of High-power Laser Beam in Atmosphere"; Braz. J. Phys. 2023, 53.1, 23.



شکل ۷. تغییرات طول ریلی بر حسب تغییرات پارامتر C_n^2 .

۴. نتیجه‌گیری

بررسی و مطالعه باریکه لیزری در اتمسفر متلاطم اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله ابتدا پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر (C_n^2) برای اتمسفر متلاطم بررسی شده و سپس پارامترهای باریکه لیزری منتشرشده در آن مورد مطالعه قرار گرفت. برای پیش‌بینی رفتار پارامتر C_n^2 ، از مدل‌های هافناگل - والی (HV) و هافناگل - آندریس - فیلیپس (HAP) استفاده شد. مدل HV با تغییرات ارتفاع، سرعت باد و پارامتر ساختار ضریب شکست اتمسفر سطح زمین ($C_n^2(0)$) تغییر می‌کند؛ اما این مدل، رفتار پارامتر C_n^2 را در ارتفاعات نزدیک به سطح زمین را به خوبی نمایش نمی‌دهد. مدل HAP رفتار پارامتر C_n^2 را علاوه بر ارتفاعات بالا، در نزدیک سطح زمین پیش‌بینی کرده و با تغییرات سرعت باد، پارامتر $C_n^2(0)$ و ساعات زمانی طول روز رفتار آن تغییر می‌کند؛ بنابراین با وجود چنین مشکلاتی نتایج نشان می‌دهد که مدل HAP، در ارتفاعات پایین و در طول روز، مدل مناسبی برای پیش‌بینی پارامتر C_n^2 است. با شبیه‌سازی انتشار باریکه لیزری در اتمسفر متلاطم، تأثیر پارامتر C_n^2 بر پارامترهای توزیع شدت، اندازه لکه، شعاع انحنا و طول ریلی باریکه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد در $C_n^2=0$ ، قله میانگین زمانی شدت در صفحه مشاهده به بیشترین مقدار خود رسیده و با افزایش مقدار پارامتر C_n^2 ، کاهش می‌یابد؛ اما توزیع شدت، به طور میانگین شکل گاوسی خود را حفظ می‌کند. اندازه لکه باریکه منتشر شده در خلأ، به صورت ذاتی گسترش می‌یابد و با انتشار در اتمسفر متلاطم علاوه بر واگرایی ذاتی، با افزایش پارامتر C_n^2 ، اندازه لکه نیز افزایش می‌یابد. همچنین شعاع انحنا باریکه منتشرشده در خلأ نیز بررسی شد و نتایج نشان دادند که شعاع انحنا باریکه به صورت ذاتی ابتدا کاهش یافته و سپس روند افزایشی را در پیش می‌گیرد، اما با انتشار باریکه در اتمسفر متلاطم، علاوه بر تغییرات ذاتی، با افزایش مقدار C_n^2 ، شعاع انحنا کاهش می‌یابد. در آخر طول ریلی باریکه منتشرشده در اتمسفر متلاطم بررسی شد و نشان داده شد که طول ریلی باریکه، با افزایش پارامتر C_n^2 ، ابتدا روند افزایشی دارد و سپس روند آن کاهشی می‌شود؛ بنابراین یکی از چالش‌های مهم استفاده لیزر در فضای آزاد، اتمسفر متلاطم است که روی

- MVKS Turbulence"; *J. Mod. Optic.* 2019, 66.13, 1392-1407. <https://doi.org/10.1080/09500340.2019.1625980>
- [24] Andrews, L. C.; Phillips, R. L.; Wayne, D.; Sauer, P.; Leclerc, T.; Crabbs, R. "Creating a C_n^2 Profile as a Function of Altitude using Scintillation Measurements along a Slant Path"; *Proc. SPIE* 2012, 8238, 95-106. <https://doi.org/10.1117/12.913756>.
- [25] Yousefi, M.; Talatian Azad, R.; Kashani, F.; Ghafary, B. "Scintillation Index Effects on the Bit Error Rate in Free Space Optical Communication of Incoherent Flat-Topped Laser Beam Propagating Through Turbulent Atmosphere"; *Iran. J. Sci. Technol.* 2015, 39.A3, 369. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.044>.
- [26] Hricha, Z.; Yaalou, M.; Belafhal, A. "Intensity Characteristics of Double-Half Inverse Gaussian Hollow Beams Through Turbulent Atmosphere"; *Opt. Quant. Electron.* 2020, 52, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02318-4>.
- [27] Hecht, E. "Hecht Optics"; Addison Wesley, 1998, 213-214.
- [28] Ricklin J. C.; Davidson, F. M. "Atmospheric Turbulence Effects on a Partially Coherent Gaussian Beam: Implications for Free-Space Laser Communication"; *J. Opt. Soc. Am. A.* 2002, 19.9, 1794-1802. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.001794>
- [29] Yuan, Y.; Liu, X.; Qu, J.; Yao, M.; Gao, Y.; Cai, Y. "Second-Order Statistical Properties of a J0-Correlated Schell-Model Beam in a Turbulent Atmosphere"; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2019, 224, 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.021>
- [16] Chu, X.; Liu, Z.; Wu, Y. "Propagation of a General Multi-Gaussian Beam in Turbulent Atmosphere in a Slant Path"; *J. Opt. Soc. Am. A.* 2008, 25.1, 74-79. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.000074>
- [17] Ji, X.; Li, X. "Directionality of Gaussian Array Beams Propagating in Atmospheric Turbulence"; *J. Opt. Soc. Am. A* 2009, 26.2, 236-243. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.26.000236>.
- [18] Ji, X.; Eyyuboğlu, H. T.; Baykal, Y. "Influence of Turbulence on the Effective Radius of Curvature of Radial Gaussian Array Beams"; *Opt. Express.* 2010, 18.7, 6922-6928. <https://doi.org/10.1364/OE.18.006922>.
- [19] Ji, X.; Pu, Z. "Effective Rayleigh Range of Gaussian Array Beams Propagating Through Atmospheric Turbulence"; *Opt. Commun.* 2010, 283.20, 3884-3890. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.06.025>.
- [20] Chib, S.; Dalil-Essakali, L.; Belafhal, A. "Comparative Analysis of Some Schell-Model Beams Propagating Through Turbulent Atmosphere"; *Opt. Quant. Electron.* 2022, 54.3, 175.
- [21] Reich, S.; Schäffer, S.; Lueck, M.; Wickert, M.; Osterholz, J. "Continuous Wave High-Power Laser Propagation in Water is Affected by Strong Thermal Lensing and Thermal Blooming Already at Short Distances"; *Sci. Rep.* 2021, 11.1, 22619. doi: 10.1038/s41598-021-02112-6.
- [22] Siampoor, H.; Hadilou, N.; Alavinejad, M. "Propagation of High Power Laser Beams through Atmosphere"; *Icop.* 2015, 21.0, 105-108. <https://doi.org/10.1364/AO.15.001479>
- [23] Mohamed, A.; Chatterjee, M. "Non-Chaotic and Chaotic Propagation of Stationary and Dynamic Images Through