

## Categorization of atmospheric suspended particles using degree of linear polarization parameter data of sun-photometer

Bayat, A.<sup>1</sup>  | Jafari, A.<sup>1</sup> 

1. Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Corresponding Author E-mail: [abayat@znu.ac.ir](mailto:abayat@znu.ac.ir)

(Received: 23 Aug 2022, Revised: 22 Oct 2022, Accepted: 2 May 2023, Published online: 30 Aug 2023)

### Summary

Aerosols are solid or liquid particles suspended in the earth's atmosphere, which enter the earth's atmosphere from both natural and human sources. The wind blowing in the deserts, the evaporation of oceans and seas, the eruption of volcanoes, and the burning of forests and pastures are natural sources, and the burning of fossil fuels and the change of the earth's surface cover are human sources of their production. Aerosols can be classified into four types: dusty, marine, urban-industrial, and biomass burning particles. Due to the significant temporal and spatial changes of aerosols and for properly understand their climatic effects, we need to use long-term measurements of satellites and ground-based instruments. Measurements made from space and ground have allowed us to have a detailed view of the properties and effects of different types of atmospheric particles. Ground-based remote sensing is one of the powerful methods for determining the optical and physical properties of atmospheric aerosols.

The sun-photometer (SPM) is a spectrometer that records the intensity of the sun's radiation usually in four wavelength channels of 440, 675, 870, and 1020 nm in two modes of measuring the sun and the sky with a limited viewing angle of 1.2 degrees during the day. Spectral aerosol optical depth, columnar water vapor, Angstrom exponent, single scattering albedo, polarized phase function, the real and imaginary refractive index of aerosols, and degree of linear polarization of sunlight are characteristics of atmospheric particles that are extracted from SPM measurements.

There are different methods for classifying aerosols using data extracted from SPM measurements. One of the most common methods is to use aerosol optical depth data (a measure of the amount of atmospheric suspended particles) in terms of the Angstrom exponent (a qualitative measure of the dimensions of atmospheric particles). By combining other parameters obtained from the mode of the sun and the sky of the SPM, such as the aerosol optical depth, Angstrom exponent, particle size distribution, and refractive index, atmospheric aerosols can be classified. Our aim in this article is to investigate the ability of the degree of linear polarization parameter to classify the atmospheric particles. The degree of linear polarization measures the linear polarization of sunlight scattered by atmospheric particles (molecules and aerosols). For this purpose, the data of four sites of Banizoumbou, Beijing, El-Arenosillo, and Minsk, which have dusty, urban-industrial, marine, and biomass-dominant particles, respectively, were selected from the AERONET (Aerosol RObotic NETwork) data.

This paper uses three parameters of aerosol optical depth, Angstrom exponent, and degree of linear polarization extracted from SPM data. The results show that the maximum value of the degree of linear polarization (standard deviation) at the wavelength of 870 nm for dusty (Banizoumbou), urban-industrial (Beijing), marine (El-Arenosillo) and biomass (Minsk) aerosols are equal to 0.14 (0.05), 0.35 (0.10), 0.47 (0.08) and 0.37 (0.08) respectively. Therefore, the parameter of the degree of linear polarization is able to separate dusty, urban-industrial, and marine atmospheric particles from each other. However, biomass particles overlap a lot with urban-industrial aerosols and cannot be separated from each other.

**Keywords:** Aerosols, dust, Sun-photometer, Degree of linear polarization, Categorization.

Cite this article: Bayat, A., & Jafari, A. (2023). Categorization of atmospheric suspended particles using degree of linear polarization parameter data of sun-photometer. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 491-502. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347185.1007451>

E-mail: (1) [amirmigabadi@gmail.com](mailto:amirmigabadi@gmail.com)



# دسته‌بندی ذرات معلق جوی با استفاده از داده‌های پارامتر درجه قطبش خطی شیدسنج خورشیدی

علی بیات<sup>۱</sup> | امیر جعفری<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [abayat@znu.ac.ir](mailto:abayat@znu.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۳۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۲/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

## چکیده

هوایزها ذرات ریز جامد یا مایع معلق در هوا هستند که اثرات مهمی بر سلامتی انسان‌ها، تغییرات اقلیمی، کیفیت هوا و بودجه تابشی جو زمین دارند. دسته‌بندی انواع مختلف آنها تأثیر بسیار زیادی در تخمین دقیق اثرات آنها در تغییرات اقلیمی دارد. در این مقاله قصد داریم انواع مختلف ذرات جوی را با استفاده از اندازه‌گیری‌های مد قطبیده شیدسنج خورشیدی دسته‌بندی کنیم. به همین منظور، داده‌های چهار سایت بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو و مینسک که به ترتیب دارای هوایز غالب غباری، شهری-صنعتی، دریایی و زیست‌توده هستند، از شبکه ارون‌ت انتخاب شدند. در اینجا از سه پارامتر عمق اپتیکی هوایزها، نمای آنگستروم و درجه قطبش خطی استخراج شده از داده‌های شیدسنج خورشیدی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که میانگین پارامتر بیشینه مقدار درجه قطبش خطی (انحراف معیار) در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای هوایز غالب غباری (بانزیمبو)، شهری-صنعتی (پکن)، دریایی (آل-آرنسیلو) و زیست‌توده (مینسک) به ترتیب برابر  $0.14$  ( $0.05$ )،  $0.35$  ( $0.10$ )،  $0.47$  ( $0.08$ ) و  $0.37$  ( $0.08$ ) هستند. در نهایت نتایج نشان می‌دهند که پارامتر درجه‌قطبش خطی قادر به جداسازی هوایزهای غباری، شهری-صنعتی و دریایی از یکدیگر است. اما هوایزهای زیست‌توده همپوشانی زیادی با هوایزهای شهری-صنعتی دارد و این پارامتر توانایی جداسازی آنها را ندارد.

واژه‌های کلیدی: هوایزها، شیدسنج خورشیدی، دسته‌بندی، درجه قطبش خطی، غبار.

## ۱. مقدمه

زمین باعث شده تا دید به نسبت دقیقی از خواص و اثرات انواع مختلف هوایزهای جوی داشته باشیم (کافمن و همکاران، ۲۰۰۲). سنجش از دور زمین پایه یکی از روش‌های قدرتمند برای تعیین خواص اپتیکی و فیزیکی ذرات معلق جوی است (دوبویک و همکاران، ۲۰۰۲).

شیدسنج خورشیدی، طیف‌سنجی است که شدت تابش خورشید را در چهار کانال طول‌موجی ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر در دو مد اندازه‌گیری خورشید و آسمان با زاویه دید محدود  $1/2$  درجه در طول روز ثبت می‌کند (هولبن و همکاران، ۱۹۹۸). عمق اپتیکی طیفی هوایزها (هولبن و همکاران، ۱۹۹۸)، میزان ستونی بخار آب (هالسور و همکاران، ۱۹۹۷)، نمای آنگستروم (آنگستروم، ۱۹۲۹)، سپیدایی پراکندگی تک‌باره، تابع فازی قطبیده،

هوایزها ذرات جامد یا مایع معلق در جو زمین هستند که از دو منشأ طبیعی و انسانی وارد جو زمین می‌شوند (وایت‌کمپ، ۲۰۰۶). وزش باد در صحراها، تبخیر آب اقیانوس‌ها و دریاها، فوران آتشفشان‌ها و سوختن جنگل‌ها و مراتع از منابع طبیعی و سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر پوشش سطحی زمین از منابع انسانی تولید آنها هستند. هوایزها را می‌توان به چهار نوع گرد و غباری، دریایی، شهری-صنعتی و زیست‌توده دسته‌بندی کرد (کوخانوفسکی، ۲۰۱۱). به دلیل تغییرات زمانی و مکانی زیاد هوایزها و برای درک صحیح از تأثیرات اقلیمی آنها، نیاز داریم تا از اندازه‌گیری‌های طولانی‌مدت ماهواره‌ها و ابزارهای زمین پایه استفاده کنیم (کافمن و همکاران، ۱۹۹۷). اندازه‌گیری‌های انجام‌شده از فضا و

استناد: بیات، علی و جعفری امیر (۱۴۰۲). دسته‌بندی ذرات معلق جوی با استفاده از داده‌های پارامتر درجه قطبش خطی شیدسنج خورشیدی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲).

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347185.1007451> ۵۰۲-۴۹۱

رایانامه: [amirigabadi@gmail.com](mailto:amirigabadi@gmail.com) (۱)

مختلف هواویز توسط پارامتر درجه قطبش خطی مورد بحث قرار گرفته است. بنابراین، نتایج این تحقیق می‌تواند در مطالعه و بررسی دقیق و نیز تفکیک ذرات مختلف جوی به محققان در این زمینه کمک کند. از آنجایی که رویدادهای غباری در روزهای خاصی از سال در فلات ایران اتفاق می‌افتد (عبدی و همکاران، ۲۰۱۲؛ معصومی و همکاران، ۲۰۱۳)، تفکیک دقیق آن می‌تواند به کم کردن عدم قطعیت در تعیین فشار تابشی ذرات معلق جوی در این منطقه تأثیرگذار باشد.

ساختار مقاله در ادامه به این صورت است که ابتدا در بخش ۲، مبانی نظری و تمامی داده‌های مورد استفاده و نحوه استفاده از آنها بحث می‌شود. سپس در بخش ۳، نتایج داده‌ها و روش کار بحث و بررسی خواهند شد و در نهایت در بخش ۴ به جمع‌بندی نتایج خواهیم پرداخت.

## ۲. مبانی نظری

از اندازه‌گیری نور مستقیم خورشید که از جو زمین عبور می‌کند در طول موج‌های معین در سطح زمین به‌وسیله شیدسنج‌خورشیدی می‌توان عمق‌اپتیکی هواویزها را برای راستای قائم در هر لحظه اندازه‌گیری و محاسبه کرد (هولبن و همکاران، ۱۹۹۸). با استفاده از عمق‌اپتیکی هواویزها در طول موج‌های مختلف می‌توان نمای آنگستروم را استخراج کرد (آنگستروم، ۱۹۲۹؛ بیات و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه، نحوه استخراج این دو پارامتر بیان شده است. سپس تأثیر هواویزهای مختلف بر روی نور قطبیده شده خورشید توسط مولکول‌های جوی با استفاده از پارامتر درجه قطبش خطی که از داده‌های شیدسنج‌خورشیدی استخراج شده است، بحث خواهد شد.

## ۲-۱. تعیین عمق‌اپتیکی هواویزها

بخشی از شدت نور مستقیم خورشید در عبور از جو زمین به‌دلیل جذب و پراکندگی از مولکول‌ها و هواویزها خاموش می‌شود. شدت نور عبوری از جو زمین به‌وسیله شیدسنج‌خورشیدی در سطح زمین در طول موج‌های معین

ضریب شکست حقیقی و موهومی هواویزها و درجه قطبش خطی (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴) نور خورشید پراکنده شده از ذرات جوی ویژگی‌هایی از ذرات جوی است که از اندازه‌گیری‌های شیدسنج‌خورشیدی استخراج می‌شوند (دوبویک و همکاران، ۲۰۰۶).

شناسایی دقیق انواع مختلف هواویزها می‌تواند منجر به درک بهتر منابع و شناخت اثرات ذرات معلق جوی بر روی اقلیم منطقه مورد مطالعه داشته باشد. روش‌های مختلفی برای دسته‌بندی انواع مختلف هواویزها با استفاده از داده‌های استخراج شده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج‌خورشیدی وجود دارد (گیلز و همکاران، ۲۰۱۲؛ بی‌بی و همکاران، ۲۰۱۷؛ شین و همکاران، ۲۰۱۸؛ خادمی و بیات، ۲۰۲۱). یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها استفاده از داده‌های عمق‌اپتیکی هواویزها (معیاری از میزان ذرات معلق جوی) برحسب نمای آنگستروم (معیاری کیفی از ابعاد ذرات جوی) است. از این نمودار نقطه‌ای می‌توان برای تشخیص هواویزهای مختلف جوی استفاده کرد (بی‌بی و همکاران، ۲۰۱۷). با ترکیب پارامترهای دیگر به‌دست‌آمده از مد خورشید و آسمان شیدسنج‌خورشیدی مانند عمق‌اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم، توزیع اندازه ذرات و ضریب شکست می‌توان هواویزهای جوی را دسته‌بندی کرد (بی‌بی و همکاران، ۲۰۱۷؛ گیلز و همکاران، ۲۰۱۲).

هدف ما در این مقاله بررسی توانایی پارامتر درجه قطبش خطی برای دسته‌بندی هواویزهای جوی است. درجه قطبش خطی معیاری از قطبش خطی نور پراکنده شده خورشید از مولکول‌ها و هواویزهای جوی است. در این مقاله، پارامتر درجه قطبش خطی به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج‌خورشیدی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای چهار نقطه مختلف دنیا که دارای هواویز غالب غباری، شهری-صنعتی، زیست‌توده و دریایی هستند، استفاده شده است.

باید اشاره کنیم که در اغلب شهرهای کشور ایران دو نوع هواویز غبار و آلودگی شهری-صنعتی ذرات غالب معلق جوی هستند (بیات و همکاران، ۲۰۱۱؛ معصومی و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه قدرت تفکیک انواع

در حدود طول موج نور فرودی است، سطح مقطع خاموشی با توان‌های کوچک‌تر طول موج نور فرودی متناسب خواهد است. به این معنا که با بزرگ‌تر شدن ابعاد ذرات، توان چهار طول موج در تناسب ریلی در حد رژیم هندسی به صفر میل می‌کند (زدونکوفسکی و همکاران، ۲۰۰۷). می‌دانیم که ابعاد هواویزهای جوی از چند نانومتر تا چند ده میکرومتر است (سالمون و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، برای طول موج‌های اندازه‌گیری شیدسنج‌خورشیدی هواویزها در هر سه رژیم ریلی، می و هندسی قرار می‌گیرند. عمق‌اپتیکی هواویزها برابر انتگرال سطح مقطع خاموشی هواویزها ضرب در چگالی جرمی آنها از سطح زمین تا بالای جو زمین است. پس عمق‌اپتیکی هواویزها متناسب با بازده خاموشی ذرات خواهد بود. آنگستروم در سال ۱۹۲۹ میلادی فرمول تجربی پیشنهاد کرد که در آن عمق‌اپتیکی هواویزها را برحسب طول موج نور فرودی بیان می‌کرد (آنگستروم، ۱۹۲۹).

$$\tau_{a,\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\beta$  ضریب ثابتی به نام ضریب تاریکی است و  $\alpha$  نمای آنگستروم نامیده می‌شود. در حقیقت آنگستروم با این رابطه توانست ابعاد ( $\alpha$ ) و میزان یا تعداد هواویزها ( $\beta$ ) را از یکدیگر جدا کند. آنگستروم نشان داد که اگر  $\alpha$  بزرگ‌تر از ۱ باشد ذرات جوی در مد ریزدانه (شعاع ذرات جوی کوچک‌تر از ۱ میکرومتر) قرار دارد و در صورتی که  $\alpha$  کوچک‌تر از ۱ باشد ذرات جوی در مد درشت‌دانه (شعاع ذرات جوی بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر) است (آنگستروم، ۱۹۲۹).

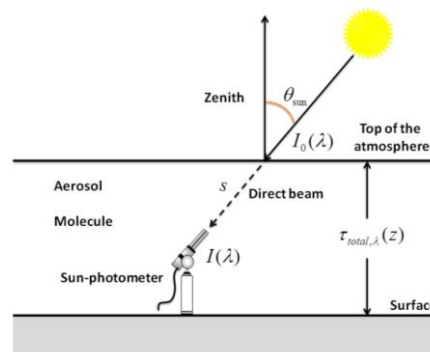
ثابت می‌شود. میزان خاموشی شدت نور فرودی تکفام در عبور از جو با رابطه بیر-لامبرت محاسبه می‌شود (زدونکوفسکی و همکاران، ۲۰۰۷):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m\tau_\lambda) \quad (1)$$

که در آن  $I_0(\lambda)$  و  $I(\lambda)$  به ترتیب شدت نور خورشید در طول موج  $\lambda$  در بالای جو زمین و در سطح زمین هستند.  $m$  توده جوی و برابر وارون کسینوس زاویه نور فرودی خورشید با سرسو است که در شکل ۱ نشان داده شده است.  $\tau_\lambda$  عمق اپتیکی کل است که دارای خاموشی ناشی از مولکول‌ها و ذرات معلق جوی است. عمق اپتیکی کل برابر حاصل جمع عمق اپتیکی مولکول‌ها به اضافه عمق اپتیکی ذرات معلق جوی یا هواویزها است. عمق اپتیکی مولکول‌ها با استفاده از اندازه‌گیری فشار در سطح زمین محاسبه می‌شود (بوداین، ۱۹۹۹). بنابراین عمق اپتیکی هواویزها با کم کردن عمق اپتیکی مولکول‌ها از عمق اپتیکی کل به دست می‌آید (رولین، ۲۰۰۰).

## ۲-۲. تعیین نمای آنگستروم

نور خورشید در عبور از جو زمین به دلیل اندرکنش (جذب و پراکندگی) با ذرات جوی خاموش می‌شود. بازده خاموشی هر ذره متناسب با سطح مقطع هندسی‌اش در راستای نور فرودی است. بازده خاموشی ذره را با نماد  $Q_{ext}$  نمایش می‌دهند که به طول موج نور فرودی، ابعاد و ضریب شکست ذره بستگی دارد. برای ذراتی که در رژیم پراکندگی ریلی قرار دارند، یعنی ابعاد ذره خیلی کوچک‌تر از طول موج نور فرودی است؛  $Q_{ext}$  نسبت مستقیم با  $\lambda^{-4}$  دارد. در رژیم پراکندگی می‌که ابعاد ذره



شکل ۱. شمایی از اندازه‌گیری شدت نور عبوری مستقیم خورشید از جو زمین به وسیله شیدسنج‌خورشیدی در مد اندازه‌گیری خورشید.

پراکندگی مختلف محاسبه شده است. بیشینه مقدار این پارامتر در زاویه ۹۰ درجه رخ می‌دهد که از این پارامتر به همراه عمق‌پتیکی هواویزها و نمای آنگستروم برای دسته‌بندی هواویزها استفاده خواهد شد.

### ۳. داده‌ها و روش کار

لی و همکاران (۲۰۰۹) برای ارتقاء و دقیق‌تر کردن پارامترهای استخراجی ذرات معلق از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی نیز استفاده کردند. مهم‌ترین پارامتر اضافه شده به این اندازه‌گیری‌ها پارامتر درجه قطبش خطی بود (لی و همکاران، ۲۰۰۹). در این کار و کارهای دیگر نشان داده شد که پارامتر درجه قطبش خطی برای ذرات مختلف جوی تغییراتی را نشان می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ۲۰۱۰؛ ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸).

شکل ۲، نمودار پارامتر درجه قطبش خطی بر حسب زاویه پراکندگی برای دو اندازه‌گیری در روزهای ۲۲ مارس ۲۰۱۲ و ۲۴ ژوئن ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که به ترتیب نمونه‌ای از روزهای صاف و غباری در ایستگاه اندازه‌گیری زنجان هستند که دارای یک شیدسنج خورشیدی قطبیده است. نمودار نشان می‌دهد، پارامتر درجه قطبش خطی برای زوایای پراکندگی مختلف برای روز صاف و غباری مقادیر کاملاً متفاوتی از یکدیگر نشان می‌دهد. بیشترین میزان این اختلاف برای روزهای مختلف در زاویه پراکندگی ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد.

همان‌طور که از شکل ۲ مشاهده می‌کنید، بیشینه مقدار درجه قطبش خطی نور که از مولکول‌ها و هواویزهای جوی پراکنده شده است، در زاویه ۹۰ درجه رخ می‌دهد. طبق نظریه پراکندگی ریلی، نور فرودی ناقطبیده در پراکندگی از ذراتی که ابعاد آنها نسبت به طول‌موج نور فرودی بسیار کوچک باشد، در زاویه پراکندگی ۹۰ درجه کاملاً قطبیده می‌شود. به بیان دیگر، درجه قطبش خطی نور پراکنده شده از مولکول‌های هوا در طول‌موج ۸۷۰ نانومتر در زاویه ۹۰ درجه بیشترین مقدار خود را خواهد

### ۲-۳. استخراج درجه قطبش خطی

قطبش یکی از خاصیت‌های هر موج عرضی است. موج عرضی موجی است که در آن جهت ارتعاشات میدان عمود بر جهت انتشارش است. نور یک موج عرضی است که از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نوسان‌کننده تشکیل شده است. بسته به جهت بردار میدان الکتریکی نور که در صفحه عمود بر راستای انتشار موج نور قرار می‌گیرد، قطبش هر موج نور تعیین می‌شود (پدروتی و همکاران، ۲۰۱۷).

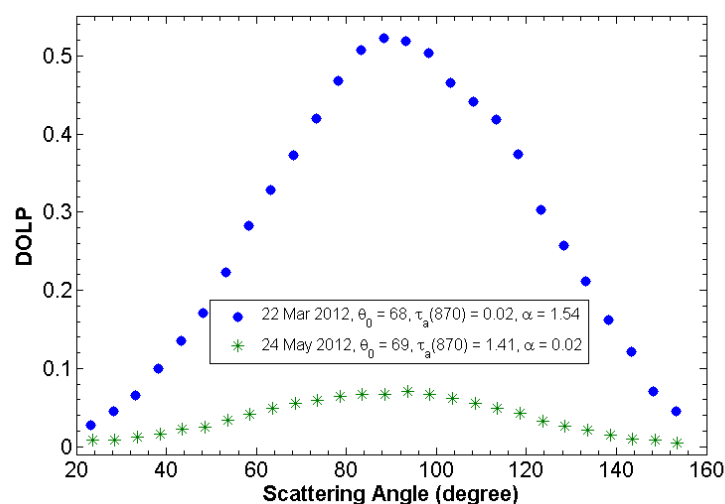
در حالت کلی نور طبیعی، نوری ناقطبیده است. در نور ناقطبیده جهت‌های میدان‌های الکتریکی امواج به طور کاتوره‌ای توزیع می‌شوند. نور ناقطبیده خورشید در عبور از جو زمین به دلیل اندرکنش با مولکول‌ها و ذرات جوی قطبیده می‌شود (میشچنکو و همکاران، ۲۰۱۱). شیدسنج خورشیدی با استفاده از سه قطبش‌گر خطی که محور عبوری آنها نسبت به هم زاویه ۶۰ درجه می‌سازد، درجه قطبش خطی نور پراکنده شده آسمان را در هر یک از زوایای اندازه‌گیری مد اصلی قطبیده شیدسنج خورشیدی در طول‌موج ۸۷۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کند. درجه قطبش خطی، میزان قطبیده شدن نور ناقطبیده خورشید در پراکندگی از مولکول‌ها و ذرات موجود در جو زمین را نشان می‌دهد. این پارامتر از حاصل تقسیم نور قطبیده کامل ( $I_{pol}^{in}$ ) به کل نور ( $I_{nat}^{in} + I_{pol}^{in}$ ) فرودی به دست می‌آید. رابطه (۳) ارتباط بین درجه قطبش خطی،  $DOLP$  (Degree Of Linear Polarization)، و شدت نور عبوری از هریک از قطبش‌گرهای خطی  $L_{P1}$ ،  $L_{P2}$  و  $L_{P3}$  را بیان می‌کند (لی و همکاران ۲۰۱۸).

$$DOLP = \frac{I_{pol}^{in}}{I_{nat}^{in} + I_{pol}^{in}} = \frac{2\sqrt{L_{P1}^2 + L_{P2}^2 + L_{P3}^2 - L_{P1}L_{P2} - L_{P1}L_{P3} - L_{P2}L_{P3}}}{L_{P1} + L_{P2} + L_{P3}} \quad (3)$$

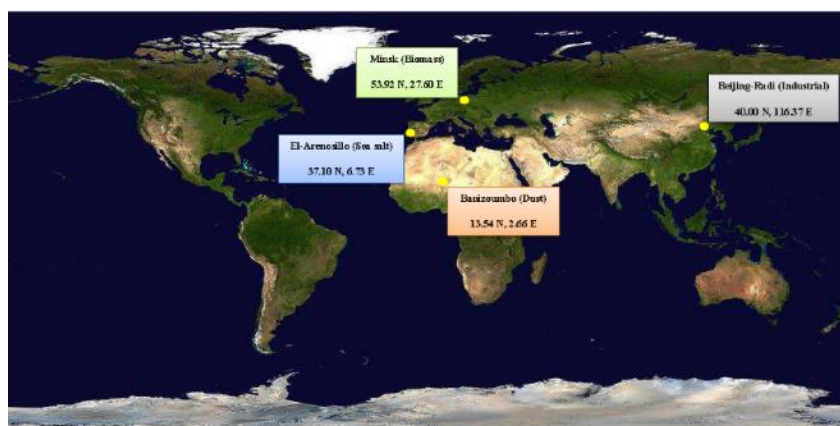
در رابطه (۳)  $L_{Pi}$  شدت نور اندازه‌گیری شده بعد از قطبش‌گر  $i$  ام است. در این مقاله برای اندازه‌گیری‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی در طول‌موج ۸۷۰ نانومتر پارامتر درجه قطبش خطی برای زوایای مختلف

قطبش خطی گفته خواهد شد. در این مقاله قصد داریم انواع مختلف هواویزهای غباری، شهری-صنعتی، دریایی و زیست توده را توسط اندازه گیری های مدقطبیده شیدسنج خورشیدی دسته بندی کنیم. به همین منظور، داده های چهار سایت بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو و مینسک که به ترتیب دارای هواویز غالب غباری، هواویز شهری-صنعتی، هواویز دریایی و هواویز زیست توده انتخاب شدند. در شکل ۳، محل قرارگیری شیدسنج های خورشیدی در روی نقشه نشان داده شده است.

داشت یعنی نزدیک به ۱ (هنسن و تراویس، ۱۹۷۴). در زوایای پراکندگی دیگر قطبش نور کمتر خواهد بود. کمترین مقدار قطبش در زاویه پراکندگی صفر و ۱۸۰ درجه رخ می دهد. نمودار شکل ۲ نشان می دهد که بیشترین اختلاف بین دو روز صاف و غباری برای پارامتر درجه قطبش خطی در زاویه ۹۰ درجه رخ می دهد. به همین دلیل، مقدار پارامتر درجه قطبش خطی در این زاویه به عنوان یک شاخص برای بررسی شرایط مختلف جوی مورد استفاده قرار می گیرد. بعد از این به مقدار پارامتر درجه قطبش خطی در زاویه ۹۰ درجه، بیشینه مقدار درجه



شکل ۲. درجه قطبش خطی برای دو اندازه گیری در روزهای ۲۲ مارس ۲۰۱۲ و ۲۴ ژوئن ۲۰۱۲ که به ترتیب نمونه ای از روزهای صاف و غباری در ایستگاه اندازه گیری زنجان هستند.  $\theta_0$  زاویه موازی ساز شیدسنج خورشیدی با سوسو در هنگام اندازه گیری است.  $\alpha$  به ترتیب میانگین عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر و نمای آنگستروم را نشان می دهند.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی چهار سایت اندازه گیری شده به ترتیب شهر بانزیمبو، پکن، مینسک و آل-آرنسیلو که به ترتیب دارای هواویزهای غباری، هواویزهای غالب شهری-صنعتی، هواویزهای ناشی از سوختن مراتع و جنگل ها و هواویز دریایی.

جدول ۱. مشخصات چهار سایت اندازه‌گیری شامل طول و عرض جغرافیایی، زمان شروع و پایان اندازه‌گیری و طول داده مورد استفاده.

نام سایت	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	شروع داده	پایان داده	دوره اندازه‌گیری (سال)
بازیمبو	۰۰۲/۶۶ شرقی	۱۳/۵۴ شمالی	۱۹۹۵/۱۰/۱۶	۲۰۱۶/۰۶/۱۹	۲۰
پکن	۱۱۶/۳۷ شرقی	۴۰/۰۰ شمالی	۲۰۱۰/۰۱/۰۵	۲۰۱۷/۱۰/۲۶	۷
آل-آرنسیلو	۰۰۶/۷۳ شرقی	۳۷/۱۰ شمالی	۲۰۰۰/۰۲/۱۶	۲۰۱۰/۰۳/۰۴	۱۰
مینسک	۰۳۷/۱۰ شرقی	۲۷/۶۰ شمالی	۲۰۰۲/۰۷/۳۰	۲۰۱۶/۱۰/۲۰	۱۲

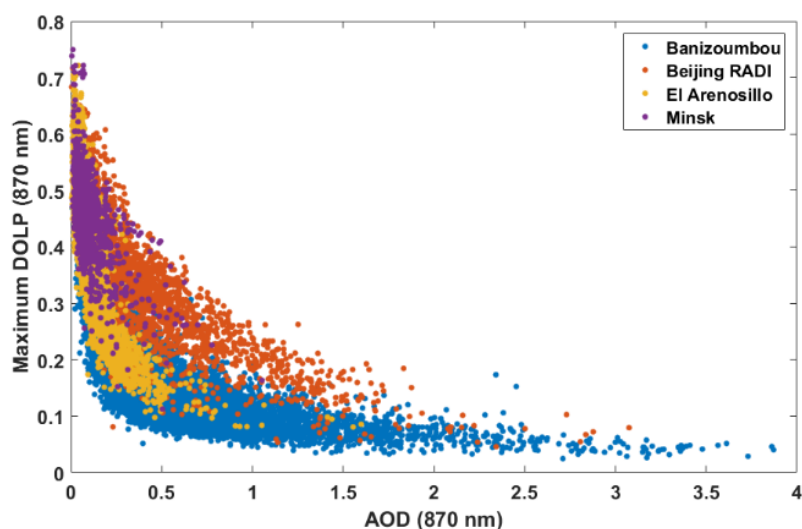
در جدول ۱، مشخصات مکانی و زمانی داده‌های استفاده شده از هر کدام از سایت‌های بازیمبو، پکن، آل-آرنسیلو و مینسک آورده شده است. کمترین دوره اندازه‌گیری مربوط به پکن با ۷ سال و بیشترین دوره مربوط به بازیمبو با ۲۰ سال طول دوره است. شیدسنج خورشیدی در طول روز تقریباً هر ۱۵ دقیقه یکبار اندازه‌گیری انجام می‌دهد. مگر زمان‌هایی که بارندگی باشد یا خورشید توسط ابر پوشیده شده باشد.

شکل ۴، همبستگی بین پارامتر بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی و عمق‌اپتیکی‌هاوایزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر را برای چهار سایت اندازه‌گیری بازیمبو، پکن، مینسک و آل-آرنسیلو نشان می‌دهد. برای هر چهار سایت اندازه‌گیری مشاهده می‌کنیم که با افزایش عمق‌اپتیکی‌هاوایزها، بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای انواع مختلف‌هاوایزها کاهش می‌یابد. افزایش میزان ذرات از یک نوع باعث افزایش پراکندگی چندباره می‌شود که خود این موضوع موجب کاهش درجه‌قطبش خطی می‌شود. اما برای‌هاوایزهای مختلف شیب این نمودار متفاوت است. همچنین برای عمق‌اپتیکی‌های بالاتر (بیشتر از ۰/۲)‌هاوایزهای شهری-صنعتی از‌هاوایزهای غباری جدا می‌شوند، یعنی در عمق‌اپتیکی‌های یکسان از‌هاوایزها بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای‌هاوایز غباری کمتر از‌هاوایز شهری-صنعتی است. در شکل ۴، بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای مینسک که دارای‌هاوایز ناشی از

سوختن جنگل و مراتع است با بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی پکن و بازیمبو که به ترتیب دارای‌هاوایز شهری-صنعتی و غباری هستند همپوشانی دارند. در شکل ۵، همبستگی بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر و نمای آنگستروم آورده شده است. نمای آنگستروم از تغییرات طیفی عمق‌اپتیکی‌هاوایزها در دو طول موج ۴۴۰، ۸۷۰ نانومتر به دست می‌آید و یک معیار کیفی از اندازه ذرات‌هاوایزهای موجود در جوزمین را نشان می‌دهد. همبستگی قوی خطی بین بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی و نمای آنگستروم نشان می‌دهد که با افزایش نمای آنگستروم (کاهش اندازه ذرات) درجه‌قطبش خطی نور پراکنده شده نیز افزایش می‌یابد. این نمودار نشان می‌دهد که میزان قطبیده‌شدن نور در عبور از جوزمین به اندازه ذرات موجود در جوزمین بستگی دارد.

بنابراین برای‌هاوایزهایی که در محدوده اندازه معینی تغییر می‌کند، درجه‌قطبش خطی نیز تغییر محدودی حول یک مقدار میانگین خواهد داشت. به همین دلیل مشاهده می‌کنیم که‌هاوایزهای ناشی از سوختن مواد زیست‌توده (مینسک) و‌هاوایزهای دریایی (آل-آرنسیلو) و‌هاوایزهای شهری-صنعتی (پکن) دارای محدوده کاملاً متمایزی از‌هاوایزهای غباری (بازیمبو) هستند. از شکل‌های ۴ و ۵ نتیجه می‌گیریم که قطبش نور پراکنده‌شده قادر به جداسازی‌هاوایزهای مختلف جوی از یکدیگر است.

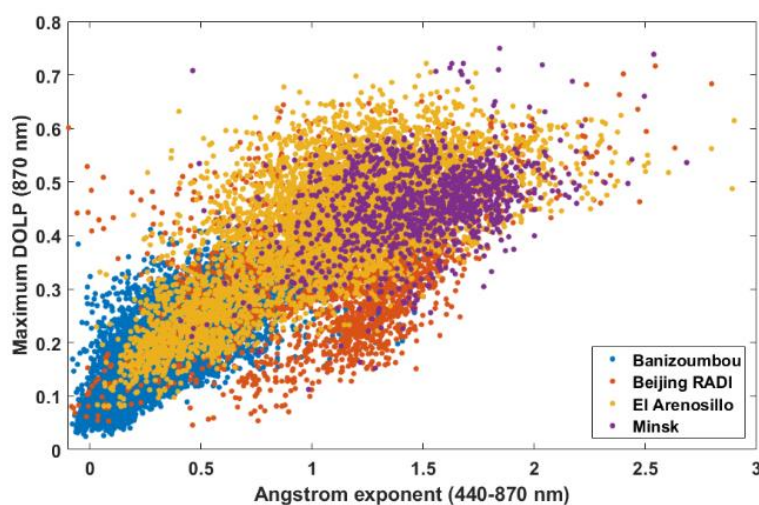
شکل ۴، همبستگی بین پارامتر بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی و عمق‌اپتیکی‌هاوایزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر را برای چهار سایت اندازه‌گیری بازیمبو، پکن، مینسک و آل-آرنسیلو نشان می‌دهد. برای هر چهار سایت اندازه‌گیری مشاهده می‌کنیم که با افزایش عمق‌اپتیکی‌هاوایزها، بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای انواع مختلف‌هاوایزها کاهش می‌یابد. افزایش میزان ذرات از یک نوع باعث افزایش پراکندگی چندباره می‌شود که خود این موضوع موجب کاهش درجه‌قطبش خطی می‌شود. اما برای‌هاوایزهای مختلف شیب این نمودار متفاوت است. همچنین برای عمق‌اپتیکی‌های بالاتر (بیشتر از ۰/۲)‌هاوایزهای شهری-صنعتی از‌هاوایزهای غباری جدا می‌شوند، یعنی در عمق‌اپتیکی‌های یکسان از‌هاوایزها بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای‌هاوایز غباری کمتر از‌هاوایز شهری-صنعتی است. در شکل ۴، بیشینه مقدار درجه‌قطبش خطی برای مینسک که دارای‌هاوایز ناشی از



شکل ۴. همبستگی بیشینه مقدار درجه قطبش خطی و عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای چهار شهر بانزیمبو، پکن، مینسک و آل-آرنسیلو که به ترتیب دارای هواویزهای غباری، هواویزهای غالب شهری-صنعتی، هواویزهای ناشی از سوختن مراتع و جنگل‌ها و هواویز دریایی هستند (منبع نگارنده).

سایت اندازه‌گیری بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو و مینسک که به ترتیب دارای هواویزهای غالب غباری، آلودگی شهری-صنعتی، هواویزهای دریایی و هواویز ناشی از سوختن مراتع و جنگل هستند، نشان داده شده است. در این شکل هیچ محدودیتی روی داده‌ها وجود ندارد. مشاهده می‌کنیم که پارامتر درجه قطبش خطی تقریباً قادر به جداسازی سه نوع هواویز مختلف است.

برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر دسته‌بندی هواویزهای مختلف جوی، تعداد رخداد نرمالیزه بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای هر چهار سایت ترسیم شد. منظور از تعداد رخداد نرمالیزه، تعداد تکرار پارامتر مورد نظر در یک بازه مقادری تقسیم بر کل تعداد داده‌ها است. در شکل ۶، توزیع نرمال بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای چهار

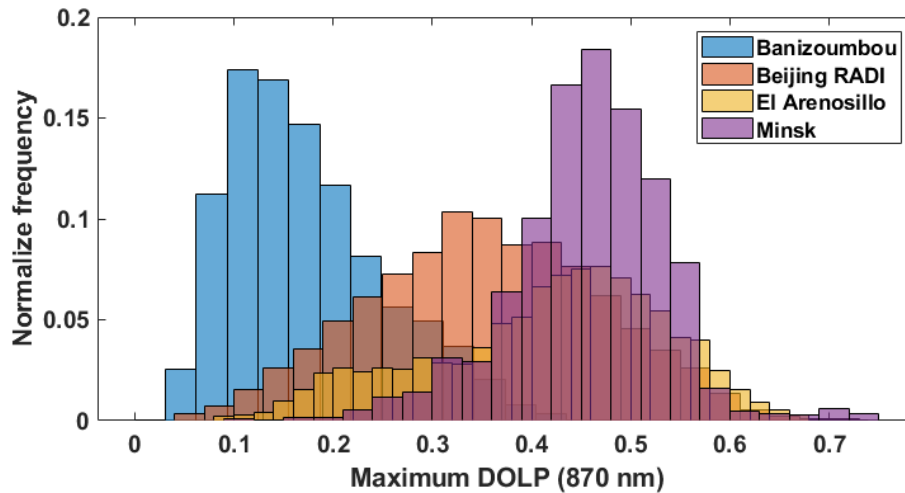


شکل ۵. همبستگی بیشینه مقدار درجه قطبش خطی و نمای آنگستروم در طول موج ۴۴۰ و ۸۷۰ نانومتر برای چهار شهر بانزیمبو، پکن، مینسک و آل-آرنسیلو که به ترتیب دارای هواویزهای غباری، هواویزهای غالب شهری-صنعتی، هواویزهای ناشی از سوختن مراتع و جنگل‌ها و هواویز دریایی هستند (منبع نگارنده).

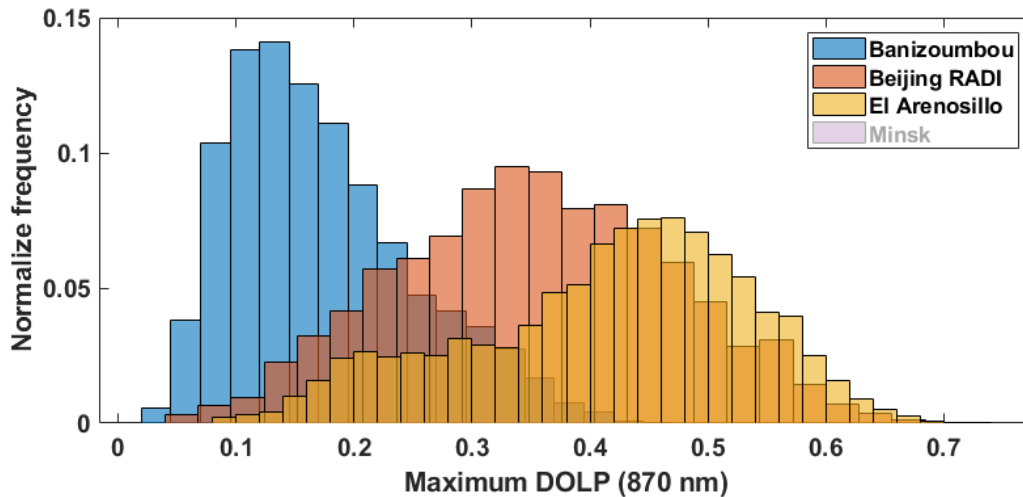


همکاران، ۲۰۰۷)، تنها داده‌های مربوط به هواویزهای خاص را انتخاب می‌کنیم. در جدول ۲، محدوده عمق اپتیکی هواویزها (AOD) و نمای آنگستروم ( $\alpha$ ) برای چهار نوع هواویز غالب غباری، آلودگی شهری-صنعتی، هواویز دریایی و هواویز ناشی از سوختن مراتع و جنگل آورده شده است.

در شکل ۷، نمودار ۶ تنها برای سه نوع هواویز که با پارامتر درجه قطبش خطی قابل جداسازی هستند ترسیم شده است. در ادامه، برای جداسازی دقیق انواع مختلف هواویزها، ابتدا با استفاده از مطالعات قبلی که با استفاده از دو پارامتر عمق اپتیکی هواویزها و نمای آنگستروم هواویزهای گوناگون را دسته‌بندی کرده‌اند (تولدانو و



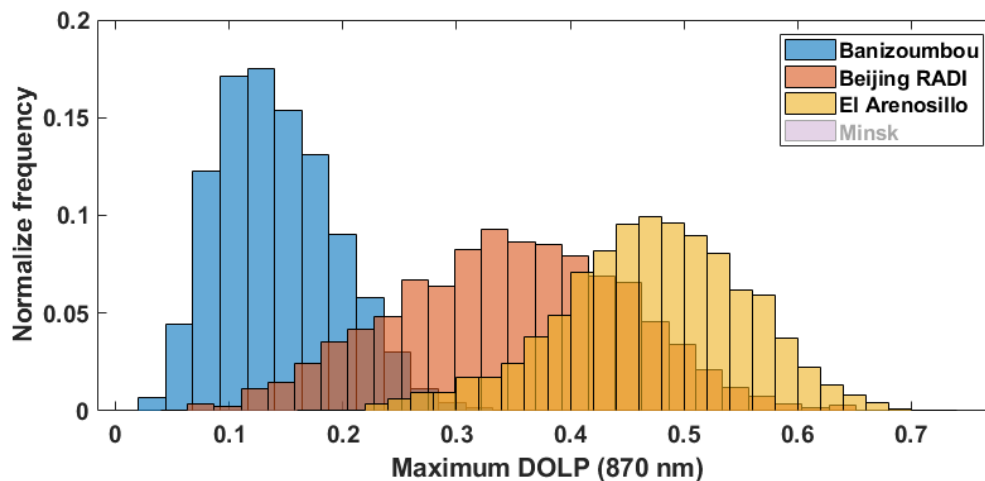
شکل ۶. توزیع نرمال بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای چهار سایت اندازه‌گیری بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو و مینسک، بدون هیچ محدودیتی (منبع نگارنده).



شکل ۷. توزیع نرمال بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای سه سایت اندازه‌گیری بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو (منبع نگارنده).

جدول ۲. طبقه‌بندی انواع هواویزها بر اساس عمق اپتیکی هواویزها (AOD) و نمای آنگستروم (تولدانو و همکاران، ۲۰۰۷).

نام سایت	نوع هواویز	عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ نانومتر	عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۴۴۰ نانومتر	نمای آنگستروم
آل-آرنسیلو	نمک دریایی	-	$< 0.2$	$0.2 - 0$
پکن	آلودگی شهری-صنعتی	-	$0.2 - 0.35$	$> 1/0.5$
مینسک	سوختن مواد زیست‌توده	-	$> 0.35$	$> 1/4$
بانزیمبو	غبار	$> 0.11$	-	$< 1/0.5$



شکل ۸. توزیع نرمال بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای سه سایت اندازه‌گیری بانزیمبو، پکن، آل-آرنسیلو، با قید هواویزهای غالب برای سه نوع هواویز غباری، شهری-صنعتی و هواویز دریایی بر اساس جدول ۲ (منبع نگارنده).

جدول ۳. کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف از معیار پارامتر بیشینه مقدار درجه قطبش خطی در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای چهار سایت با اعمال شرایط جدول ۲ جهت یافتن توزیع هواویز غالب برای چهار نوع هواویز مختلف.

نام سایت	نوع هواویز	تعداد داده در هر دسته‌بندی	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار
آل-آرنسیلو	نمک دریایی	۳۰۹۲	۰/۱۷	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۰۸
پکن	آلودگی شهری-صنعتی	۲۳۰۸	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۱۰
مینسک	سوختن مواد زیست‌توده	۹۹	۰/۱۵	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۰۸
بانزیمبو	غبار	۸۷۹۲	۰/۰۲	۰/۳۷	۰/۱۴	۰/۰۵

با توجه به همپوشانی زیاد هواویز شهری-صنعتی و زیست-توده، تنها داده‌های سایت پکن با هواویزهای دیگر مقایسه شد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت جداسازی چهار نوع مختلف هواویز مختلف غباری، شهری-صنعتی، زیست‌توده و دریایی با استفاده از پارامتر درجه قطبش خطی استخراج شده از داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در چهار سایت بانزیمبو، پکن، مینسک و آل آرنسیلو مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا از سه پارامتر عمق‌اپتیکی هواویزها که معیاری از میزان هواویز جوی است، نمای آنگستروم که نماینده ابعاد ذرات جوی است و نیز درجه قطبش خطی که معیاری از قطبش نور پراکنده‌شده از ذرات معلق جوی است؛ برای بررسی کامل‌تر استفاده شد. نمودار پراکندگی

در نهایت برای بررسی دقیق‌تر، ابتدا داده‌های انواع مختلف هواویزهای غباری، شهری-صنعتی و دریایی هر سایت اندازه‌گیری بر اساس جدول ۲ جداسازی می‌شوند. سپس هیستوگرام توزیع نرمال بیشینه مقدار درجه قطبش خطی برای این سه نوع هواویز ترسیم می‌شود (شکل ۸). نتایج آماری کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف از معیار پارامتر بیشینه مقدار درجه قطبش خطی برای هر کدام از چهار سایت در جدول ۳ با اعمال شرایط جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید مقدار میانگین، بیشینه مقدار درجه قطبش خطی به ترتیب از بالا به پایین برای هواویزهای نمک دریایی، شهری-صنعتی و غباری برابر با ۰/۴۷، ۰/۳۵ و ۰/۱۴ است. همپوشانی بین هواویز غباری و شهری-صنعتی کمتر از همپوشانی هواویز دریایی با هواویز شهری-صنعتی است. از آنجایی که تعداد داده‌های باقی‌مانده برای سایت مینسک بسیار پایین است و

یکدیگر است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مسئولین ایستگاه‌های شیدسنج خورشیدی و از شبکه ارون‌ت بابت تهیه داده‌های ارزشمند مشخصات هواویزهای جوی کمال تشکر را دارند.

### منابع

- Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Oolman, L., Flamant, P., & Khalesifard, H. R. (2012). Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D3), 1-14.
- Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156-166.
- Bayat, A., Masoumi, A., & Khalesifard, H. R. (2011). Retrieval of atmospheric optical parameters from ground-based sun-photometer measurements for Zanjan, Iran. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5), 857-863.
- Bibi, H., Alam, K., Blaschke, T., Bibi, S., & Iqbal, M. J. (2017). Long-term (2007–2013) analysis of aerosol optical properties over four locations in the Indo-Gangetic plains: erratum. *Applied Optics*, 56(23), 6548-6548.
- Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. G., & Slusser, J. R. (1999). On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(11), 1854-1861.
- Weitkamp, C. (Ed.). (2006). Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere (Vol. 102). Springer Science & Business.
- Cheng, C., Zhengqiang, L., Donghui, L., Kaitao, L., Ying, Z., Weizhen, H., & Yisong, X. (2014, March). Ground-based Polarization Remote Sensing of Atmospheric Aerosols and the Correlation between Polarization Degree and PM<sub>2.5</sub>. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 17(1), 012039. IOP Publishing.
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T.F., Smirnov, A., Kaufman, Y.J., King, M.D., Tanré, D., & Slutsker, I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(3), 590-608.
- Dubovik, O., Sinyuk, A., Lapyonok, T., Holben, B.N., Mishchenko, M., Yang, P., Eck, T.F., Volten, H., Muñoz, O., Veihelmann, B., & Van der Zande, W.J. (2006). Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D11).
- Giles, D.M., Holben, B.N., Eck, T.F., Sinyuk, A., Smirnov, A., Slutsker, I., Dickerson, R.R., Thompson, A.M., & Schafer, J.S. (2012). An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D17), 1-16.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I.A., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., & Lavenue, F. (1998). AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, 66(1), 1-16.
- Halothore, R. N., Eck, T. F., Holben, B. N., & Markham, B. L. (1997). Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D4), 4343-4352.
- Hansen, J. E., & Travis, L. D. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space science reviews*, 16(4), 527-610.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., Grassl, H., Herman, B.M., King, M.D., & Teillet, P.M. (1997). Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16815-16830.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223.
- Khademi, F., & Bayat, A. (2021). Classification of aerosol types using AERONET version 3 data over Kuwait City. *Atmospheric Environment*, 265, 118716.
- Kokhanovsky, A. (2011). Light Scattering Reviews, Vol. 6: Light Scattering and Remote Sensing of Atmosphere and Surface. Springer Berlin Heidelberg.

- Li, Z., Goloub, P., Dubovik, O., Blarel, L., Zhang, W., Podvin, T., Sinyuk, A., Sorokin, M., Chen, H., Holben, B., & Tanré, D. (2009). Improvements for ground-based remote sensing of atmospheric aerosol properties by additional polarimetric measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(17), 1954-1961.
- Li, Z., Blarel, L., Podvin, T., Goloub, P., & Chen, L. (2010). Calibration of the degree of linear polarization measurement of polarized radiometer using solar light. *Applied Optics*, 49(8), 1249-1256.
- Li, Z., Gu, X., Wang, L., Li, D., Xie, Y., Li, K., Dubovik, O., Schuster, G., Goloub, P., Zhang, Y., & Li, L. (2013). Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(20), 10171-10183.
- Li, Z., Li, K., Li, L., Xu, H., Xie, Y., Ma, Y., Li, D., Goloub, P., Yuan, Y., & Zheng, X. (2018). Calibration of the degree of linear polarization measurements of the polarized Sun-sky radiometer based on the POLBOX system. *Applied Optics*, 57(5), 1011-1018.
- Masoumi, A., Khaledifard, H. R., Bayat, A., & Moradhaseli, R. (2013). Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran. *Atmospheric research*, 120, 343-355.
- Mishchenko, M. I., Yatskiv, Y. S., Rosenbush, V. K., & Videen, G. (Eds.). (2011). Polarimetric detection, characterization and remote sensing. Springer.
- Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2017). *Introduction to optics*. Cambridge University Press.
- Rollin, E. M. (2000). An introduction to the use of Sun-photometry for the atmospheric correction of airborne sensor data. In Annual Meeting of the Users of the NERC Airborne Remote Sensing Facility (NERC ARSF), Keyworth, Nottingham, UK.
- Shin, S. K., Tesche, M., Kim, K., Kezoudi, M., Tatarov, B., Müller, D., & Noh, Y. (2018). On the spectral depolarisation and lidar ratio of mineral dust provided in the AERONET version 3 inversion product. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(17), 12735-12746.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., & Miller, H. (2007). IPCC fourth assessment report (AR4). Climate change, 374.
- Toledano, C., Cachorro, V. E., Berjon, A., De Frutos, A. M., Sorribas, M., De la Morena, B. A., & Goloub, P. (2007). Aerosol optical depth and Ångström exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 133(624), 795-807.
- Zdunkowski, W., Trautmann, T., & Bott, A. (2007). *Radiation in the atmosphere: a course in theoretical meteorology*. Cambridge University Press.