



دسته‌بندی هواویزهای جوی به وسیله تابع فازی قطبیده با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی

علی بیات^{۱*}، حمیدرضا خالصی فرد^۲ و امیر معصومی^۱

^۱ استادیار گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان
^۲ دانشیار گروه فیزیک، دانشکده تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان و عضو پژوهشکده تغییر اقلیم دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان

تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۸

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۲

Classification of Atmospheric Aerosols by Using polarized Phase Function of Polarized Sun-Photometer Measurements

Ali Bayat,^{1*} Hamid Reza Khalesifard² & Amir Masoumi¹

¹ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Physics, University of Zanjan, Zanjan

² Associated Professor, Department of Physics, Faculty of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan

Abstract

Classification of atmospheric aerosols is one of the important topics in the airborne and ground-based instruments remote sensing. Polarized sky radiance resulting from interaction between sunlight and atmospheric particles strongly depends on the presence of aerosols in the atmosphere, and can be monitored by looking at the aerosol polarized phase function. In this paper, the ability the polarized phase function to classify atmospheric aerosols has been investigated for the atmosphere of the Zanjan. To do this, aerosol optical depth (AOD), Angstrom exponent (α), single scattering albedo (SSA), and polarized phase function have been retrieved from the measurements of SPM in the period of February 2010 to December 2012. The results show that the maximum value of aerosol polarized phase function is strongly correlated ($R = 0.95$) with the Angstrom exponent. Furthermore the polarized phase function shows a moderate negative correlation with respect to the atmospheric aerosol optical depth and single-scattering albedo ($R = -0.76$ and -0.33 , respectively). Therefore the polarized phase function can be regarded as a key parameter to characterize the atmospheric particles of the region – a populated city in the semi-arid area and surrounded by some dust sources of the Earth's dust belt.

Keywords: Aerosol, Sun-photometer, Polarized phase function, classification, Dust belt.

چکیده

دسته‌بندی هواویزهای جوی یکی از مباحث مهم در سنجش از دور هواویزها توسط ابزارهای فضاپرد و هواپرد و زمین‌پایه است. تابع فازی قطبیده هواویزها معیاری از قطبش نور پراکنده‌شده خورشید توسط ذرات مایع یا جامد معلق در جو زمین است. در این مقاله توانایی دسته‌بندی هواویزهای جوی توسط پارامتر تابع فازی قطبیده برای جو شهر زنجان بررسی می‌شود. برای این کار، پارامترهای عمق اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم، سپیدایی پراکندگی تک‌باره و تابع فازی قطبیده هواویزها بررسی می‌شود. عمق اپتیکی هواویزها معیاری از میزان ذرات هواویزها در ستون قائم از جو زمین است. نمای آنگستروم معیاری کیفی از اندازه ذرات غالب در جو است که از داده‌های عمق اپتیکی هواویزها در سه طول موج به دست می‌آید. سپیدایی پراکندگی تک‌باره معیاری از جذب ذرات هواویز جوی را نشان می‌دهد. تابع فازی قطبیده نیز معیاری از میزان قطبش خطی نور پراکنده‌شده از ذرات هواویز را نشان می‌دهد. این پارامترها از اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی قطبیده CE318-2 در بازه زمانی بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱ استخراج می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند، بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده همبستگی خطی بسیار خوبی ($R=0.95$) با پارامتر نمای آنگستروم دارد. همچنین این پارامتر همبستگی خطی منفی ($R=-0.76$ و $R=-0.33$) به ترتیب با عمق اپتیکی هواویزها و سپیدایی پراکندگی تک‌باره دارد. بنابراین پارامتر تابع فازی قطبیده توانایی دسته‌بندی هواویزهای شهری-صنعتی که در ناحیه کمربند غباری قرار دارند، را دارد.

کلمات کلیدی: هواویز، شیدسنج خورشیدی، تابع فازی قطبیده، دسته‌بندی، کمربند غباری.

* Corresponding Author. E-mail Address: abayat@znu.ac.ir

هواویزها ذرات جامد یا مایع معلق در جو زمین هستند که دارای تغییرات زمانی و مکانی زیادی هستند [۱]. در روش سنجش از دور خواص اپتیکی و فیزیکی هواویزها با ابزارهای فضا برد و هوا برد و زمین پایه مانند شیدسنج‌ها و لیدارها در کانال‌های طول موجی مختلف بررسی می‌شوند. ماهواره‌ها قادر به اندازه‌گیری مشخصات مختلف هواویزها در جو زمین هستند، اما داده‌های آن‌ها دارای تفکیک زمانی و مکانی خوبی نیستند. برای درک بهتر خواص هواویزها و تأثیر آن‌ها بر روی جو زمین و تغییرات اقلیم باید هواویزها را به‌صورت پیوسته در زمان و مکان مورد بررسی قرار دهیم. ابزارهای زمین‌پایه دارای تفکیک زمانی خوب و هم‌چنین دقت اندازه‌گیری بالایی هستند، اما پوشش فضایی کم‌تری نسبت به ماهواره‌ها دارند [۲]. بنابراین به‌منظور رفع نقص ذکر شده شبکه‌هایی از ابزارهای اندازه‌گیری مختلف راه‌اندازی شده‌است که به‌طور نمونه می‌توان به شبکه شیدسنجی خورشیدی AERONET¹ و شبکه لیداری ERLINET² اشاره کرد [۳].

شیدسنج خورشیدی ابزاری است که شدت تابش نور خورشید را در چهار کانال طول موجی ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر در دو مد اندازه‌گیری خورشید و آسمان با زاویه دید محدود $1/3^\circ$ در طول روز ثبت می‌کند [۳]. طول موج ۸۷۰ نانومتر دارای ۳ کانال اندازه‌گیری دیگر برای اندازه‌گیری قطبش نور آسمان است. این سه کانال دارای قطب‌شگرهای خطی هستند که محورهای عبوری آن‌ها دارای زاویه 60° نسبت به هم هستند. عمق اپتیکی و نمای آنگستروم و سپیدایی پراکندگی تک‌باره و تابع فازی قطبیده و درجه قطبش خطی و ضریب شکست مختلط و توزیع اندازه ذرات هواویزها را می‌توان از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی به‌دست آورد [۴-۶].

ایران کشوری است که در منطقه کمربند غباری - ناحیه‌ای است که از غرب آفریقا شروع و شامل آسیای مرکزی بوده و تا شرق چین ادامه دارد- قرار دارد. اغلب شهرهای واقع در غرب و شرق و جنوب و بخش‌های مرکزی ایران تحت تأثیر رویدادهای غباری قرار دارند، به‌خصوص در سال‌های اخیر [۷-۵]. زنجان شهری است واقع در شمال غرب ایران که جو آن اغلب تحت تأثیر رویدادهای غباری قرار دارد که ناشی از چشمه‌های غباری است که در جلگه دجله و فرات واقع در عراق و ناحیه خشکی است که بین دریای آرال و دریای خزر واقع در ترکمنستان، قرار دارند [۷-۷].

[۴]. مطالعات قبلی نشان می‌دهند که هواویزهای شهری- صنعتی و غبار دو نوع غالب هواویزهای شهر زنجان هستند. غبار بیش‌تر در فصل‌های بهار و تابستان در جو زنجان دیده می‌شود و در حدود چهار برابر هواویزهای شهری-صنعتی است [۴-۵].

هواویزها در حالت کلی به چهار نوع نمک دریایی و غبار و نیز هواویزهای ناشی از سوختن مواد زیست توده و شهری-صنعتی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. انواع هواویزها را می‌توان با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ابزارهای سنجش از دور مشخص کرد. دسته بندی هواویزها می‌تواند کمک شایانی را به تخمین بهتر اثرات هواویزها در تغییرات اقلیم و هم‌چنین استخراج دقیق پارامترهای مختلف هواویزها از داده‌های ماهواره‌ها داشته باشد. در این روش‌ها از خواص اپتیکی و فیزیکی هواویزها برای دسته‌بندی آن‌ها استفاده می‌شود [۴]. هدف ما در این مقاله بررسی توانایی تابع فازی قطبیده برای دسته‌بندی هواویزها است و هم‌چنین دسته‌بندی هواویزهای شهر زنجان با استفاده از آن می‌باشد. تابع فازی قطبیده معیاری از قطبش خطی نور پراکنده‌شده خورشید از ذرات پراکننده هواویز موجود در جو زمین است. برای انجام این کار، همبستگی بین عمق اپتیکی هواویزها و نمای آنگستروم و سپیدایی پراکندگی تک‌باره هواویزها با تابع فازی قطبیده آن‌ها بررسی می‌شود. هم‌چنین محاسبات تئوری پراکندگی به‌منظور تأیید نتایج تجربی استفاده می‌شود.

در ادامه مبانی نظری جهت استخراج تابع فازی قطبیده در بخش ۲ بیان شده‌است. در بخش ۳ نتایج استخراج شده مورد بحث قرار گرفته‌است و در نهایت نتایج حاصله کار در بخش ۴ گفته شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

نور فرودی خورشید نوری کاملاً ناقطبیده است. در حالی که نور ثبت شده در سطح زمین دارای قطبش بیضوی است. بنابراین نور ناقطبیده خورشید در عبور از جو زمین قطبیده می‌شود این بدان معناست که این ذرات (مولکول‌ها و هواویزها) موجود در جو زمین هستند که نور خورشید را قطبیده می‌کنند. برای بیان قطبش نور پراکنده‌شده از پارامترهای استوکس استفاده می‌کنیم. پارامترهای استوکس بیان کاملی از حالت قطبش و شدت نور قطبیده هستند. با فرض این که جو زمین دارای ذراتی با اشکال اختیاری و

از چنین جوی به صورت زیر بیان می‌شود [۹-۱۱].

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11}(\theta) & P_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ P_{21}(\theta) & P_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\theta) & P_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & P_{43}(\theta) & P_{44}(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

سوخت‌های فسیلی ذرات تشکیل دهنده جو هستند. برای ذراتی که خیلی کوچک‌تر از طول موج نور فرودی باشند از پراکندگی ریلی و برای ذراتی که در حدود طول موج نور فرودی باشند از تئوری پراکندگی که در آن ذرات را کروی در نظر می‌گیرند، برای به دست آوردن پراکندگی تک‌باره استفاده می‌کنیم [۱۰]. از معادله انتقال تابشی برای انتشار نور در جو و محاسبه‌ی پراکندگی چندباره استفاده می‌کنیم. در نهایت شدت نور شبیه‌سازی شده در الگوریتم‌های بازیابی استفاده شده و سپیدایی پراکندگی تک‌باره به دست می‌آید و سپس تابع فازی و تابع فازی قطبیده را با استفاده از آن استخراج می‌کنیم [۹-۱۱].

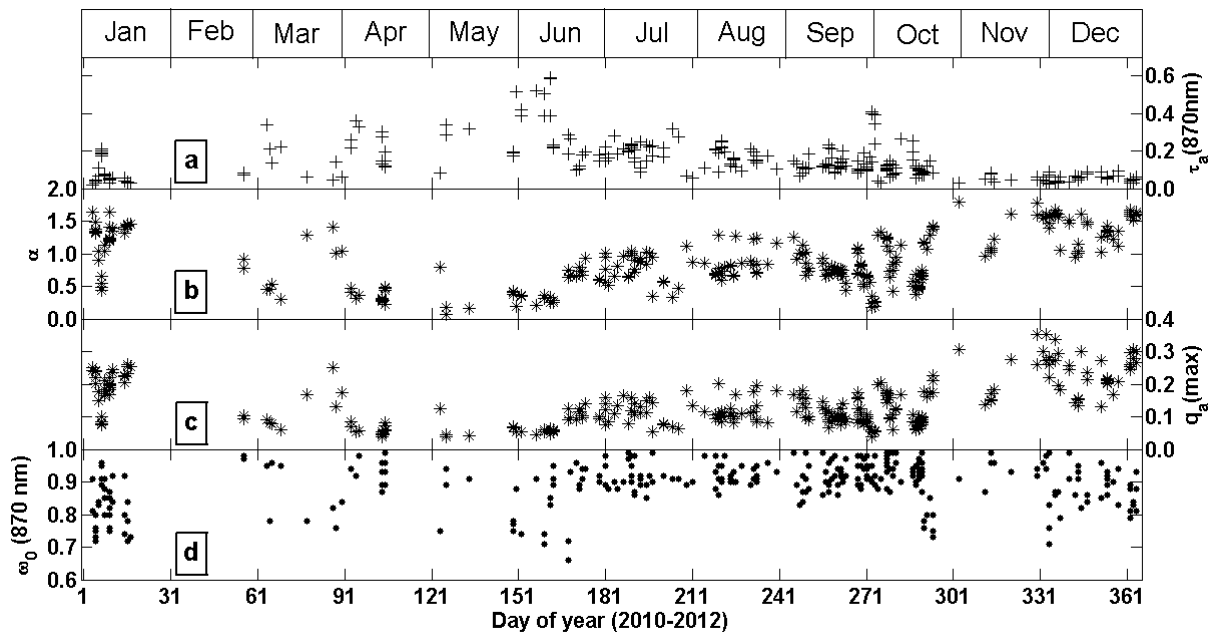
۳- نتایج و بحث

عمق اپتیکی هواویزها، τ_a ، معیاری از میزان ذرات هواویزها در جو زمین است که از داده‌های عبوری نور خورشید در زاویه پراکندگی صفر درجه از جو زمین با استفاده از قانون بیر-لامبرت برای طول موج‌های اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی در مد خورشید به دست می‌آید؛ پارامتر نمای آنگستروم، α ، معیاری کیفی از اندازه ذرات هواویزها در جو زمین است که برابر با منفی شیب تغییرات لگاریتمی عمق اپتیکی هواویزها در طول موج‌های مختلف است؛ سپیدایی پراکندگی تک‌باره هواویزها، ω_0 ، معیاری از جذب ذرات هواویز موجود در جو زمین است که برابر با سطح مقطع پراکندگی به سطح مقطع خاموشی نور است که مقدار آن بین صفر و یک متغیر است، برای یک ذره کاملاً پراکننده این پارامتر برابر یک و برای یک ذره کاملاً جاذب برابر صفر است؛ تابع فازی قطبیده معیاری از قطبش نور پراکنده آسمان برای پراکندگی تک‌باره است که از داده‌های مد آسمان شیدسنج خورشیدی به دست می‌آید [۳-۶]. تغییرات زمانی $\tau_a(870nm)$ و α و $q_a(max)$ در ۸۷۰ نانومتر و $\omega_0(870nm)$ برای بازه‌ی زمانی بین بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱ (فوریه ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۱۲) برحسب زمان اندازه‌گیری به ترتیب در شکل‌های ۱-a، رسم شده است.

جهت‌گیری کاتوره‌ای باشند و نیز نسبت به هر صفحه اختیاری دارای خاصیت آینه‌ای باشند، نور عبوری خورشید

که در آن θ نشان‌دهنده‌ی زاویه بین بردار انتشار نور فرودی و نور پراکنده شده است که معرف زاویه پراکندگی است. $(I_s \ Q_s \ U_s \ V_s)^T$ بردارهای استوکس نور پراکنده شده هستند که در سطح زمین توسط شیدسنج خورشیدی اندازه‌گیری می‌شوند. T ترانهاده بردار استوکس است. I_s بیانگر شدت کل نور پراکنده شده است، Q_s نشان‌دهنده قطبش خطی نور نسب به دو راستای موازی و عمود بر صفحه‌ی پراکندگی (صفحه‌ای که راستای انتشار دو بردار نور فرودی و نور پراکنده شده با هم می‌سازند) است، U_s قطبش خطی را نسبت به دو قطبش‌گر که با بردار عمود بر صفحه پراکندگی زاویه 45° و 135° درجه می‌سازند را نشان می‌دهد و در نهایت V_s بیانگر قطبش دایروی نور پراکنده شده است که برای نور پراکنده شده از جو قابل صرف‌نظر کردن است. در این‌جا، صفحه پراکندگی و صفحه انتشار نور فرودی یکسان است و می‌توان اثبات کرد که U_s برای چنین اندازه‌گیری برابر صفر است [10]. نور خورشید نوری ناقطبیده است، یعنی بردارهای استوکس آن برابر با $(I_0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ است. $P_{11}(\theta)$ نشان‌دهنده تابع فازی ذرات جوی است و بیانگر سهم شدت پراکنده نور فرودی در زاویه پراکندگی θ است که معمولاً با $p(\theta)$ نشان داده می‌شود. $P_{12}(\theta)$ نشان‌دهنده تابع فازی قطبیده هواویزها است که معیاری از قطبش خطی نور پراکنده شده است [۹]. در ادامه بر روی این پارامتر بیش‌تر بحث خواهیم کرد و آن را با $q(\theta)$ نشان خواهیم داد.

با شبیه‌سازی نور عبوری از جو زمین و مقایسه آن با نور پراکنده شده خورشید از هواویزها که در سطح زمین در زوایای پراکندگی مختلف با استفاده از شیدسنج خورشیدی ثبت شده است، می‌توان پارامترهای مختلف اپتیکی و فیزیکی ذرات موجود در جو زمین را به دست آورد [۹-۱۱، ۳-۶]. مولکول‌های مختلف چون نیتروژن، اکسیژن، دی‌اکسید کربن، بخار آب و غیره، و هم‌چنین ذرات جامد یا مایع معلق در هوا مانند غبار، هواویزهای دریایی و هواویزهای ناشی از سوختن جنگل‌ها و مراتع و



شکل ۱- (a) عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر، $\tau_a(870nm)$ ، (b) نمای آنگستروم، α ، (c) بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده، $q_a(max)$ ، (d) سپیدایی پراکندگی تک‌باره، ω_0 ، بر حسب زمان اندازه‌گیری از بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱ برای جو زنجان.

پاییز و اوایل زمستان اتفاق می‌افتد. بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده رفتاری بسیار مشابه پارامتر نمای آنگستروم دارد (شکل ۱- c). تغییرات زمانی سپیدایی پراکندگی تک‌باره نشان می‌دهد که میزان جذب هواویزهای فصل‌های پاییز و زمستان بیش‌تر از بهار و تابستان است که به این معناست که هواویزهای شهری-صنعتی جذب بالاتری نسبت به هواویزهای غباری دارند (شکل ۱- d).

بیش‌ترین مقدار عمق اپتیکی هواویزها در اواخر بهار (۰/۶) و کم‌ترین مقدار آن در اواخر پاییز اتفاق می‌افتد (شکل ۱- a). پارامتر نمای آنگستروم در شکل ۱- b نشان داده شده‌است، این پارامتر نیز یک رفتار نوسانی فصلی در طول سال نشان می‌دهد که در ماه‌های می و جون به کم‌ترین مقدار خود (حدود ۰/۰۷) که نشان‌دهنده وجود ذرات درشت‌دانه در جو است مقادیر بیشینه آن نیز در اواخر

جدول ۱- مقادیر میانگین α و τ_a و $q_a(max)$ و فراوانی آن‌ها در سه دسته‌بندی که دارای ذرات غالب هواویزهای شهری-صنعتی، غبار، یا ترکیبی از هواویز شهری-صنعتی و غبار، بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱، برای جو زنجان

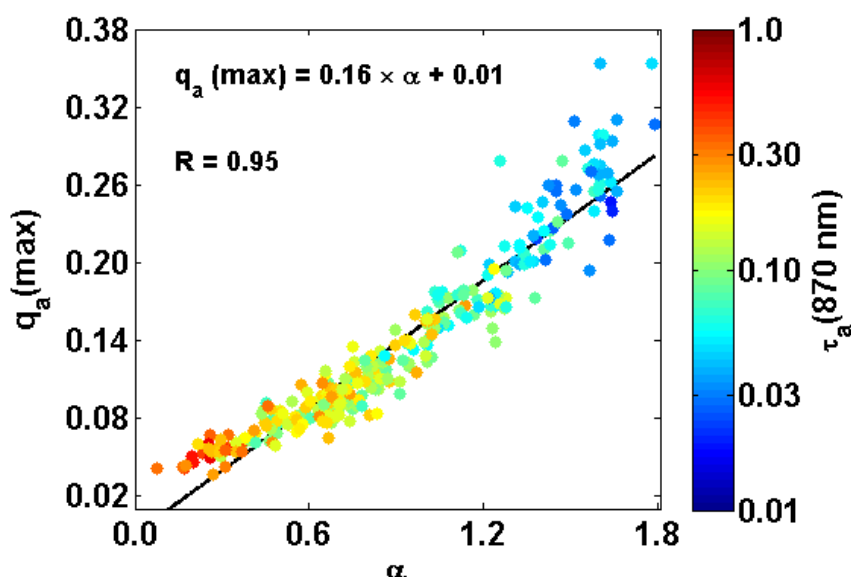
فراوانی	ω_0	$q_a(max)$	α	τ_a	نوع ذرات
۸۱	۰/۸۶	۰/۲۳	۱/۴۳	۰/۰۶	هواویزهای شهری-صنعتی $\alpha > 1/2$
۷۱	۰/۹۰	۰/۰۷	۰/۳۹	۰/۲۴	غبار $\alpha < 0/6$
۱۵۳	۰/۹۱	۰/۱۲	۰/۸۴	۰/۱۳	ترکیبی دو نوع $0/6 < \alpha < 1/2$
۳۰۵	۰/۹۰	۰/۱۴	۰/۸۹	۰/۱۴	کل

فصل‌های بهار و تابستان روی می‌دهد (شکل ۱). از طرفی افزایش مقدار میانگین نمای آنگستروم (ذرات ریز دانه) و کاهش سپیدایی پراکندگی تک‌باره (ذرات جاذب) در فصل‌های پاییز و زمستان می‌تواند به دلیل وجود هواویزهای شهری-صنعتی غالب در جو شهر زنجان باشد [۴-۶]. در طول سال نیز ترکیبی از دو نوع هواویز غباری و شهری-صنعتی در جو شهر زنجان مشاهده می‌کنیم. بنابراین در حالت کلی می‌توان هواویزهای شهر زنجان را به سه قسمت

زنجان در یک ناحیه نیمه‌خشک واقع شده‌است که به دور از هر گونه جنگل و دریایی است که منابع تولید‌کننده هواویزهای ناشی از سوختن جنگل‌ها و هواویزهای دریایی هستند. بنابراین تنها غبار و هواویزها شهری-صنعتی هواویزهای غالب در جو زنجان هستند [۴-۶]. بنابراین دلیل افزایش عمق اپتیکی هواویزها و کاهش پارامتر نمای آنگستروم و نزدیک شدن سپیدایی پراکندگی تک‌باره به عدد یک به دلیل افزوده شدن غبار در جو زنجان است که در

به دست می‌آید و همچنین فراوانی هر کدام در سه دسته‌بندی ذکر شده در جدول ۱ آمده است. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده در طول موج ۸۷۰ نانومتر قادر به جدا سازی هواویزهای مختلف جوی است همان‌گونه که عمق اپتیکی هواویزها و نمای آنگستروم هواویزهای مختلف جو شهر زنجان را تفکیک می‌کنند.

تقسیم کرد: (۱) غالب هواویزهای جوی متشکل از هواویزهای شهری-صنعتی باشند ($\alpha > 1/2$)، (۲) غالب هواویزهای جوی ذرات غبار باشند ($\alpha < 0/6$)، و (۳) ترکیبی از دو مورد قبلی ($0/6 < \alpha < 1/2$). مقادیر میانگین عمق اپتیکی هواویزها، تابع فازی قطبیده و سپیدایی پراکندگی تک‌باره در طول موج ۸۷۰ نانومتر و پارامتر نمای آنگستروم که از داده‌های عمق اپتیکی هواویزها در سه طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، و ۸۷۰ نانومتر

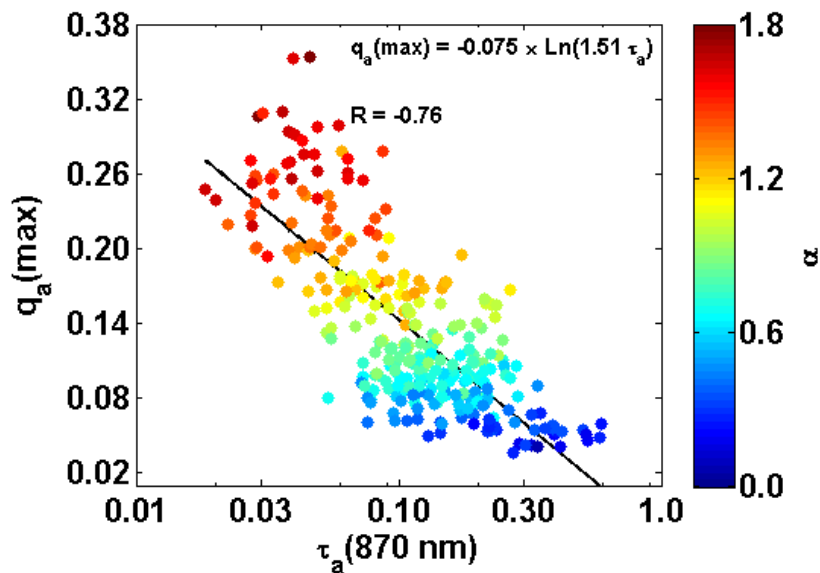


شکل ۲- همبستگی قوی خطی بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده در طول موج ۸۷۰ نانومتر و پارامتر نمای آنگستروم، نوار رنگی نشان‌دهنده عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد، در بازه اندازه‌گیری بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱ برای جو زنجان.

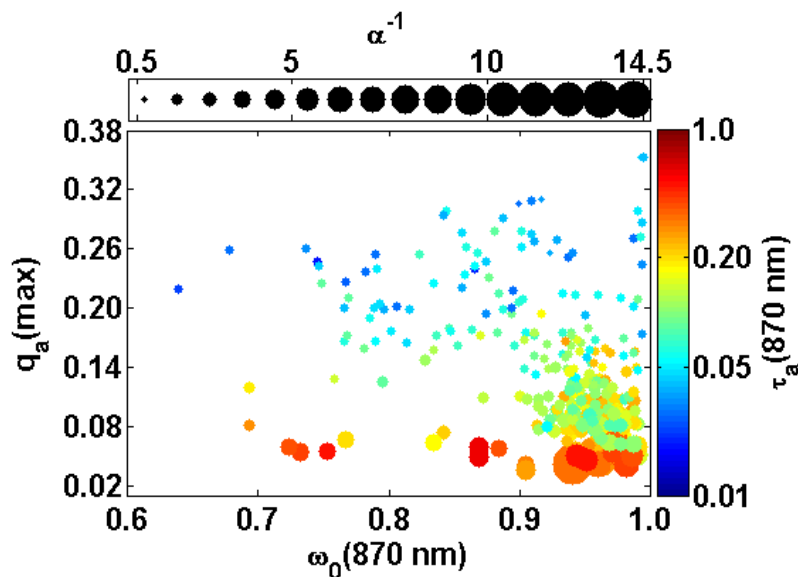
۸۷۰ نانومتر را نشان می‌دهد، نوار رنگی نشان‌دهنده عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر در مقیاس لگاریتمی است و شعاع دایره‌ها معیاری از اندازه میانگین ذرات هواویز (α^{-1}) است. نمودار ۴ نشان می‌دهد که برای هواویزهای درشت‌دانه و عمق اپتیکی‌های بالاتر بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده حدود ۰,۰۵ است. همچنین شاهد یک همبستگی خطی منفی ($R = -0/33$) بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و سپیدایی پراکندگی تک‌باره هستیم به این معنا که برای ذرات ریز که عموماً شهری-صنعتی هستند میزان جذب و بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده بیش‌تر از ذرات درشت‌دانه است.

شکل ۲ همبستگی قوی خطی ($R = 0/95$) بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و متوسط اندازه ذرات (نمای آنگستروم) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه ذرات (کاهش نمای آنگستروم) مقدار تابع فازی قطبیده کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین می‌بینیم که ذرات هواویز، هنگامی اندازه بزرگتری دارند که عمق اپتیکی هواویزها بالا باشد یعنی این غبار یا هواویزهای درشت‌دانه هستند که قطبش کم‌تری را بر روی نور سوار می‌کند. در شکل ۳ همبستگی خطی منفی ($R = -0/75$) را بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و عمق اپتیکی هواویزها در مقیاس لگاریتمی در طول موج ۸۷۰ نانومتر مشاهده می‌کنیم.

شکل ۴ همبستگی بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و سپیدایی پراکندگی تک‌باره در طول موج



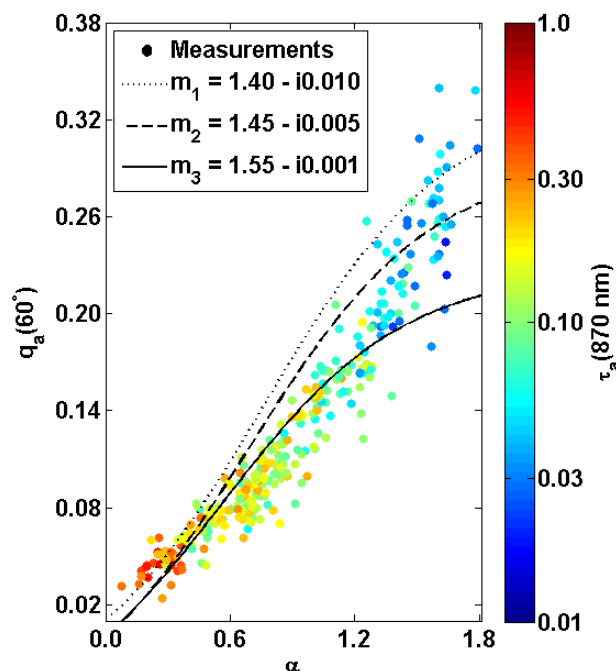
شکل ۳- همبستگی خطی منفی بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و عمق اپتیکی هواویزها در مقیاس لگاریتمی در طول موج ۸۷۰ نانومتر، نوار رنگی نشان‌دهنده پارامتر نمای آنگستروم است، در بازه اندازه‌گیری بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱، برای جو زنجان.



شکل ۴- همبستگی بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده و سپیدایی پراکندگی تک‌باره در طول موج ۸۷۰ نانومتر، نوار رنگی نشان‌دهنده عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر در مقیاس لگاریتمی است و اندازه دایره‌ها معیاری از اندازه میانگین (α^{-1}) هواویزها است، در بازه اندازه‌گیری بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱، برای جو زنجان.

می‌توانند میزان قطبش خطی بیش‌تری را نسبت به ذرات درشت دانه غیر جاذب بر روی نور فرودی، در پروسه پراکندگی، اعمال کنند. بنابراین پارامتر تابع فازی قطبیده می‌تواند به‌تنهایی هواویزهای مختلف جو زنجان و جوهای مشابه جو زنجان را از هم‌دیگر جدا سازی کند.

جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین عمق اپتیکی هواویزها و نمای آنگستروم قادر به تفکیک هواویزهای مختلف در جو زنجان هستند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که میانگین تابع فازی قطبیده نیز هواویزهای مختلفی که در جو زنجان است را می‌تواند از هم جدا بکند. در حالت کلی شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ نشان می‌دهند که ذرات ریز جاذب



شکل ۵- تابع فازی قطبیده در زاویه پراکندگی ۶۰ درجه برای محاسبات تئوری (خطوط، برای سه ضریب شکست مختلط مختلف در طول موج ۸۷۰ نانومتر) و تابع فازی قطبیده استخراج شده از اندازه‌گیری‌ها در زاویه ۶۰ درجه (نقاط)، بر حسب نمای آنگستروم، نوار رنگی نشان‌دهنده عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر در مقیاس لگاریتمی است.

اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم، سپیدایی پراکندگی تک‌باره و تابع فازی قطبیده هواویزها استخراج شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که برای جو آلوده زنجان غبار ذرات غالب در جو زنجان است و برای جو تمیز آلودگی شهری-صنعتی هواویز غالب در جو است و برای بقیه زمان‌ها مخلوطی از هواویزهای غباری و شهری-صنعتی در جو زنجان وجود دارد (جدول ۱). مقادیر حدی و میانی پارامترهای عمق اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم، سپیدایی پراکندگی تک‌باره و بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده هواویزها برای سه بازه مختلف در جدول ۱ نشان داده شده‌است. مقادیر بیشینه تابع فازی قطبیده در جدول ۱ (کمینه، بیشینه و میانگین) برای سه بازه ذکر شده نشان می‌دهند که تابع فازی قطبیده پارامتر مناسبی برای دسته‌بندی هواویزهای جو زنجان است. برای اثبات این موضوع، همبستگی بین بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده هواویزها و عمق اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم و سپیدایی پراکندگی تک‌باره مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). تابع فازی قطبیده همبستگی زیادی (R=۰/۹۵) با نمای آنگستروم و همبستگی منفی (R=-۰/۷۵) با عمق اپتیکی هواویزها دارد. این مشاهدات نشان می‌دهند که افزایش بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده زمانی رخ می‌دهد که ذراتی با ابعاد ریزدانه (هواویز شهری-صنعتی) در

در شکل ۵ تابع فازی قطبیده که برای سه ضریب شکست مختلط که متناظر با ضریب شکست‌های مختلط هواویزهای شهری - صنعتی ($m_1 = 1.40 - i0.010$)، هواویزهای شهری - صنعتی که به صورت ناقص سوخته‌اند ($m_2 = 1.45 - i0.005$)، و غبار ($m_3 = 1.55 - i0.001$) در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای زاویه ۶۰ درجه از تئوری برحسب اندازه ذرات محاسبه شده‌است؛ هم‌چنین نقاط نشان‌دهنده‌ی تابع فازی قطبیده است که از اندازه‌گیری‌ها به‌دست آمده است. به‌وضوح مشاهده می‌شود که با ریزتر شدن اندازه ذرات (بزرگتر شدن نمای آنگستروم) ضریب شکست مختلط ذرات هواویز به ضریب شکست مختلط هواویزهای شهری - صنعتی نزدیک می‌شود که تصدیق بر یافته‌های قبلی است. بنابراین با استفاده از خط‌کش تابع فازی قطبیده بر حسب پارامتر نمای آنگستروم می‌توان اطلاعاتی درباره ضریب شکست مختلط ذرات در مد مختلط (ترکیب هواویزهای شهری-صنعتی و غبار) و هواویزهای ریز دانه نیز به‌دست آورد.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار، توانایی تابع فازی قطبیده برای دسته‌بندی هواویزهای جو زنجان بررسی شده‌است. از داده‌های شیدسنج خورشیدی در بازه زمانی بهمن ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۹۱، عمق

- [7] Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E. "Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product", *Reviews of Geophysics*, (2002), 1002–1032.
- [8] Giles, D. M., Holben, B. N., Eck, T. F., Sinyuk, A., Smirnov, A., Slutsker, I., Dickerson, R. R., Thompson, A. M., and Schafer, J. S. "An Analysis of AERONET Aerosol Absorption Properties and Classifications Representative of Aerosol Source Regions", *J. Geophys. Res.*, (2012)117, D17203.
- [9] Vermeulen, A., Devaux, C., and Herman, M. "Retrieval of the scattering and microphysical properties of aerosols from groundbased optical measurements including polarization: I. Method", *Appl. Optics*, (2000)6207–6220.
- [10] Lenoble, J., Herman, M., Deuz'e, J. L., Lafrance, B., Santer, R., and Tanr'e, D. "A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols", *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, (2007)479–507.
- [11] Li, Z., Goloub, P., Devaux, C., Gu, X., Qiao, Y., and Zhao, F. "Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral, multi-angular and polarized sun-photometer measurements", *Remote Sens. Environ.*, (2006)519–533.



جو حضور داشته باشد و در رویدادهای غباری، عمق اپتیکی هواویزها در جو زنجان بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و نیز بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده کاهش می‌یابد. بنابراین نوع هواویز موجود در جو زنجان را می‌توان از تغییرات بیشینه مقدار تابع فازی قطبیده تعیین کرد. همچنین در شکل ۵ نشان داده‌ایم که مقادیر تئوری و تجربی تابع فازی قطبیده هواویزها می‌تواند معیاری از ضریب شکست ذرات موجود در جو زنجان را مشخص کند.

پی‌نوشت

¹ Aerosol Robotic Network

² European Lidar Network

منابع

- [1] IPCC, *Climate Change 2007: "The Physical Science Basis"*. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University, 2007.
- [2] Dubovik, O., Holben, B. N., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanr'e, D., and Slutsker, I. "Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations", *J. Atmos. Sci.*, (2002)590–608.
- [3] Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanr'e, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A. "AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization", *Remote Sensing of Environment*, (1998)1–16.
- [4] Bayat, A., Masoumi, A., and Khalesifard, H. R. "Retrieval of atmospheric optical parameters from ground-based sun-photometer measurements for Zanjan, Iran", *Atmospheric Measurement Techniques*, (2011)857–863.
- [5] Masoumi A., Khalesifard H. R., Bayat A., and Moradhaseli R. "Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran", *Atmospheric Research*, (2013)343–355.
- [6] Bayat, A., Khalesifard, H. R., and Masoumi, A. "Retrieval of aerosol single scattering albedo and polarized phase function from polarized sunphotometer measurements for Zanjan's atmosphere", *Atmospheric Measurement Techniques*, accepted, (2013).