

تعیین پروفایل ضریب خاموشی اپتیکی در محیط‌های ناهمگن اتمسفری با استفاده لیدار جذبی-تفاضلی گاز کربنیک

فائزه سادات قائم مقامی^۱، پرویز پروین^{۱*}، سید فرشید قائم مقامی^۲، علی بوالی^۱، فضل‌الله برنا^۳

^۱دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲شرکت فنی مهندسی ستیغ فرا افق

^۳مرکز هواشناسی شهید مطهری، مشهد، ایران

*Corresponding author: Parvin@aut.ac.ir

چکیده - در این پژوهش به منظور محاسبه پروفایل ضریب خاموشی اپتیکی، از یک لیدار جذبی تفاضلی بر پایه لیزر TEA CO₂ استفاده شده است. محاسبه پروفایل ضریب خاموشی، با استفاده از حل معادله لیدار، به روش نقطه مرزی نزدیک (حل کلت) انجام شده است. از روش‌های نظری مناسب، برای پیدا کردن پارامترهای این معادله، استفاده شده است. به دلایل متعددی همچون تمام سامانه‌های سنجش از راه دور، قبل از هرگونه استفاده از داده‌های لیدار، روش‌های پردازش سیگنال مناسب، برگزیده و به کار گرفته شده است.

کلید واژه- اثر حلقوی، روش نقطه مرزی نزدیک، حذف نوفه، ضریب اپتیکی خاموشی اتمسفر، لیدار جذبی تفاضلی گاز کربنیک (DIAL).

Determination of the Optical extinction profile coefficient in heterogeneous atmospheric environment, using TEA-CO₂ DIAL

^۱Faezeh Sadat Ghaem maghami, ^{۱*}Parviz Parvin, ^۲Sayed Farshid Ghaem maghami, ^۱Ali Bavali, ^۳Fazlollah Borna

^۱Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

^۲Setigh Fara Ofogh Engineering Company, Tehran, Iran.

^۳Shahid Mottahari meteorological Center, Mashhad, Iran

Abstract- In this study, the TEA CO₂ laser based differential absorption lidar is used, in order to calculate the optical extinction coefficient profiles. Calculation of Extinction coefficient profile, is done using solution of lidar equation by near boundary method (NBM) approximation. To find the parameters of the equation, appropriate theoretical methods is used. For many reasons, like all remote sensing system, before using of the lidar data, suitable signal processing methods are selected and applied.

Keywords: Ringing effect, Near Boundary Method (NBM), Denoising, Extinction Coefficient Profile, and TEA-CO₂ DIAL.

۱- مقدمه

ها^۶ و مولکول‌های اتمسفر، هستند. این رابطه توان بازگشتی از اتمسفر را نشان می‌دهد. معادله (۲)، حل معادله لیدار به روش تحلیلی کلت را ارائه می‌دهد. در این روش، احتیاج به انتخاب یک نقطه به عنوان مرز است که در آن نقطه ضرایب خاموشی و پس‌پراکندگی مشخص باشد. به دلیل انتخاب مرز در نزدیکی لیدار به این نوع از حل، روش نقطه مرزی نزدیک^۷ می‌گویند.

$$\kappa(r) = \frac{Z(r)}{\left(\frac{Z(r_b)}{\kappa(r_b) + \frac{\Pi_m(r_b)}{\Pi_a(r_b)} \kappa_m(r_b)} \right) - 2 \int_{r_b}^r Z(r') dr' - \frac{\Pi_m(r)}{\Pi_a(r)} \kappa_m(r)}$$

اندیس b ، بیانگر مرز است. متغیر $Z(r)$ عبارتند از $r^2 \times P(r)$ عبارت Π_m ، Π_a ، نسبت ضریب پس‌پراکندگی مولکولی (افشانه‌ها) به ضریب خاموشی مولکولی (افشانه‌ها) است. در این پژوهش برای یافتن نقطه مرزی صحیح و مقدار ضرایب اپتیکی آن، از روش برازش کمترین مربعات بر داده‌های لیدار، بر مبنای معادله (۱) بهره‌گیری می‌شود.

۲-۲- پدیده‌های فیزیکی

در صورت کوچک بودن ابعاد ذرات اتمسفری، نسبت به طول موج لیزری ($\lambda \gg a$)، پراکندگی ریلی^۸ رخ می‌دهد. به دلیل وابستگی طول‌موجی^۴ در رابطه سطح مقطع پراکندگی ریلی، به ازای طول‌موج‌های بزرگ، پراکندگی ریلی قابل صرف‌نظر کردن است. با در نظر گرفتن رژیم ($\lambda < a$)، که در مورد لیزرهای ناحیه فروسرخ صادق است، با افزایش اندازه ذره نسبت به طول‌موج باریکه لیزری، الگوی پراکندگی در اتمسفر به پراکندگی می^۹، با وابستگی طول‌موجی λ^{-x} ($0.4 < x < 0.5$) تغییر می‌کند. این نوع پراکندگی اغلب در مورد بخار آب، افشانه‌ها و سنگ‌های آتشفشانی اتفاق می‌افتد. پدیده دیگری که سبب حذف

لیدار جذبی-تفاضلی^۱، یک ابزار کارآمد برای آشکارسازی، ردیابی و تعیین غلظت گاز، به شکل سنجش از راه دور، به شمار می‌آید [1]. در مقایسه با ابزارهایی همچون ابرسنج^۲ و انتقال‌سنج^۳، لیدار قادر است پرفایل‌های ضرایب اپتیکی را در تمام جهات و به شکل نقطه‌ای و در هر شرایط آب‌و-هوایی، تعیین کند. در شرایط اتمسفر ناهمگن، با استفاده از حل‌های نقطه مرزی معادله لیدار، که اولین بار توسط کلت^۴، در سال ۱۹۸۱ و بعد از آن فرنالد^۵، در سال ۱۹۸۴، ارائه شد، می‌توان ضریب اپتیکی خاموشی را که در به دست آوردن غلظت گازهای ردیابی شده توسط سامانه لیدار، نقش تعیین کننده‌ای دارد، محاسبه نمود [2]. با این وجود از ابتدای دوره طراحی و ساخت سامانه‌های لیدار، عوامل محدود کننده‌ای سبب کاهش توانایی آن‌ها، شده است. بنابراین اجرای روش‌های پردازش سیگنال، بر داده‌های خام لیدار، توصیه شده است [3].

۲- مبانی نظری

منظور از اتمسفر ناهمگن، اتمسفری است که در آن، میرایی بیم لیزری، ناشی از مولکول‌های هوا و ناهمگنی-های دیگری همچون توده گازی جاذب، باشد.

۲-۱- معادله لیدار

معادله لیدار، برای یک سامانه لیدار تک طول‌موج و در یک اتمسفر ناهمگن مطابق رابطه (۱) است.

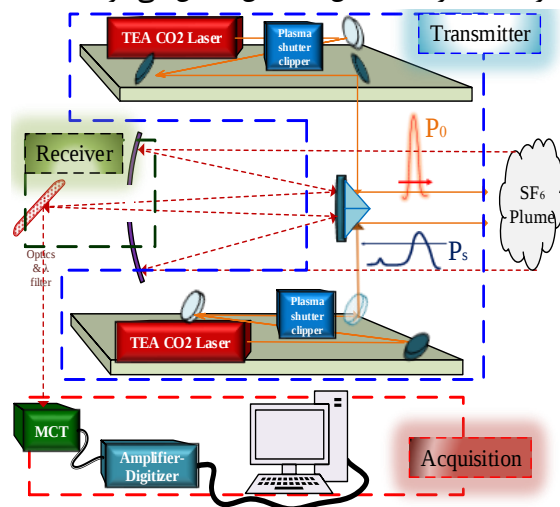
$$P(\lambda, r) = P_0 \xi(r) \xi(\lambda) \frac{A}{r^2} (\beta_a(r) + \beta_m(r)) \times \exp \left(-2 \int_{r_0}^r (\kappa_a(r') + \kappa_m(r')) dr' \right) \quad (1)$$

که P_0 ، توان لیزری، $\xi(\lambda)$ و $\xi(r)$ ، به ترتیب، فاکتور گذردهی طیفی مربوط به آشکارساز و فاکتور همپوشانی بین تلسکوپ و لیزر است. فاصله توده از سامانه لیدار r و A_0 ، سطح مقطع اپتیکی تلسکوپ است. ضرایب κ_a و κ_m ، ضرایب خاموشی ناشی از افشانه‌ها و مولکول‌ها، و ضرایب β_a و β_m ، به ترتیب ضرایب پس‌پراکندگی ناشی از افشانه‌ها^۶

^۱ Differential absorption Lidar (DIAL)
^۲ Nephelometer
^۳ Transmissometer
^۴ Klett
^۵ Fernald

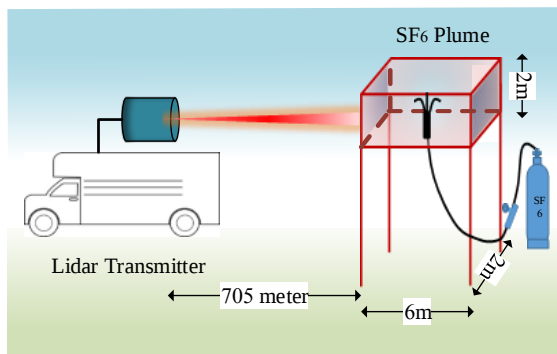
^۶ Aerosols
^۷ Near Boundary Method
^۸ Rayleigh
^۹ Mie

و بر روی آشکارساز MCT، متمرکز می‌شود و در نهایت سیگنال بعد از عبور از یک تقویت کننده-دیجیتالیزر، تقویت شده و به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌شود.



شکل ۳: طرحی از سامانه لیدار DiAl کشسان.

در آزمایش‌ها، گاز SF_6 سبب ایجاد ناهمگنی در اتمسفر استفاده شده است. در فاصله تقریبی ۷۰۰ متری گاز SF_6 ، به شکل کنترل شده به جعبه‌ای با ابعاد $6 \times 2 \times 2$ m با دو وجه باز وارد شده و در اتمسفر رها می‌شود. شکل (۳) چگونگی جمع‌آوری داده‌ها، از اتمسفر را نشان می‌دهد.



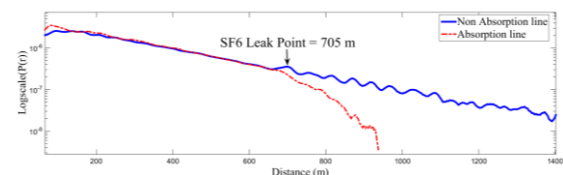
شکل ۳: نمایی از سلول پرتو دهی و تزریق گاز SF_6 به اتمسفر.

شرایط آب‌وهوایی این پژوهش با همکاری مرکز هواشناسی مشهد، جمع‌آوری شده است.

۴- نتیجه‌گیری

فلوچارت شکل (۴)، بر مبنای روش‌های ذکر شده در قسمت مبانی و سیگنال بازگشتی در طول موج $10.247 \mu\text{m}$ برای تعیین ضریب خاموشی اتمسفر ناهمگن، است

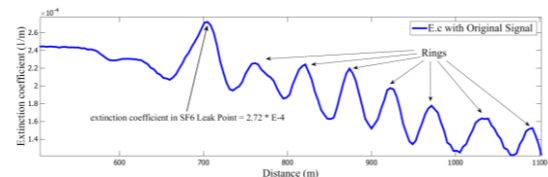
انرژی نورانی از باریکه لیزری می‌شود حضور گاز جاذب مثلاً گاز SF_6 در اتمسفر است. در شکل (۱) توان بازگشتی مربوط به سامانه لیدار در دو طول موج $10.247 \mu\text{m}$ و $10.551 \mu\text{m}$ نشان داده شده است. طول موج $10.551 \mu\text{m}$ بر روی خط جذب گاز SF_6 قرار دارد. مطابق با شکل (۱) باریکه لیزری به وسیله گاز جاذب، جذب می‌شود در صورتیکه طول موج غیرجذبی، فقط پراکندگی می‌را تجربه می‌کند.



شکل ۴: توان بازگشتی در دو طول موج جذبی و غیرجذبی

۲-۳ پردازش سیگنال

سیگنال‌های لیدار همچون همه سیگنال‌های سنجش از راه دور، احتیاج به حذف نویز دارد. به دلیل نوع خاص سیگنال لیدار در این پژوهش برای حذف نویز، روش آستانه‌گذاری نرم بر مبنای تبدیل موجک به کار رفته است. در هنگام آشکارسازی سیگنال در لیدار، هرگونه عدم تطابق در سامانه، باعث بروز اثر Ringing، در داده‌های خام می‌شود. شکل (۲) تاثیر مخرب این اثر در ضریب خاموشی محاسبه شده با داده‌های همین لیدار، را نشان می‌دهد. برای استفاده از چنین داده‌هایی، با روش‌های پردازش سیگنال، اثر Ringing جبران‌سازی می‌شود.

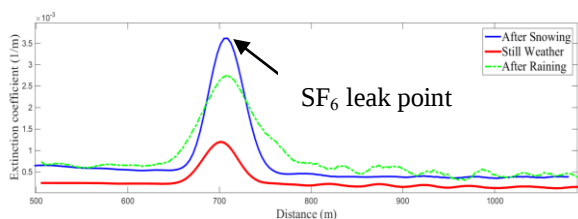


شکل ۲: ضریب خاموشی محاسبه شده در حضور Ring [5].

۳- روش آزمایش

در آزمایش‌های انجام شده، از یک سامانه لیدار جذبی-تفاضلی، مجهز به دو لیزر کوک‌پذیر TEA-CO_2 ، با گسترگی طیفی $9-11 \mu\text{m}$ استفاده شده است. شکل (۲)، طرحی از این سامانه را نشان می‌دهد. تاخیر زمانی بین دو بخش لیزری، $200 \mu\text{s}$ بوده و نرخ تکرار 0.3 Hz است. قبل از ارسال تپ‌های لیزری به اتمسفر، پلاسما شاتر، دنباله نیتروژنی تپ‌های لیزری را حذف می‌کند. فوتون‌های بازگشتی از اتمسفر، توسط تلسکوپ کاسگرین جمع‌آوری

نقطه تزریق گردیده است. علت افزایش ضریب خاموشی از دیدگاه فیزیکی، افزایش چشمگیر پراکندگی چندگانه به دلیل حضور گاز است. با وارد شدن فوتون‌های لیزر در توده گاز، به دلیل چگال بودن توده گاز، فوتون‌ها چندین بار از مولکول‌های گاز بازتاب یافته و سپس به سمت سامانه لیدار پراکنده می‌شوند. مطابق شکل (۵) میزان پراکندگی چندگانه در هوای عادی بسیار کم است. این ضریب قبلاً توسط گروه لیدار بدون اعمال روش‌های پردازش سیگنال مطابق شکل (۲) محاسبه شده بود [5]. در شکل (۶) منحنی‌های ضریب خاموشی مربوط به سه شرایط آب‌وهوایی مختلف نشان داده شده است.

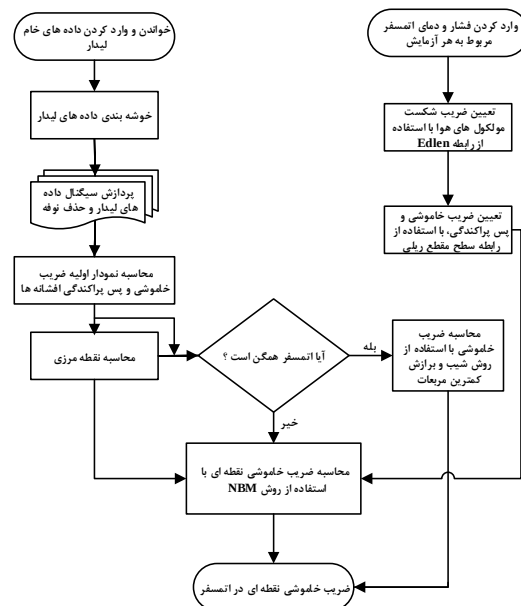


شکل ۶: پرفایل ضریب خاموشی در سه شرایط آب‌وهوایی.

در سه منحنی شکل (۶) غلظت گاز SF_6 متفاوت است. با افزایش مقدار گاز تزریقی به اتمسفر در فاصله ۷۰۰ متری، پراکندگی چندگانه می‌در نقطه تزریق و اطراف آن بیشتر شده و حذف انرژی بیشتری از باریکه لیزری اتفاق می‌افتد. در نتیجه ضریب خاموشی شروع به افزایش می‌کند. متفاوت بودن درصد رطوبت در سه روز مختلف سبب شده سطح منحنی‌ها در شکل (۶) متفاوت شود. رطوبت بالای هوای پس از باران (مطابق با جدول (۱)) و در مرتبه دوم، پس از برف سبب میزان بالای حذف انرژی از باریکه لیزری به دلیل افزایش پراکندگی می‌و جذب و در نتیجه افزایش سطح ضریب خاموشی شده است. کاهش رطوبت در هوای صاف، کاهش پراکندگی می‌و جذب و در نتیجه کاهش سطح ضریب خاموشی را در بر دارد.

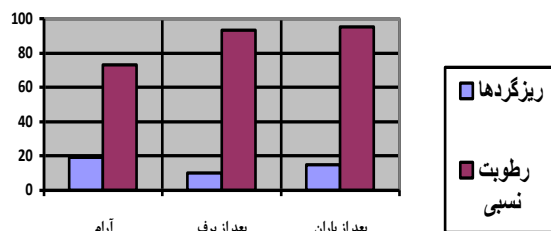
مراجع

- [1] A. R. Bahrampour, A. A. Askari "Fourier-wavelet regularized deconvolution for lidar systems based on TEA- CO_2 laser", Elsevier, Optics Communications 257, pp.97-111, 2005.
- [2] V. Kovalev, W. E. Eichinger, *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*, p. 182, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] J. D. Klett "Stable analytical inversion solution for processing lidar return", Applied Optics, Vol.20, No.2, 1981.
- [4] A. Abbate, C. M. DeCusatis, P. K. Das, *Applications of Wavelets to the Analysis of Transient Signals*, p. 386, Springer Science & Business Media, 2012.



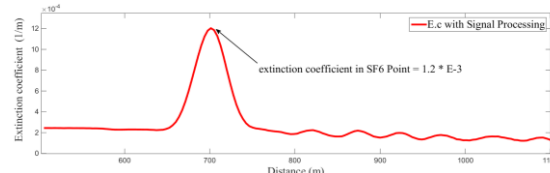
شکل ۴: فلوچارت برنامه محاسبه ضریب خاموشی به شکل نقطه ای.

بر طبق فلوچارت، نقطه مرزی در فاصله ۵۰۰ متری انتخاب شده است. آزمایش‌ها با استفاده از سامانه لیدار، در سه شرایط آب‌وهوایی انجام شد که میزان رطوبت و غلظت ریزگردها به شکل میانگین در سه روز مختلف در جدول (۱) ذکر شده است.



جدول ۱: شرایط آب‌وهوایی در روزهای آزمایش [5].

پرفایل ضریب خاموشی به روش NBM با استفاده از فلوچارت بالا مطابق با شکل (۵)، به دست آمده است:



شکل ۵: فلوچارت برنامه، برای محاسبه ضریب خاموشی.

در شکل (۵) حضور گاز SF_6 به عنوان ناهمگنی، افزایش چشمگیر ضریب خاموشی را سبب شده و پخش این گاز به شکل گوسی موجب افزایش ضریب خاموشی در اطراف

- [5] H. Kariminezhad, P. Parvin, F. Borna, A. Bavali, "SF₆ leak detection of high-voltage installations using TEA-CO₂ laser-based DIAL", Elsevier, Optics and Lasers in Engineering 48, pp 491-499, 2010.