



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



## بررسی رابطه بین زاویه و شدت پراکندگی برای ذرات جوی کاهنده قابلیت دید افقی

ملیحه رنجبران، عاطفه عجمی، محسن بنجخی، هادی برزویی، سید مجتبی برزین

مرکز خدمات تخصصی اپتیک جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

چکیده - ذرات معلق موجود در هوا (هواویزها) می‌تواند قابلیت دید انسان را تا حد زیادی کاهش داده و محدودیت‌هایی را در سامانه حمل و نقل جاده‌ای، هوایی و دریایی ایجاد کنند. مهمترین پدیده فیزیکی که باعث کاهش قابلیت دید می‌شود، پراکندگی نور از هواویزها است. در این مقاله با بررسی وابستگی تابع فاز پراکندگی، بهترین زاویه اندازه‌گیری ضریب خاموشی اتمسفر، ۴۲ درجه در جهت رو به جلو بدست آمده است. با توجه به وابستگی پراکندگی به اندازه ذره و طول موج نور فرودی، با اندازه‌گیری شدت پراکندگی در این زاویه، می‌توان ضریب پراکندگی را که متناسب با ضریب خاموشی اتمسفر است تعیین نموده و شرایط دید جوی را مشخص کرد.

کلید واژه - قابلیت دید افقی، هواویزها، ضریب خاموشی اتمسفر، پراکندگی مای، پراکندگی پیش‌سو.

## Study of the relationship between the scattering angle and intensity of the atmospheric particles, reducing horizontal visibility

M. Ranjbaran, A. Ajami, M. Bonjakhi, H. Borzouei S. M. Barzin

Iranian academic center for education, culture and research

The presence of airborne particles in different climatic conditions can reduce visibility to zero and exert limitations on road, air and sea transportation systems. Visibility is a complex psycho-physical phenomenon, governed mainly by the atmospheric extinction coefficient associated with solid and liquid particles held in suspension in the atmosphere; the extinction is caused primarily by scattering rather than by absorption of the light. Reviewing the phase dependence of Mie scattering function, we have estimated that the best angle to measure atmospheric extinction coefficient, and so weather condition, is ۴۲ degrees in the forward direction.

## ۱- مقدمه

کاهش دید انسان به واسطه وجود ذرات معلق در هوا (هواویزها)، همواره محدودیت‌هایی را در سیستم حمل و نقل جاده‌ای، هوایی و دریایی به همراه داشته است [۱]. در این شرایط آب و هوایی نیاز است که تمرکز بیشتری بر روی کنترل وسایل نقلیه صورت پذیرد و یا در شرایطی که قابلیت دید از حد آستانه چشم انسان نزول می‌یابد، برای جلوگیری از خسارات مالی و جانی، از تردد وسایل نقلیه جلوگیری شود.

قابلیت دید افقی یا نمایانی به مسافتی گفته می‌شود که در آن فاصله، یک جسم و یا یک شعاع نور از محیط زمینه‌اش کاملاً قابل تمیز باشد. قابلیت دید افقی در هوای تمیز به ۷۰-۱۰۰ کیلومتر می‌رسد. نوع و غلظت هواویزهای جوی مانند آلاینده‌های جوی و ریزگردها، رطوبت بالا، مه، پدیده‌های بارشی مانند باران، نم باران، برف و تگرگ، می‌توانند قابلیت دید انسان را تا حد صفر کاهش دهند. قابل ذکر است که قابلیت دید کمتر از ۱۰۰ متر، صفر گزارش می‌شود.

جذب و پراکندگی نور از هواویزها عامل فیزیکی کاهش قابلیت دید هستند. البته جذب سهم قابل ملاحظه‌ای در کاهش قابلیت دید ندارد و علت اصلی کاهش تباین جسم و زمینه، پراکندگی نور از ذراتی است که در هوای بین مشاهده گر و جسم قابل مشاهده قرار دارند.

با توجه به وابستگی پراکندگی به اندازه ذره و طول موج نور فرودی، با اندازه‌گیری شدت پراکندگی در زوایای مختلف، می‌توان ضریب پراکندگی را که متناسب با ضریب خاموشی اتمسفر است تعیین نمود. با تعیین ضریب خاموشی اتمسفر می‌توان شرایط دید جوی را مشخص کرد.

تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد پراکندگی نور از هواویزها صورت پذیرفته است. با در نظر گرفتن نتایج موجود، در این مقاله به بررسی ارتباط نوع هواویزها و پراکندگی نور ناشی از آنها خواهیم پرداخت. با استفاده از بررسی و رسم تابع فاز پراکندگی در محیط نرم افزار Matlab، زاویه بهینه‌ای بدست می‌آید که در آن زاویه، شدت سیگنال پراکندگی از ذرات مختلف تابعی خطی از اندازه و خاموشی ذرات خواهد بود. با اندازه‌گیری شدت سیگنال پراکندگی، اندازه ذره، ضریب خاموشی و در نتیجه قابلیت دید قابل محاسبه خواهد بود.

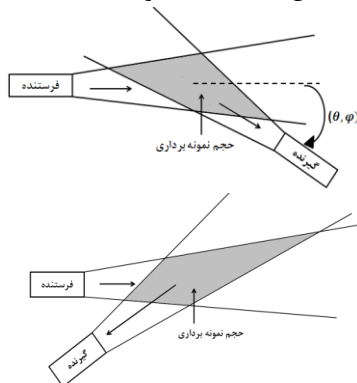
## ۲- مبانی نظری

دلیل اصلی تضعیف نور در اتمسفر، پراکندگی است. مولکول‌ها در بازه نور مرئی جذب بسیار پایینی دارند و در بین هواویزها، هواویزهایی ناشی از سوخت ناقص جاذب نور هستند. این دسته از هواویزها که حاوی کربن هستند علاوه بر پراکنده کردن نور، مقداری از نور را نیز جذب می‌کنند. با چشم‌پوشی از سهم جذب در هواویزها با تقریب خوبی می‌توان گفت که تضعیف نور از پراکندگی نور ناشی می‌شود. ضریب پراکندگی ( $\beta$ ) از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{2\pi}{\phi_v} \int_0^\pi I(\phi) \sin \phi d\phi \quad (1)$$

که در این رابطه  $\Phi_v$  اندازه کل شدت تابشی است که به حجم  $V$  از هوا وارد می‌شود و  $I(\phi)$  شدت نور پراکنده شده در زاویه  $\phi$  نسبت به راستای باریکه فرودی است. برای اندازه‌گیری ضریب پراکندگی هر ذره، باید شدت پراکندگی ناشی از ذره در تمام زوایا اندازه‌گیری شده و سپس بر روی کل زاویه پراکندگی انتگرال‌گیری شود. با توجه به سخت و پرهزینه بودن روش عملی انجام این آزمایش، باریکه پراکنده شده تحت زاویه‌ای محدود اندازه‌گیری شده و نتیجه حاصل از آن به انتگرال کامل بسط داده می‌شود.

دو چیدمان هندسی مختلف برای اندازه‌گیری پراکندگی از ذرات در زاویه فضایی محدود وجود دارد: روش پراکندگی پیش‌سو (پراکندگی به سمت جلو) و پراکندگی پس‌سو (پراکندگی به سمت عقب). در شکل ۱ محل قرارگیری فرستنده، گیرنده، گیرنده و حجم نمونه برداری در دو روش مشخص شده است [۲ و ۳].



شکل ۱: (بالا) پراکندگی پیش‌سو، (پایین) پراکندگی پس‌سو.

برای بررسی نظری پراکندگی نور از ذرات ریز سه رژیم محاسباتی وجود دارد که با نام‌های: پراکندگی ریلی، پراکندگی مای (Mie) و پراکندگی هندسی شناخته

می‌شوند. برای تفکیک این بازه کاری از کمیت بدون بعد معیار اندازه ( $\alpha$ ) استفاده می‌شود،

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2)$$

که  $r$  شعاع ذره و  $\lambda$  طول موج نور فرودی است.

معیار اندازه‌ی مولکول‌ها و ذرات زیر میکرون برای طول موج مرئی کمتر از ۰/۱ بوده و در محدوده ریلی قرار دارد. تاثیر مولکول‌های هوا بر روی قابلیت دید در فواصل کم، بسیار کوچک است، اما در فاصله‌های بالای ۳۰ کیلومتر باید لحاظ شوند.

برای ذره‌هایی با معیار اندازه‌ی حدود یک که قطر آن‌ها با طول موج نور فرودی قابل مقایسه است از نظریه پراکندگی مای استفاده می‌شود. قطر ذرات گرد و غبار، دود، آلاینده‌های شهری و مه در بازه ۰/۱ تا ۱۰ میکرون بوده و در بازه پراکندگی مای قرار دارند. این ذرات بیشترین تاثیر را در کاهش قابلیت دید دارند [۴].

در نظریه پراکندگی مای، سطح مقطع پراکندگی هر ذره بر مبنای شعاع ذره، ضریب شکست و طول موج نور فرودی محاسبه می‌شود. با استفاده از نظریه مای، شدت پراکندگی در زاویه‌های جانبی ( $\varphi$ ) و سمتی ( $\theta$ ) از روابط ۳ تا ۸ بدست می‌آید:

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \varphi, \quad (3)$$

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \varphi. \quad (4)$$

که در دو رابطه فوق:

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (5)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (6)$$

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta}, \quad (7)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{dP_n^{(1)}(\cos \theta)}{d\theta}. \quad (8)$$

که سطح مقطع پراکندگی، جذب و خاموشی نیز از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند [۴].

$$\sigma_{\text{scat}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{scat}} + \sigma_{\text{abs}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \text{Re} \{a_n + b_n\}. \quad (10)$$

نکته مهمی که در بررسی تئوری‌های پراکندگی وجود دارد این است که با توجه به اینکه توابع مای شامل یک سری نامحدود بر روی توابع بسل کروی هستند، این توابع

در حدهای پایین به سمت توابع ساده پراکندگی ریلی و در حدهای بالا به سمت توابع خطی پراکندگی هندسی میل می‌کنند. بنابراین می‌توان با استفاده از این روابط، پراکندگی ناشی از تمام ذرات در هر سه ناحیه پراکندگی را پوشش داد.

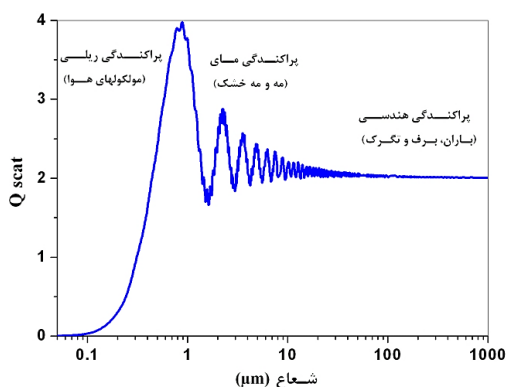
برای مستقل از طول موج شدن سطح مقطع پراکندگی کمیت بدون بعد بازده پراکندگی  $Q_{\text{scat}}$  تعریف می‌شود،

$$Q_{\text{scat}} = \frac{\sigma_{\text{scat}}}{\pi r^2} \quad (11)$$

### ۳- شبیه سازی رفتار پراکندگی

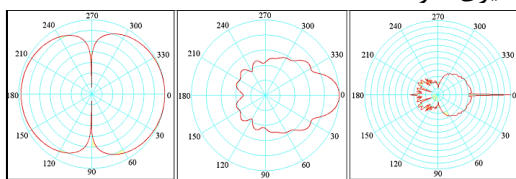
به منظور بررسی رفتار پراکندگی با تغییر شعاع ذره، پراکندگی مای با محیط نرم افزاری Matlab محاسبه شده است.

در شکل ۲ بازده پراکندگی بر حسب شعاع ذره رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بازده پراکندگی در حد پایین به پراکندگی ریلی و در حد بالا به عدد ثابت ۲ میل می‌کند. بنابراین با استفاده از روابط مای، می‌توان پراکندگی ناشی از تمام ذرات در هر سه رژیم پراکندگی را پوشش داد.



شکل ۲. نمودار  $Q_{\text{scat}}$  بر حسب شعاع ذره

نمودارهای قطبی شدت بر حسب زاویه پراکندگی در شکل ۳ رسم شده‌اند. افزایش پراکندگی پیش‌سو با افزایش شعاع ذره از ۰/۱  $\mu\text{m}$  به ۱  $\mu\text{m}$  و ۱۰۰۰  $\mu\text{m}$  به خوبی مشهود است. بنابراین به منظور بررسی پراکندگی از ذرات کاهنده قابلیت دید، باید شدت پراکندگی پیش‌سو را اندازه‌گیری نمود.



شکل ۳. نمودار شدت بر حسب زاویه پراکندگی از ذراتی به شعاع ۰/۱، ۱ و ۱۰۰۰  $\mu\text{m}$  (از چپ به راست)

اندازه ذرات آلاینده‌ی شهری و haze تا ۰/۱ میکرون نیز می‌رسد. بنابراین می‌توان گفت که ذراتی که بیشترین تاثیر را در کاهش قابلیت دید دارند ابعادی بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر دارند. شکل ۵ تابع فاز پراکندگی را برای این این دو اندازه نمایش می‌دهد.

در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که بهترین زاویه به منظور اندازه‌گیری پراکندگی و بسط آن به تمام زوایا، زاویه ۴۲ درجه است. زیرا در این زاویه، تابع فاز پراکندگی برای ذرات بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون مقدار یکسانی داشته و پراکندگی زاویه‌ای ذرات کوچک و بزرگ با یک نسبت به پراکندگی کل مربوط می‌شوند.

#### ۴- نتیجه گیری

پدیده های فیزیکی که موجب کاهش قابلیت دید می‌شوند، جذب و پراکندگی نور از ذرات موجود در هوا می‌باشند. البته پدیده جذب سهم قابل ملاحظه‌ای در کاهش قابلیت دید نداشته و علت اصلی، پراکندگی است.

آلودگی شهری، haze، مه و ریزگردها مهمترین عوامل کاهش فاصله دید محسوب می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که ذراتی که بیشترین تاثیر را در کاهش قابلیت دید دارند ابعادی بین ۰/۱ تا حدود کمتر از ۱۰ میکرومتر را دارا هستند.

با بررسی شدت پراکندگی مای و وابستگی فازی آن در زوایای مختلف، زاویه پراکندگی ۴۲ درجه محاسبه شده است که بهترین زاویه برای اندازه‌گیری پراکندگی است. با انتخاب زاویه ۴۲ درجه، می‌توان ضریب پراکندگی زاویه‌ای را بجای ضریب پراکندگی کل مورد استفاده قرار داد. با استفاده از ضریب پراکندگی، ضریب خاموشی اتمسفر و در نتیجه کاهش قابلیت دید محاسبه می‌شود.

#### مراجع

[۱] A. Sabetghadam, F. Ahmadi-Givi, Y. Golestani, *Visibility trends in Tehran during ۱۹۵۸-۲۰۰۸*, Atmospheric Environment, ۴۲ (۲۰۱۲) ۵۱۲-۵۲۰.

[۲] S. E. Bott, W. Howard Hart, *Particle size analysis utilizing polarization intensity differential scattering*, United States Patent, NO: ۴,۹۵۳,۹۷۸. ۱۹۹۰.

[۳] C. F. Bohren, D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*, John Wiley & Sons. Inc. ۱۹۸۳.

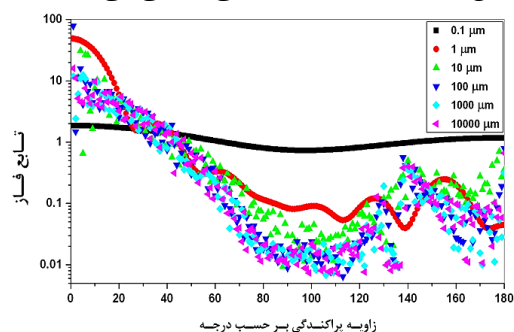
[۴] D. W. Hahn, *Light scattering theory*, Department of Mechanical and Aerospace Engineering university of Florida report, ۲۰۰۹.

ضریب پراکندگی زاویه‌ای حاصل ضرب تابع فاز پراکندگی  $P(\theta)$  و ضریب پراکندگی کل  $\beta$  است،

$$\beta(\theta) = P(\theta) \times \beta \quad (۱۲)$$

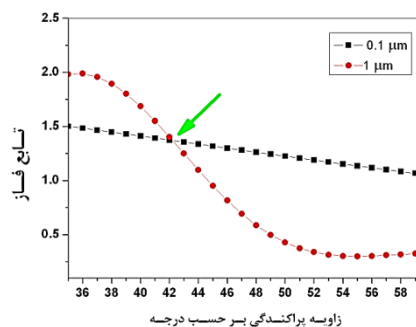
برای آنکه بتوانیم ضریب پراکندگی زاویه‌ای را بجای ضریب پراکندگی کل بنشانیم، باید تابع فاز برای تمام شرایط محیطی (ریزگرد، مه، دود، باران و ...) در طول موج مورد نظر مقدار ثابتی باشد.

تغییرات تابع فاز بر حسب زاویه پراکندگی در شکل ۴ رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود در ناحیه ریلی که شعاع ذره کوچک است (کمتر از ۰/۱  $\mu\text{m}$ )، سطح مقطع یا ضریب پراکندگی به تغییر زاویه پراکندگی وابسته نیست و منحنی آن تقریباً یک خط صاف است. اما با افزایش شعاع ذره به بیشتر از ۱ میکرون این وابستگی شروع به افزایش نموده و منحنی نوسانی می‌شود.



شکل ۴. نمودار تابع فاز پراکندگی مای بر حسب زاویه پراکندگی.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در بازه زاویه‌ای ۳۰ تا ۵۰ درجه، تابع فاز برای تمام ذرات یکسان بوده و در نتیجه ضریب پراکندگی تمام ذرات در این زاویه یکسان خواهد بود. اگر پراکندگی زاویه‌ای در این محدوده اندازه‌گیری شود ضریب پراکندگی کل تابعی خطی از پراکندگی زاویه‌ای می‌شود. بنابراین، بازه زاویه‌ای مذکور بهترین بازه اندازه‌گیری محسوب می‌شود.



شکل ۵. تابع فاز بر حسب زاویه پراکندگی برای ذراتی به ابعاد ۰/۱ و ۱ میکرومتر

ریزگردها، آلودگی شهری، مه و غبار مهمترین عوامل کاهش فاصله دید محسوب می‌شوند. ریزگردها و مه ذراتی با بزرگی میانگین ۱۰ میکرون هستند از طرفی میانگین