بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

راه اندازی لیدار دو محوری با دو طول موج و اندازه گیری تابع فازی

حمیدرضا دارابیان[۱]، احمد درودی[۱]، امیر معصومی[۱] و محمد محسنی فاضل[۱]

۱-گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

ما اقدام به ساخت لیدار دو محوری با دو طول موج کردیم تا به وسیله آن بتوانیم تابع فازی هواویزهای موجود در زنجان را به دست آوریم. برای این کار از دو لیزر با طول موج های ۵۳۲ و ۶۵۰ نانومتر به عنوان فرستنده و برای گیرنده هم از یک دوربین دیجیتالی *(DSLR)* استفاده کردیم. تابع فازی از شدت پراکندگی در هر دو طول موج اندازه‌گیری و به صورت تئوری نیز از نظریه می محاسبه می‌شود. از مقایسه تابع فاز اندازه‌گیری شده و تئوری، تابع توزیع اندازه ذرات و نوع هواویزها مشخص می‌شود.

کلید واژه: لیدار دو محوری-تابع فازی- هواویز- نظریه می- تابع توزیع ذرات

Establishment of a Bistatic Lidar with two wavelengths and measuring the phase function

Hamidreza Darabian[1], Ahmad Darudi[1], Amir Masoumi[1], Mohammad Mohseni Fazel[1]

1-Department of physics, university of zanjan, PO Box 45195-313, Zanjan, Iran

A bistatic Lidar via two wavelengths has developed and constructed for measuring phase function of the aerosols in Zanjan city. The Bistatic Lidar consists of two diode laser of 532nm and 650nm wavelength as transmitters and a digital DSLR camera as a receiver. The phase function of the aerosols is measured from scattering intensities at two wavelengths and also calculated from Mie scattering theory. Comparison of the measured and simulated phase functions lead us to determine the size distribution and type of aerosols.

Keywords: bistatic Lidar- phase function- aerosol- Mie theory- particle size distribution

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

هواویزها به عنوان ذرات معلق در جو که به صورت مایع یا جامد در جو معلق هستند، نقش مهمی را در تغییرات اقلیم و شرایط آب و هوایی ایفا می‌کند. از این رو بررسی این ذرات و شناخت خواص و اثرات آن‌ها از اهمیت خاصی برخورد است. از روش‌های مهمی که در سنجش این ذرات به کار می‌رود روش‌های از راه دور می‌باشد که با توجه به ابزارهای آن می‌توان ویژگی‌های مختلفی از ذرات را اندازه‌گیری کرد. ابزارهای متنوعی در این نوع اندازه‌گیری استفاده می‌شود که یکی از مهمترین این ابزارها لیدار می‌باشد[۱]. یکی از انواع این لیدارها، لیدار دو محوری است که ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری تابع فاز پراکندگی ذرات موجود در جو است[۲]. تابع فاز پراکندگی، تابع توزیع زاویه‌ای شدت پراکندگی توسط ذره است که این تابع وابسته به طول موج فرودی، اندازه ذره و ضریب شکست است[۳].

روابط تحلیلی

برای به دست آوردن روابط مربوط به پراکندگی ذرات از حل روابط ماکسول و انتشار موج الکترومغناطیس در یک محیط با ضریب شکست n=1 در حضور یک کره با ضریب شکست m استفاده می‌کنیم. تقریب کره گرفتن ذرات از این رو تقریب مناسبی است که نسبت به حالتی که این روابط برای ذرات غیر کروی محاسبه می‌شود اختلافی کمتر از ۵ درصد دارد[۴]. طول موج و اندازه ذرات از دیگر پارامترهایی است که در روابط وارد می‌شود. بعد از این که محاسبات برای یک ذره انجام شد می‌توانیم تمام این مراحل را برای توزیع دلخواهی از ذرات تکرار کنیم. معادله را در مختصات کروی با در نظر گرفتن مرکز ذره به عنوان مبدا مختصات حل می‌کنیم. پس از اعمال شرایط مرزی در مرز بین کره و محیط، ضرایب جملات بسل و هنکل که به عنوان جواب‌های معادله هستند، را به دست خواهیم آورد. سپس توابع S_1 و S_2 که توابع پراکندگی نام دارد را به صورت زیر تعریف می‌کنیم[۵]:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left[a_n \frac{1}{\sin(\theta)} P_n^1(\cos(\theta)) + b_n \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos(\theta)) \right] \quad (۱)$$

و

$$S_2(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left[b_n \frac{1}{\sin(\theta)} P_n^1(\cos(\theta)) + a_n \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos(\theta)) \right] \quad (۲)$$

که a_n و b_n ها به عنوان ضرایب بسط توابع بسل و هنکل هستند .این توابع برای محاسبه میدان الکتریکی کل و همچنین برای محاسبه تابع فازی معرفی می‌گردد. ضریب کیفیت هم از دیگر پارامترهایی است که برای محاسبه تابع توزیع نیاز داریم که آن را به شکل زیر تعریف می‌کنیم.

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (۳)$$

با توجه به کمیت‌های بالا، تابع فازی را این گونه تعریف می‌کنیم.

$$P(\theta) = \frac{S}{2\pi x^2 Q_{sca}} \quad (۴)$$

که در این معادله مقدار S از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = S_1 + S_2 \quad (۵)$$

سپس می‌توانیم با در نظر گرفتن توزیعی از ذرات با تابع توزیع مشخص که آن را با $n(r)$ نشان می‌دهیم ، تابع فازی را برای این توزیع ذرات هم به دست آوریم. به این منظور، باید ضریب پراکندگی را هم حساب کنیم که از رابطه زیر به دست می آید:

$\beta_{sca} = \int_{a_1}^{a_2} \sigma_{sca}(a) n(a) da$ که σ_{sca} سطح مقطع پراکندگی می‌باشد. در نهایت می‌توان تابع فازی را برای توزیعی از ذرات به شکل زیر نوشت:

$$P(\theta) = \frac{4\pi}{2k^2 \beta_{sca}} \int_{a_1}^{a_2} (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2) n(a) da \quad (۶)$$

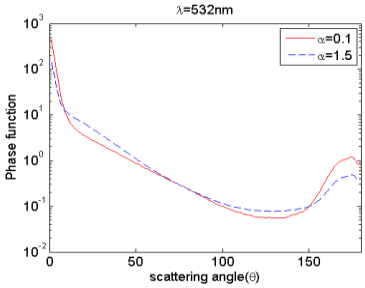
محاسبات عددی

معادلاتی که در قسمت قبل وارد شده را می‌توان در نرم‌افزار matlab به صورت کد نوشت و سپس با در نظر گرفتن تابع توزیع‌های مختلف، توابع فازی مختلفی را رسم کرد. تابع توزیعی که به صورت پیش فرض در این محاسبات قرار دادیم تابع توزیع دو مدی است که به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$\frac{dV}{dr} = \sum_{i=1}^{2} \frac{C_{v,i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} exp[-\frac{(lnr-lnr_{v,i})^2}{2\sigma_i^2}] \quad (۷)$$

که در این معادله σ_i انحراف استاندارد هر کدام از مدها، r_v شعاع میانگین حجمی هر مد، و C_v مجموع حجمی ذرات هواویز در هر کدام از مدهاست[۵]. دلیل استفاده از این تابع هم وجود ذرات غبار است که اندازه بزرگتری دارد. این تابع توزیع دارای دو قله است که ما با تغییر دادن نسبت وزنی بین دو قله که آن را با α نشان می‌دهیم تابع فازی



شکل ۱: نمودار تابع فازی حاصل از محاسبات عددی. این شکل برای نمونه نمودار تابع فازی برای دو α مختلف در طول موج ۵۳۲ نانومتر آورده شده است. (رنگ قرمز: α=۰,۱ و رنگ آبی: α=۱,۵)

را استخراج می‌کنیم. ما برای ۲۱ حالت مختلف α که مقادیر آن ها به فاصله ۰,۱ از ۰ تا ۲ تغییر می‌کند، تابع فازی را به دست می‌آوریم. مقادیر α کم نشان دهنده وجود ذرات بزرگ و α های بزرگ وجود ذرات ریز را نشان می‌دهد.

۴-چیدمان آزمایش

لیدار دومحوری مانند دیگر لیدارها از دو قسمت اصلی فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. نمایی از چیدمان در شکل(۲) نشان داده شده که تفاوت اصلی آن با لیدارهای تک محوری در نوع قرارگیری فرستنده و گیرنده نسبت به هم است. نحوه کارکرد این لیدار این گونه است که از مسیر پرتوی لیزر که به طرف جو ارسال می‌شود توسط یک دوربین یا CCD عکس گرفته می‌شود. یکی از مهمترین مزایای این لیدار نسبت به لیدارهای تک محوری برطرف شدن عدم هم پوشانی لیزر با دیدگیرنده در ارتفاعات پایین است. همچنین در این لیدار عدم شدت ثبت شده در دوربین مستقل از فاصله است[۶]. این ویژگی از روابط زیر قابل اثبات است. شدت نوری که توسط گیرنده لیدار ثبت می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_r = K_1 E_L T_{atmz} T_{atmR} A\beta(\theta,\phi,z)\frac{dz}{R^2} \quad (۸)$$

که در این رابطه K_1، ثابت سیستم، T_{atmz} و T_{atmR} به ترتیب میزان گذردهی اپتیکی به اندازه z و R، $\beta(\theta,\phi,z)$ ثابت پراکندگی در زاویه پراکندگی θ، زاویه قطبش ϕ و ارتفاع z است.

$$\tan\theta = -\tan\alpha = -\frac{D}{z}, z = -\frac{D}{\tan\theta} \quad (۹)$$

با مشتق گیری از رابطه(۸) خواهیم داشت:

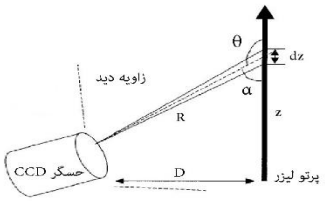
$$dz = -D\left(-\frac{\sec^2\theta d\theta}{\tan^2\theta}\right) = D\frac{d\theta}{\sin^2\theta} = D\frac{d\theta}{\frac{D^2}{R^2}} \rightarrow$$

$$dz = R^2(\frac{d\theta}{D}) \quad (۱۰)$$

حال اگر رابطه بالا را در رابطه (۸) قرار دهیم به دست خواهیم آورد:

$$E_r = K_1 E_L T_{atmz} T_{atmR}\beta(\theta,\phi)\frac{d\theta}{D} \quad (۱۱)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که به دلیل مساوی بودن زاویه فضایی تمام پیکسل‌ها شدتی که هر پیکسل دریافت می‌کند مستقل از فاصله می‌باشد. برای لیداری که در دانشگاه زنجان راه‌اندازی کردیم از دو لیزر با طول موج های ۵۳۲ و۶۵۰ نانومتر به عنوان فرستنده و از یک دوربین digital single-lens reflex(DSLR) از شرکت canon به عنوان گیرنده استفاده کردیم.

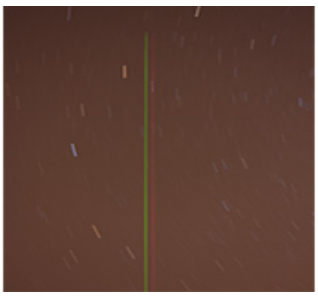


شکل۲: طرحواره لیدار دومحوری

این دوربین دارای زاویه دید ۴۳ درجه و ۳۸۸۸×۲۵۹۵ پیکسل است. برای گرفتن عکس زمان نوردهی را ۶۰۰ ثانیه و ISO را برابر ۱۰۰ قرار دادیم. در این لیدار هر پیکسل دوربین با توجه به زاویه دید، یک زاویه پراکندگی را می‌بینند. در واقع مسیر پرتو ثبت شده شدت پراکندگی را در گستره‌ای از زاویه‌ها به دست می‌دهد که این همان تابع فازی است. علت استفاده از دو طول موج بالا بردن دقت تحلیل داده‌ها است. از دیگر ملاحظات فنی می‌توان

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

به عمود ارسال کردن همزمان دو لیزر اشاره کرد

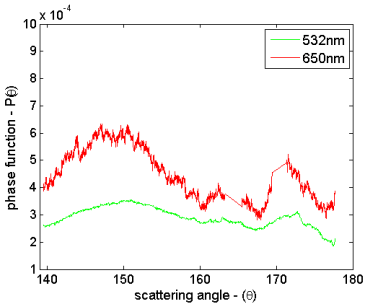


شکل ۴: یک نمونه داده از یک شب بدون غبار

که برای این کار از سطح آزاد مایع در ارتفاع مناسب استفاده شد و همچنین مکان‌یابی استقرار فرستنده و گیرنده لیدار که مواردی همچون کم بودن آلودگی نوری و امکان حذف ستارگان در تحلیل تصاویر، در این امر باید لحاظ شود.

تحلیل داده

تحلیل باید روی داده‌های اولیه که به صورت عکس.



شکل ۳: تابع فازی به دست آمده از داده‌های یک شب بدون غبار برای دو طول موج (رنگ سبز: ۵۳۲ نانومتر و زنگ قرمز: ۶۵۰ نانومتر)

می باشد، صورت گیرد. لذا باید عکس‌ها به فرمت مناسب برای وارد کردن در نرم افزار matlab تبدیل گردد. سپس در راستای انتشار لیزر نمودار شدت استخراج می‌شود که نشان دهنده میزان پراکندگی توسط ذرات موجود در جو است. از طرفی با نسبت دادن هر پیکسل تصویر به زاویه پراکندگی می‌توانیم نمودار پراکندگی را بر حسب زاویه رسم کنیم که این تابع فازی پراکندگی است. تمام این مراحل برای هر دو طول موج انجام می‌شود. ما برای اینکه تشخیص بدهیم کدام تابع توزیع بر جو مورد آزمایش حاکم است باید دید که کدام یک از توابع فازی به دست آمده از تابع توزیع‌های مختلف بیشترین انطباق را با تابع فازی به دست آمده از روش تجربی را دارد. به این منظور از روش rms گیری از داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از محاسبات عددی استفاده می‌کنیم. برای rms گیری از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$Rms(\alpha_i) = \sum_{\theta=138}^{178}\left[Ratio_{th-\alpha_i}(\theta) - Ratio_{ex}(\theta)\right]^2 \quad (۱۲)$$

که در این روابط $Ratio_{th-\alpha_i}(\theta)$ نسبت تابع فازی ۵۳۲ نانومتر به تابع فازی ۶۵۰ نانومتر در α های مختلف است که از روش عددی به دست آمده و $Ratio_{ex}(\theta)$ نسبت تابع فازی ۵۳۲ نانومتر به تابع فازی ۶۵۰ نانومتر است که از داده‌های لیدار به دست آمده است. برای مثال در یک شب پس از بارندگی که شکل(۴) مربوط به این شب است و شکل(۳) تابع فازی به دست آمده از این تصویر را نشان می‌دهد، انتظار می‌رفت که غباری مشاهده نشود که با استفاده از رابطه(۱۲) بیشترین تطابق نمودار تجربی با نمودار $\alpha = 2$ به دست آمد که نشان دهنده عدم وجود غبار بود. در نتیجه تابع توزیع ذرات نشان دهنده سهم مولکولی بیشتر در جو را نشان داد.

نتیجه‌گیری

با استفاده از داده‌های تجربی تابع فازی می‌توان تابع توزیع اندازه ذرات را به دست آورد. لیدار دومحوری به عنوان ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری تابع فازی به کار می رود. داده برداری در دو طول موج باعث افزایش دقت و صحت در اندازه گیری تابع فازی می شود.

مراجع

[1] Kokhanovsky. A, *Aerosol Optics*, p. 12, Springer, 2008.
[2] Tao. Z, Liu. D, Wang. Z,…, Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge- coupled device side- scattering lidar, Optics Express, Vol. 22, Issue 1, pp. 1127-1134 (2014)
[3] Wyant. A, Brown. D, Edwards. P, Philbrick. R, Multi-wavelength, multi-angular lidar for aerosol characterization, Laser Radar Technology and Applications XIV, 73230R (2 May 2009)
[4] Weinzierl. B, Airborne measurements of dust layer properties, particle size distribution and mixing state of saharan dust during SAMSUM 2006, Volume 61 (2009)
[5] Liou. K. N, An introduction to atmospheric radiation, p. 195, Academic Press, 2002
[6] Barnes J., Bronner S., Beck R., Boundary layer scattering measurement with a charge- coupled device camera lidar, Applied optic. 42 (2003) 3618-3619.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]