

Investigation of the Optical Properties of Atmospheric Aerosol Particles Using Handheld Sun-Photometer Data (CALITOO): A Case Study of Yazd City

Dehghan Bahabadi, M.¹  | Joghtaei, M.¹  | Bayat, A.² 

1. Department of Atomic and Molecular, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran.

2. Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Corresponding Author E-mail: mjoghataei@yazd.ac.ir

(Received: 17 Nov 2024, Revised: 22 Dec 2024, Accepted: 29 April 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

This study examines the optical and physical properties of aerosols in Yazd, Iran, under three distinct atmospheric conditions, clear, dusty, and urban-industrial pollution, using data from the CALITOO handheld sun photometer and MODIS satellite observations. The main metrics analyzed were Aerosol Optical Depth (AOD) and the Ångström Exponent (AE). Aerosol optical depth (AOD) is a measure of the amount of particles present in the vertical column of the Earth's atmosphere. Ångström exponent (AE) is a qualitative measure of the dimensions of the dominant aerosols. The research focused on February 15 (clear day), March 25 (dusty day), and November 23, 2021 (urban-industrial pollution day), with data collected at wavelengths of 465, 540, and 619 nm.

On the clear day of February 15, AOD values were low, ranging between 0.03 and 0.05, signifying minimal aerosol concentration and indicating a clean atmosphere dominated by fine particles. The corresponding AE was high at 1.60, supporting the presence of smaller particles. Visibility on this day exceeded 10 km, reflecting the low aerosol load. The concentrations of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) were recorded at 10 and 6 µg/m³, respectively, well below the permissible limits, confirming the air quality.

In contrast, March 25, a dusty day, exhibited a substantial increase in AOD, with values ranging from 0.56 to 0.57, indicating a dense presence of coarse particles, predominantly dust. The AE for this day was approximately 0.10, which aligns with the dominance of larger particles typically associated with dust events. Visibility was notably reduced to below 5 km, corresponding to the high particle concentration and significant light scattering. On this day, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were 324 and 67 µg/m³, respectively, exceeding acceptable thresholds and highlighting the severe dust pollution event, affecting air quality. MODIS satellite data for this day showed an AOD close to 0.54, aligning well with ground-based CALITOO measurements, demonstrating the strong agreement between satellite and in-situ observations.

The urban-industrial pollution day on November 23 showed moderate AOD values between 0.30 and 0.32. The AE was 1.30, indicating a mixture of fine and medium-sized particles, typical of industrial emissions. Visibility remained below 5 km, pointing to significant airborne pollutants that restricted clarity. The particulate matter concentration for PM₁₀ was recorded at 66 µg/m³, and for PM_{2.5} at 58 µg/m³. The concentration of PM₁₀ was below the permissible limit, while the concentration of PM_{2.5} exceeded the limit, aligning with the remote sensing results.

Validation through MODIS satellite observations confirmed the ground-based CALITOO data's reliability, with close AOD correlations noted on March 25. The HYSPLIT model identified the Arabian Peninsula as the dust source for March 25, highlighting regional transport's impact on local air quality. Such findings underscore the importance of combining ground-based and satellite data for comprehensive aerosol analysis, aiding in accurate assessments of air quality and supporting informed environmental management.

In summary, clear days showed low AOD and high AE values, indicating fine particles and good visibility. Dusty conditions featured high AOD and low AE, reflecting the presence of coarse particles and reduced visibility. Urban-industrial pollution days had moderate AOD and higher AE, pointing to a mix of smaller particles from human-made sources. The inclusion of particulate matter concentrations (PM₁₀ and PM_{2.5}) provided additional evidence of air quality variations, confirming severe pollution levels on dusty and industrial polluted days. The consistency between CALITOO and MODIS data, complemented by HYSPLIT modeling, demonstrated the effectiveness of integrated remote sensing approaches in understanding aerosol concentration behavior and guiding air quality management strategies.

Keywords: CALITOO, Aerosols Optical Depth (AOD), Angstrom exponent (AE), HYSPLIT, MODIS.

Cite this article: Dehghan Bahabadi, M., Joghtaei, M., & Bayat, A. (2025). Investigation of the Optical Properties of Atmospheric Aerosol Particles Using Handheld Sun-Photometer Data (CALITOO): A Case Study of Yazd City. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 393-407. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385331.1007645>

E-mail: (1) masumedeheghan54@gmail.com (2) abayat@znu.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385331.1007645>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

بررسی ویژگی‌های نوری ذرات معلق جوی با استفاده از داده‌های شیدسنج خورشیدی دستگاه کالیتو (مورد مطالعاتی شهر یزد)

معصومه دهقان بهابادی^۱ | محمد جغتایی^۱ | علی بیات^۲

۱. گروه اتمی و ملکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲. گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: mjoghataei@yazd.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۲/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم از ویژگی‌های مهم نوری و فیزیکی هواویزها هستند که اطلاعات مهمی درباره میزان و ابعاد ذرات به ما می‌دهند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های سطح ۱/۵ شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو در سه طول موج (۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر)، سه روز با وضعیت جوی متفاوت بررسی شدند: یک روز با هوای صاف (۱۵ فوریه ۲۰۲۱)، یک روز گردوغباری (۲۵ مارس ۲۰۲۱) و یک روز با آلودگی شهری-صنعتی (۲۳ نوامبر ۲۰۲۱). میانگین عمق نوری هواویزها برای این سه روز به ترتیب در طول موج قرمز ۰/۰۳، ۰/۵۶ و ۰/۳۲، در طول موج سبز ۰/۰۵، ۰/۵۷ و ۰/۳۰ و در طول موج آبی ۰/۰۵، ۰/۵۷ و ۰/۳۲ ثبت شد. میانگین نمای آنگستروم برای ۱۵ فوریه ۱/۶۰ (ذرات غالب جو از نوع بسیار ریزدانه)، برای ۲۵ مارس ۰/۱۰ (درشت‌دانه) و برای ۲۳ نوامبر ۱/۳۰ (ریزدانه) تعیین شد که با دید افقی ایستگاه هواشناسی تطابق خوبی داشت. داده‌های سنجنده مودیس ماهواره اکوا نشان داد که مقدار عمق نوری هواویزها در روزهای ۱۵ فوریه، ۲۵ مارس و ۲۳ نوامبر به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۵۴ و ۰/۳۰ بوده که همخوانی بالایی با داده‌های شیدسنج کالیتو داشت. همچنین، مقدار نمای آنگستروم در ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر بالاتر از ۱ و در ۲۵ مارس نزدیک به صفر بود که تأییدکننده حضور ذرات ریزدانه در دو روز نخست و ذرات درشت‌دانه در روز گردوغباری است. علاوه بر این، نتایج مدل مسیریابی پسر HYSPLIT برای جو یزد در روز گردوغباری ۲۵ مارس ۲۰۲۱ نشان داد که گردوغبار از شبه‌جزیره عربستان به منطقه یزد منتقل شده است.

واژه‌های کلیدی: کالیتو، عمق نوری هواویزها، نمای آنگستروم، مدل HYSPLIT، مودیس.

۱. مقدمه

گردوغبار در دسته ذرات درشت‌دانه (با قطر بیشتر از ۱ میکرومتر) قرار می‌گیرند. امروزه با افزایش جمعیت شهری و رشد صنعت، میزان آلاینده‌هایی که از فعالیت‌های انسانی وارد جو زمین می‌شود به شدت افزایش یافته است. افزایش آلاینده‌ها در جو اثرات مخربی بر سلامتی انسان‌ها دارد. مطالعات نشان می‌دهند که رابطه معناداری بین افزایش آلاینده‌های شهری و شیوع بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی، حساسیتی، سرطان و بیماری‌های روانی و افسردگی وجود دارد (پوشل، ۲۰۰۵، بل و همکاران، ۲۰۰۸، شیشکویچ و همکاران، ۲۰۰۹). از طرفی

ذرات جامد و مایع معلق در هوا، هواویز نامیده می‌شوند (جیکوب، ۱۹۹۹). هواویزهای موجود در جو زمین بر اساس اندازه، ترکیبات، منبع و نحوه شکل‌گیری به دسته‌های گوناگونی تقسیم‌بندی می‌شوند. در یکی از این دسته‌بندی‌ها، هواویزها را بر اساس نوع غالب‌شان در جو یک منطقه به چهار نوع هواویزهای غبار، نمک دریایی، هواویزهای شهری-صنعتی و هواویزهای حاصل از سوختن مواد زیست‌توده در نواحی جنگلی و مراتع دسته‌بندی می‌کنند (دوبویک، ۲۰۰۲). هواویزهای شهری-صنعتی، در محدوده ذرات ریز (با قطر بین ۰/۰۱ تا ۱ میکرومتر) و

استناد: دهقان بهابادی، معصومه؛ جغتایی، محمد و بیات، علی (۱۴۰۴). بررسی ویژگی‌های نوری ذرات معلق جوی با استفاده از داده‌های شیدسنج خورشیدی دستگاه کالیتو (مورد مطالعاتی شهر یزد). مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱ (۲)، ۳۹۳-۴۰۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385331.1007645>

رایانامه: (۱) masumedeheghan54@gmail.com (۲) abayat@znu.ac.ir

آلاینده‌های جوی می‌توانند بر روی صنعت گردشگری، اثرات منفی بگذارند و با کاهش دید افقی، امنیت پرواز در فرودگاه را تحت تأثیر قرار دهند (بیات، ۱۳۹۲، آنامان و لوی، ۲۰۰۰). همچنین هواویزها می‌توانند از طریق جذب یا پراکندگی تابش الکترومغناطیسی، بودجه تابشی زمین را تغییر دهند. در نتیجه، بررسی جامع ویژگی‌های نوری و تابشی هواویزها در مقیاس منطقه‌ای و محلی بسیار ضروری است (کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۳).

به کمک فناوری سنجش از دور با شناخت ویژگی‌های نوری و فیزیکی هواویزها می‌توان اطلاعات مفیدی از چشمه، نوع و اثرات هواویزها به دست آورد. یکی از دستگاه‌های سنجش از دور زمین پایه، شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو (Calitoo) (شکل ۱-ب) است. این دستگاه به دلیل سادگی، هزینه کم و دقت قابل قبول، به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر برای اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها AOD (Aerosols Optical Depth) معرفی شده است و برای مناطقی که دسترسی به ایستگاه‌های پیشرفته شبکه ایرونت AERONET (Aerosol Robotic Network) محدود است، می‌تواند بسیار مفید باشد. در ادامه به تعدادی از پژوهش‌هایی که با استفاده از این دستگاه انجام شده است، اشاره می‌شود. اسکالیوتی و جورج (۲۰۲۰) از نوامبر ۲۰۱۸ تا نوامبر ۲۰۱۹ با شیدسنج خورشیدی کالیتو در شمال غربی منطقه بزرگ بوئنوس آیرس، به‌ویژه در محوطه دانشگاه ملی ژنرال سارمینتو در لوس پولورین ۲۳۲ اندازه‌گیری انجام داده و هواویزهای منطقه را به هواویزهای پاک، متوسط و آلوده قاره‌ای، قطب جنوب و دریایی دسته‌بندی کردند. لئون و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه ساحلی خلیج گینه (جنوب غربی آفریقا) در پنج مکان مختلف در ساحل عاج و بنین با استفاده از شیدسنج خورشیدی کالیتو و مشاهدات ماهواره‌ای مودیس (MODIS Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) از دسامبر ۲۰۱۴ تا آوریل ۲۰۱۷ گزارش کردند که گردوغبار شهرهای شمال خلیج گینه (یعنی ابیجان و کوتونو) را از دسامبر تا می

تحت تأثیر قرار می‌دهد و بزرگ‌ترین AOD را در ماه‌های دسامبر و فوریه به ارمغان می‌آورد. آنها ضریب همبستگی بین داده‌های سطح ۳ مودیس و کالیتو را ۰/۸۹ به دست آوردند. بیات و عصارعنایتی (۲۰۲۳) برای یک دوره شش ماهه در شهر زنجان با استفاده از داده‌های دستگاه کالیتو و اندازه‌گیری AOT در طول موج‌های ۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر نشان دادند که مقدار میانگین AOT در این طول موج‌ها به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۱ و ۰/۲۰ است. همچنین مقدار میانگین نمای آنگستروم (Angstrom AE) Exponent استخراج شده از AOT در ۴۶۵ و ۶۱۹ نانومتر برابر ۰/۸۰ است. علاوه بر این بیشتر ذرات در جو زنجان را به عنوان ذرات صنعتی شهری (تقریباً ۶۴٪) و ذرات گرد و غبار و مخلوط (تقریباً ۳۶٪) طبقه‌بندی کردند. گارسیا و همکاران (۲۰۲۵) داده‌های عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم را طی یک دوره پنج ساله (مارس ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۲۳) با استفاده از دستگاه کالیتو در سه طول موج (۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر) بر روی یک کشتی تحقیقاتی بررسی کردند. داده‌برداری در مناطق جزایر قناری، سواحل شمال آفریقا، مدیترانه، پرتغال، کانابریا و خلیج بیسکای انجام شده است. نتایج ایشان نشان‌دهنده دقت بالا و ثبات کالیبراسیون دستگاه است. مقایسه با داده‌های مرجع ایرونت توافق خوبی نشان داد. همچنین در پژوهش آنها داده‌های کالیتو در مقایسه با مودیس عموماً مقادیر کمتری را نمایش داد.

در این پژوهش که در منطقه یزد انجام شده است، سه روز با شرایط جوی مختلف شامل هوای صاف (۱۵ فوریه ۲۰۲۱)، گرد و غبار (۲۵ مارس ۲۰۲۱) و آلودگی شهری-صنعتی (۲۳ نوامبر ۲۰۲۱) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این بررسی، با بهره‌گیری از دستگاه شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو، عمق نوری هواویزها در سه طول موج ۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر اندازه‌گیری شده و نمای آنگستروم محاسبه شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی نتایج، از داده‌های ماهواره‌ای مودیس-آکوا و اطلاعات هواشناسی و محیط‌زیست استفاده شده است.

۲. داده و روش

۱-۲. داده

داده برداری مطالعه حاضر طی یک دوره یک ساله، از فوریه ۲۰۲۱ تا فوریه ۲۰۲۲، با استفاده از دستگاه شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو در شهر یزد انجام شده است. در این مدت، داده های اندازه گیری شده با داده های سنجنده های مودیس-ترا و مودیس-آکوا، با تفکیک های مکانی ۱، ۱۰ و ۱۰۰ کیلومتر مقایسه شدند. ضریب همبستگی بین داده های دستگاه کالیتو و سنجنده مودیس در تفکیک های مکانی مختلف بین ۰/۶۰ تا ۰/۶۹ متغیر است. با افزایش تفکیک مکانی از ۱۰۰ به ۱ کیلومتر، مقدار ضریب همبستگی افزایش یافته است. داده های سنجنده مودیس-آکوا نسبت به مودیس-ترا همبستگی بیشتری با داده های دستگاه کالیتو نشان دادند. با این حال، نتایج یک ساله همچنان در حال ارزیابی و اعتبارسنجی نهایی هستند و از ارائه کامل آن ها تا تکمیل فرآیند اعتبارسنجی اجتناب شده است. امید است این نتایج در آینده نزدیک و پس از ارزیابی کامل ارائه شوند. بر این اساس، هدف این پژوهش، تمرکز بر تحلیل داده های مربوط به سه روز با شرایط جوی متفاوت (صاف، گردوغباری و آلودگی شهری-صنعتی) و بررسی ارتباط جنبه های هواشناسی با ویژگی های نوری هواویزها است.

در این پژوهش، مجموعه ای از داده های سنجنده زمینی دستگاه کالیتو (عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم)، تصاویر سنجنده مودیس-آکوا (عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم)، همچنین داده های ایستگاه های هواشناسی (دید افقی و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون) و داده های سازمان حفاظت محیط زیست (غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون) مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۱ منبع، نوع و زمان داده های به کاررفته را نمایش می دهد.

۲-۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شهر یزد است که مرکز

استان یزد بوده و در میانه فلات مرکزی ایران واقع شده است (شکل ۱). این شهر دارای اقلیم خشک (زمستان های سرد و خشک و تابستان های گرم و خشک و طولانی مدت) بوده و بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت این شهر ۶۵۶۴۷۴ نفر است. شهر یزد در عرض جغرافیایی ۳۱/۸۹۷ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴/۳۶۸ درجه شرقی و در ارتفاع ۱۲۳۷ متری از سطح دریا واقع شده است. دمای میانگین سالانه آن ۲۰/۵ درجه سلسیوس، میانگین بارش سالانه آن ۵۶/۳ میلیمتر و میانگین رطوبت نسبی سالانه آن ۲۹ درصد است (سازمان هواشناسی استان یزد). به دلیل بارش سالیانه کم و شرایط اقلیمی خشک این منطقه همواره در معرض ذرات معلق محلی و بیابانی قرار دارد، به گونه ای که در برخی روزهای سال، غلظت گردوغبار تا چندین برابر حد استاندارد افزایش می یابد (جبالی و همکاران، ۱۳۹۶).

۲-۳. شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو

سنجنده زمین-پایه شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو یک شیدسنج غیرفعال است که با حمایت دو شبکه شیدسنج خورشیدی ایرونت و فوتون (PHOTON) توسط شرکت تنیوم (Tenum) در کشور فرانسه ساخته شده است. این شیدسنج، عمق نوری هواویزها را در سه طول موج ۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر محاسبه کرده و نمای آنگستروم را با استفاده از عمق نوری دو طول موج ۴۶۵ و ۶۱۹ نانومتر استخراج می کند (راهنمای کاربری کالیتو، ۲۰۲۰). علت انتخاب این طول موج ها (۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر) برای به حداقل رساندن جذب مولکولی و تمرکز بیشتر بر پراکندگی و جذب ناشی از ذرات معلق جوی بوده است. طول موج های انتخاب شده در این مطالعه دارای کمترین جذب توسط مولکول های موجود در جو، به ویژه بخار آب و ازن هستند. این ویژگی باعث می شود که داده ها بیشتر به پراکندگی و جذب توسط ذرات معلق (هواویزها) حساس باشند، نه جذب گازهای جوی. به این ترتیب، مقدار AOD به دست آمده بیشتر منعکس کننده مقدار و خواص ذرات معلق است و اثرات گازهای جوی کمتر وارد محاسبه

(شکل ۲-پ). علاوه بر موازی‌ساز که نشان می‌دهد دستگاه با خورشید موازی است، یک صفحه‌نمایش و تنها یک دکمه قرمز برای ثبت داده‌ها روی دستگاه وجود دارد. دستگاه ابتدا با نگه‌داشتن دکمه قرمز روشن می‌شود و پس از یافتن سیگنال GPS که ۱ الی ۳ دقیقه طول می‌کشد، دستگاه آماده اندازه‌گیری است. چسب محافظ از روزنه‌ها برداشته شده و دستگاه رو به خورشید قرار می‌گیرد تا لکه نوری در مرکز دایره‌های متحد‌المرکز بیفتد. پس از تنظیم موقعیت، با فشار دکمه قرمز و انتظار کوتاه، شدت تابش ثبت می‌شود و دستگاه اطلاعاتی مانند عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم را نشان می‌دهد. داده‌ها ذخیره شده و فرایند اندازه‌گیری حداقل سه بار تکرار می‌شود. در پایان، برای جلوگیری از آلودگی، روزنه‌ها پوشانده و دستگاه خاموش می‌شود.

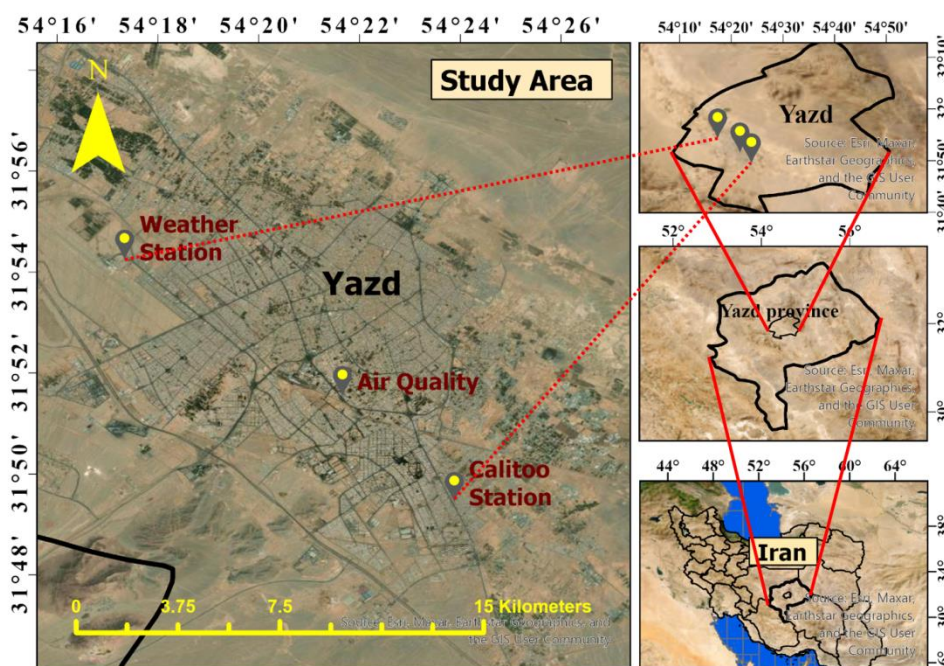
می‌شود (بیات و عصارعنایتی، ۲۰۲۳). بر اساس راهنمای کاربری دستگاه کالیتو (۲۰۲۰)، میزان خطای مطلق شیدسنج خورشیدی کالیتو در اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها برابر ۰/۰۲ است.

۲-۳-۱. نحوه استفاده از دستگاه

در شکل ۲-الف نمای ظاهری دستگاه دیده می‌شود. در قسمت جلوی دستگاه دو روزنه وجود دارد (شکل ۲-ب). یکی از روزنه‌ها برای حسگرهایی است که شدت تابش خورشید را در طول موج‌های ذکر شده ثبت کند و دیگری برای هم‌راستا کردن دستگاه با تابش خورشید به کار می‌رود. با استفاده از دایره‌های هم‌مرکز آن، اگر نقطه روشن دقیقاً در مرکز دایره هم‌مرکز قرار گیرد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که دستگاه با خورشید موازی است

جدول ۱. منبع، نوع و زمان داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر.

منبع داده	نوع داده	زمان داده
دستگاه کالیتو	AOD, AE	۱۵ فوریه، ۲۵ مارس و ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱
سنجنده مودیس	AOD, AE	میانگین روزانه
سازمان هواشناسی	دید افقی، PM _{2.5}	داده‌های سه ساعته، داده‌های ساعته
سازمان حفاظت محیط‌زیست	PM ₁₀	داده‌های ساعته



شکل ۱. نمایی از موقعیت مکانی شهرستان یزد، محل داده‌برداری با شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو، سازمان هواشناسی و سازمان حفاظت محیط‌زیست استان یزد.

۲-۳-۲. زمان و تعداد اندازه‌گیری در هر روز

در روزهای ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱ در ساعت‌های ۴، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ به وقت گرینویچ، داده‌برداری انجام گرفته و در روزگردوغباری ۲۵ مارس ۲۰۲۱ به دلیل اهمیت بررسی روزهای گردوغباری، اندازه‌گیری هر نیم‌ساعت به نیم‌ساعت انجام شده است. در هر نوبت داده‌برداری، فرایند اندازه‌گیری، سه یا چهار بار تکرار شده است. سپس با اتصال دستگاه شیدسنج به لپ‌تاپ، داده‌ها از سطح ۱/۰ به سطح ۱/۵ برده شده و در یک فایل تکست یا متنی استخراج و برای تحلیل و بررسی به نرم‌افزار اکسل وارد شده‌اند. داده‌های سطح ۱/۰ داده‌های خام هستند و داده‌های سطح ۱/۵ پس از حذف ابر و نگه‌داشتن کمترین عمق‌نوری (بیشترین شدت تابش جو در هر نوبت اندازه‌گیری) به دست می‌آیند.

۲-۳-۲-۱. نحوه محاسبه عمق نوری هواویزها

شدت نوری که به صورت مستقیم از جو، عبور می‌کند، به دلیل جذب و پراکندگی توسط مولکول‌ها و هواویزها تضعیف می‌شود. میزان خاموشی شدت نور تکفام ورودی خورشید در عبور از جو با چگالی متوسط $\rho(s)$ و ضریب خاموشی $k_{ext}(s, \lambda)$ از قانون بیر-لامبرت به صورت زیر بیان می‌شود (پیکسوتو و همکاران، ۱۹۹۲):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\int_0^{s_{max}} k_{ext}(s, \lambda) \rho(s) ds\right) \quad (۱)$$

در رابطه بالا، $I_0(\lambda)$ و $I(\lambda)$ به ترتیب شدت نور خورشید در طول موج λ در بام جو و در سطح زمین و s_{max} فاصله بام جو تا سطح زمین در زاویهٔ سرسوی θ_{sun} است. می‌توان مختصه s در معادله (۱) را با توجه به (شکل ۳) برحسب ارتفاع قائم z و زاویه خورشید با سرسوی θ_{sun} نوشت. در این صورت به رابطه زیر می‌رسیم:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\frac{1}{\cos\theta_{sun}} \int_0^{z_{max}} k_{ext}(z, \lambda) \rho(z) dz\right) \quad (۲)$$

جمله انتگرالی در رابطه بالا عمق نوری است و با نماد τ_λ نشان داده می‌شود؛ در این صورت خواهیم داشت:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\cos\theta_{sun}}\right) \quad (۳)$$

عمق نوری یک کمیت بدون بعد و نشان‌دهنده خاموشی نور ورودی خورشید در عبور قائم از جو و معیاری از میزان هواویزها و مولکول‌های موجود در ستون قائم جو است. با توجه به رابطه (۳)، به عنوان مثال اگر خورشید عمود بتابد و عمق نوری، برابر یک فرض شود، خواهیم داشت (پیکسوتو و همکاران، ۱۹۹۲):

$$\theta_{sun} = 0, \tau_\lambda = 1 \Rightarrow \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-1} = 0.37 \quad (۴)$$

در این صورت شدت تابش اولیه در طول موج λ ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. رابطه (۳) را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m(\tau_a + \tau_g + \tau_{NO_2} + \tau_w + \tau_r + \tau_{O_3})) \quad (۵)$$

در رابطه بالا τ_a عمق نوری هواویزها (AOD)، τ_g عمق نوری مربوط به گازهای CO_2 و O_2 ، τ_{NO_2} عمق نوری دی‌اکسید نیتروژن، τ_w عمق نوری بخار آب، τ_r عمق نوری ریلی، τ_{O_3} عمق نوری ازن و $m = \frac{1}{\cos\theta_{sun}}$ توده هوا (Air mass) است (بوداین و همکاران، ۱۹۹۹). اگر از اثر بخار آب، دی‌اکسید نیتروژن، اکسیژن و دی‌اکسید کربن به دلیل نداشتن جذب و پراکندگی در ناحیه طول موجی مورد بررسی در شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو (ابزار مورد استفاده در این پژوهش (شکل ۱-ب)) چشم‌پوشی کنیم، رابطه (۵) به صورت ساده زیر در می‌آید:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m(\tau_a + \tau_r + \tau_{O_3})) \quad (۶)$$

سنجنده‌هایی مثل ابزار پایش ازن OMI (Ozone Monitoring Instrument) و طیف‌سنج نقشه‌برداری کل ازن TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) مقادیر ازن را گزارش می‌کنند؛ عمق نوری مولکولی هم با فشار هوا در محل اندازه‌گیری (P) نسبت به فشار هوا در سطح دریاهای آزاد (P_0) متناسب است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_r = a_R \frac{P}{P_0} \quad (۷)$$

a_R برای سه طول موج ۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر به ترتیب برابر ۰/۱۹۴۹۰، ۰/۱۰۶۳۷ و ۰/۰۶۱۱۹ است. دستگاه با

۲۰۰۰). عمق نوری هواویزها، برای جو کاملاً تمیز ۰/۰۱ است و با افزایش غلظت هواویزها در جو، افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که برای یک روز گردوغباری و خیلی تیره، می‌تواند بیشتر از یک باشد.

استفاده از سنسور فشار هوا، عمق نوری مولکولی را برای هر اندازه‌گیری محاسبه می‌کند. با کم کردن عمق نوری مولکولی و ازن از عمق نوری کل برای هر اندازه‌گیری می‌توان عمق نوری هواویزها را استخراج کرد (رولین،



(ب)

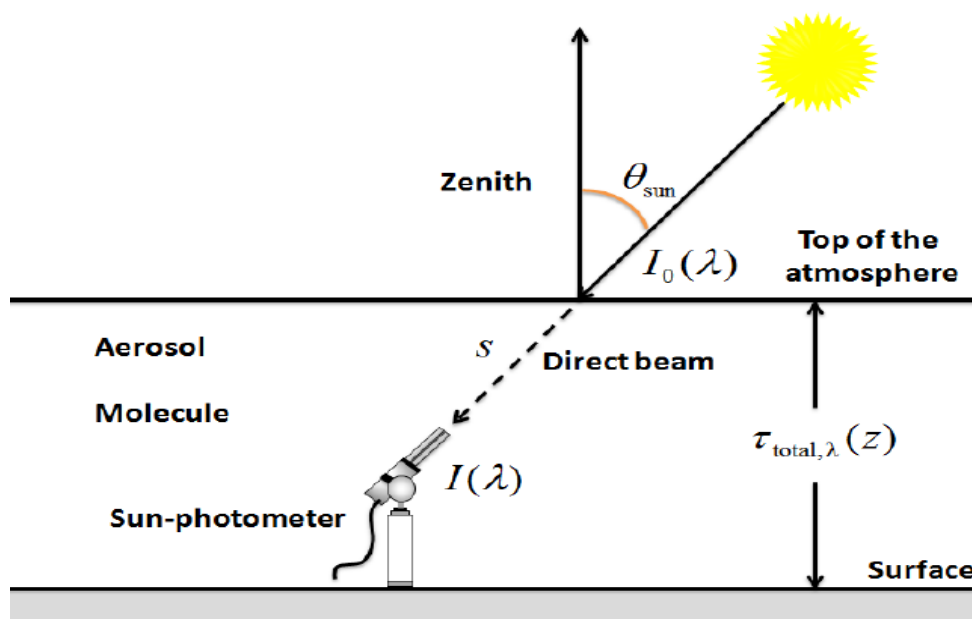


(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) نمای ظاهری شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو، (ب) ۱-روزنه موازی‌ساز، ۲-روزنه ثبت شدت خورشید، (پ) دایره‌های متحدالمرکز جهت موازی‌سازی دستگاه با خورشید (راهنمای کاربری کالیتو، ۲۰۲۰).



شکل ۳. شمایی از اندازه‌گیری شدت نور خورشید، عبوری از جو زمین به وسیله شیدسنج خورشیدی زمین-پایه (بیات، ۱۳۹۲).

$$\log\left(\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}}\right) = -\alpha \cdot \log\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \quad (10)$$

$$\log\left(\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}}\right) = \alpha \cdot \log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \quad (11)$$

$$\alpha = \log\left(\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}}\right) / \log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \quad (12)$$

نمای آنگستروم معیاری کیفی از ابعاد هواویزهای غالب جو است. در جو مولکولی که فقط پراکندگی ریلی حاکم است، نمای آنگستروم برابر با چهار است (کاسکاوتیس و همکاران، ۲۰۱۳). در جو تمیز با ذرات ریزدانه، نمای آنگستروم مقادیری بالاتر از ۱ را دارد و برای جو، با ذرات درشت‌دانه، مقدار نمای آنگستروم، بین ۰ و ۱ بوده و برای ذرات درشت‌دانه‌تر، این مقدار به صفر نزدیک می‌شود. مقدار نمای آنگستروم مثبت به معنای بزرگ‌تر بودن عمق نوری هواویزها در طول‌موج‌های کوتاه‌تر است که به‌طور معمول برای ذرات جوی، رفتار طیفی عمق نوری هواویزها این‌گونه است؛ اما زمانی که ذرات، بسیار درشت‌دانه شوند (پدیده گردوغبار) و با افزایش طول‌موج، عمق نوری هواویزها افزایش یابد، نمای آنگستروم، بسیار نزدیک صفر می‌شود و حتی می‌تواند مقدار منفی نیز داشته باشد (دهقان بهابادی و همکاران، ۱۴۰۰).

الگوریتم کلی تعیین عمق نوری هواویزها از داده‌های شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو در (شکل ۴) دیده می‌شود.

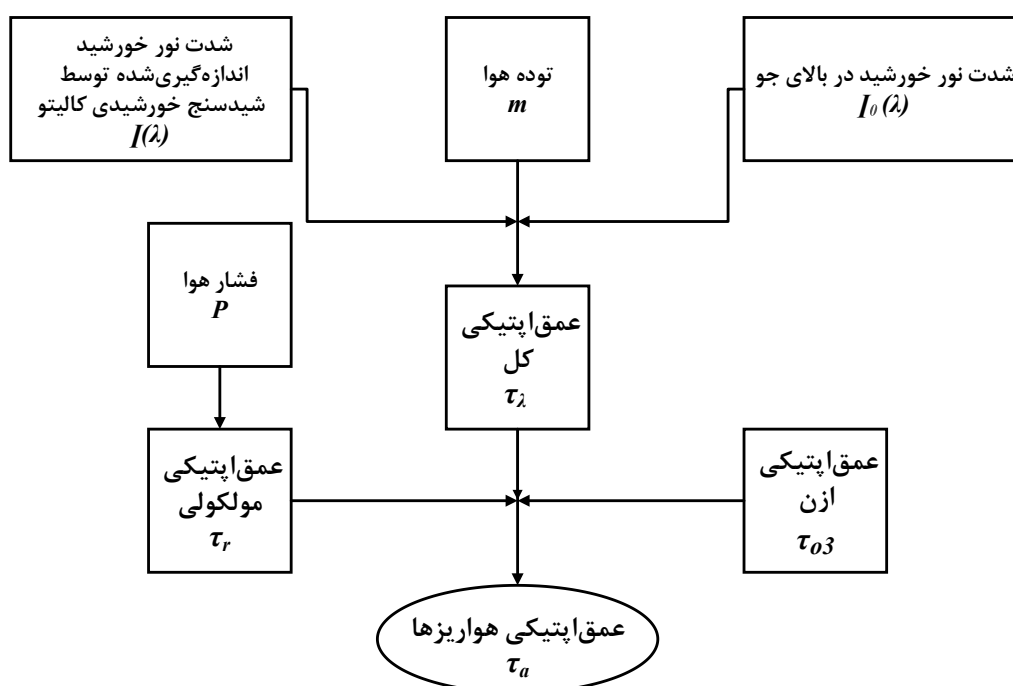
۲-۲-۳-۲. نمای آنگستروم

آنگستروم دانشمند سوئدی در سال ۱۹۲۹ میلادی فرمول تجربی زیر را پیشنهاد کرد که در آن عمق نوری هواویزها را برحسب طول‌موج نور اندازه‌گیری بیان می‌کرد (آنگستروم، ۱۹۲۹):

$$\tau_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (8)$$

در رابطه بالا، β ضریب ثابتی به‌نام ضریب تاریکی (Turbidity coefficient)، نشان‌دهنده عمق نوری هواویزها در طول‌موج یک میکرومتر (آنگستروم، ۱۹۶۴) و α نمای آنگستروم (AE) است. با اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها در دو طول‌موج برای یک لحظه و گرفتن لگاریتم طبیعی از رابطه (۸) و اندکی محاسبات ریاضی (روابط ۸ تا ۱۱)، نهایتاً می‌توان نمای آنگستروم را استخراج کرد (کاسکاوتیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-\alpha} \quad (9)$$



شکل ۴. نمای شماتیک از سازوکار الگوریتم استخراج عمق نوری هواویزها از داده‌های شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو.

۲-۴. تصاویر سنجنده مودیس

مودیس، طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط، یک ابزار کلیدی بر روی دو ماهواره ترا و آکوا است. ترا-مودیس و آکوا-مودیس هر ۱ تا ۲ روز یک‌بار کل سطح زمین را تصویربرداری می‌کنند (وب‌سایت MODIS، وب‌سایت Visible Earth). پهنای نوارهای تصویربرداری این سنجنده، ۲۳۳۰ کیلومتر است (داده‌های جمع‌آوری شده توسط MODIS در ۳۶ باند طیفی قرار دارد و گستره طیفی آن در محدوده ۰/۴-۱۴/۴ میکرومتر با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر است. این داده‌ها دانش و اطلاعات ما را نسبت به فرایندهایی که بر سطح زمین، اقیانوس‌ها و سطوح پایینی جو به وقوع می‌پیوندند، بهبود بخشیده است (وب‌سایت Visible Earth، لی و همکاران، ۲۰۰۴). ماهواره ترا هر روز در ساعت ۱۰:۳۰ به وقت محلی و آکوا در ساعت ۱۳:۳۰ به وقت محلی از یک مکان عبور می‌کنند. مشخصات فنی و کانال‌های سنجنده مودیس برای دو ماهواره ترا و آکوا در وب‌سایت ladsweb قابل مشاهده است.

در پژوهش حاضر از داده‌های عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم سنجنده آکوا-مودیس الگوریتم (Deep Blue, Land-only) استفاده شده است.

۲-۵. مدل HYSPLIT و مسیریابی گردوغبار

مدل هواشناسی HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) یک سیستم کامل برای محاسبه مسیرهای ساده بسته‌های هوا و همچنین شبیه‌سازی‌های پیچیده حمل و نقل، پراکندگی و رسوب است. مدل HYSPLIT همچنان یکی از پرکاربردترین مدل‌های انتقال و پراکندگی در تحقیقات علوم جوی است. یک کاربرد رایج آن تجزیه و تحلیل مسیر برگشتی برای تعیین منشأ توده‌های هوا و ایجاد روابط منبع-گیرنده است. روش محاسبه مدل، ترکیبی است بین رویکرد لاگرانژی، با استفاده از یک چارچوب مرجع متحرک برای محاسبات فرارفت و انتشار، به‌طوری که مسیرها یا

بسته‌های هوایی از محل اولیه خود حرکت می‌کنند، و روش اویلری، که از یک شبکه سه بعدی ثابت استفاده می‌کند. مدل HYSPLIT در وب‌سایت مرکز تحقیقات NOAA (سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده) در دسترس است. از مدل هواشناسی HYSPLIT برای رهگیری مسیر انتقال گردوغبار استفاده شده است.

۳. نتایج

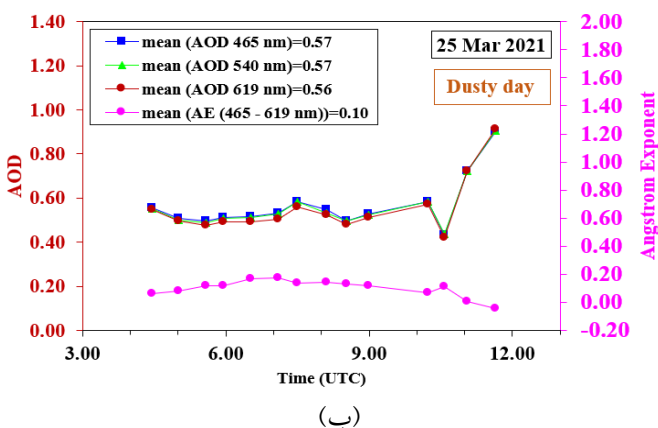
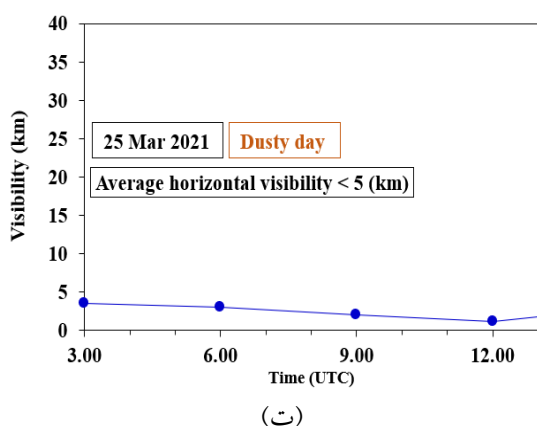
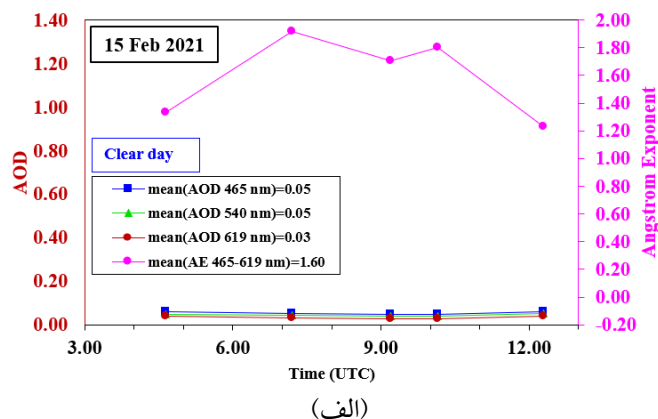
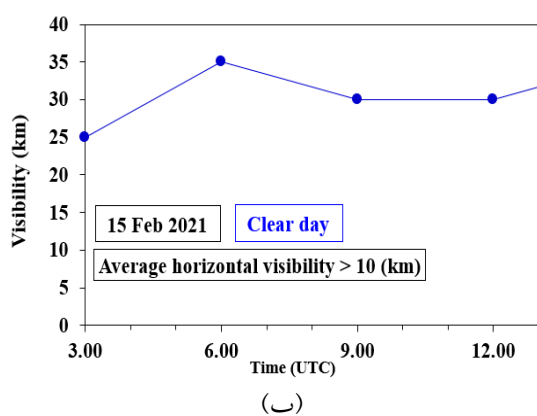
در روز ۱۵ فوریه ۲۰۲۱، آسمان شهر یزد صاف و آبی بود. نمودار سری زمانی تغییرات عمق نوری هواویزها در شکل ۵-الف نشان داده شده است. میانگین عمق نوری هواویزها برای این روز در طول موج قرمز ۰/۰۳ و در طول موج سبز و آبی ۰/۰۵ ثبت شده است. همچنین میانگین نمای آنگستروم استخراج شده از طول‌موج‌های ۶۱۹-۶۶۵ nm در این روز برابر با ۱/۶۰ است که نشان می‌دهد ذرات غالب در این روز از نوع بسیار ریزدانه بوده و در دسته هوای صاف قرار دارند (شکل ۵-الف). میانگین دید افقی در این روز بیشتر از ۱۰ کیلومتر بوده است (شکل ۵-ب). نتایج به‌دست آمده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره آکوا (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد که مقدار عمق نوری هواویزها در منطقه مورد مطالعه در این روز برابر با ۰/۱۳ است. این مقدار نسبت به نتایج سنجنده کالیتو بیشتر است، اما پایین بودن مقدار AOD با شرایط جوی صاف مطابقت دارد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود، مقدار نمای آنگستروم بالاتر از یک بوده که تأییدکننده حضور ذرات ریزدانه در جو است.

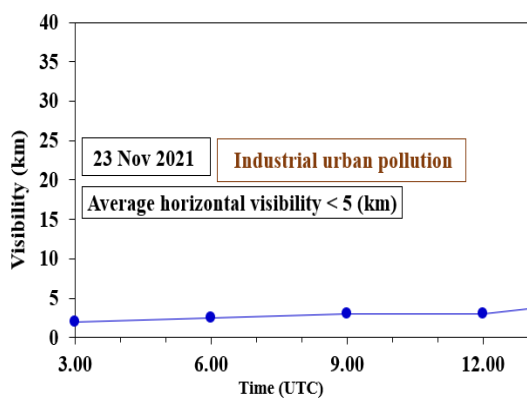
در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱، میانگین عمق نوری هواویزها در طول موج قرمز ۰/۵۶ و در طول موج‌های سبز و آبی ۰/۵۷ ثبت شده است که نشان‌دهنده استقرار شرایط جوی گردوغباری است. میانگین نمای آنگستروم در این روز ۰/۱۰ تعیین شده است که بیانگر غلبه ذرات درشت‌دانه در جو است (شکل ۵-ب). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند تغییرات عمق نوری هواویزها در طول موج‌های مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر است که

این نیز تأیید کننده حضور هواویزهای درشت دانه در جو می باشد. علاوه بر این، میانگین دید افقی در این روز کمتر از ۵ کیلومتر ثبت شده است (شکل ۵-ت). همان طور که در شکل ۶-پ مشاهده می شود، داده های عمق نوری سنجنده مودیس ماهواره آکوا در منطقه مورد مطالعه نزدیک به ۰/۵۴ است که تطابق خوبی با داده های سنجنده کالیو دارد. همچنین، با توجه به شکل ۶-ت، مقدار نزدیک به صفر نمای آنگستروم این ماهواره نشان می دهد که ذرات غالب جو در این روز از نوع درشت دانه هستند.

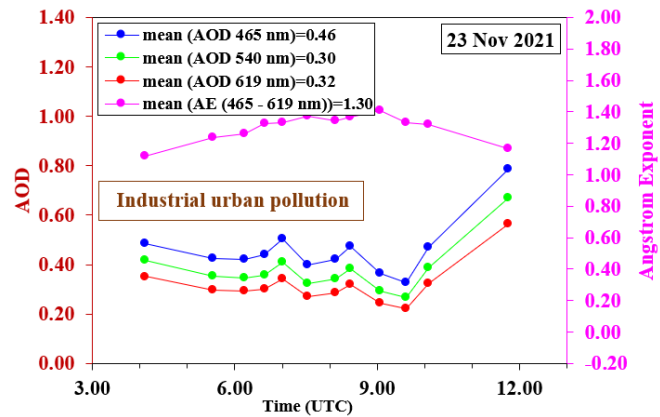
در روز ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱ میانگین عمق نوری هواویزها در طول موج قرمز ۰/۳۲، در طول موج سبز ۰/۳۰ و در طول موج آبی ۰/۴۶ ثبت شده است. همچنین میانگین نمای

آنگستروم در این روز برابر با ۱/۳۰ است که نشان می دهد ذرات غالب در این روز از نوع ریزدانه و در دسته آلودگی شهری-صنعتی قرار دارند (شکل ۵-ث). لازم به ذکر است روند عمق نوری طول موج های مختلف کاملاً از هم جدا شده اند که نشان از ذرات ریزدانه متراکم است که با روند نمای آنگستروم نیز سازگاری دارد. میانگین دید افقی در این روز کمتر از ۵ کیلومتر است (شکل ۵-ج). بر اساس داده های عمق نوری سنجنده مودیس ماهواره آکوا (شکل ۶-ث)، میزان عمق نوری هواویزها در این روز حدود ۰/۳۰ اندازه گیری شده است که تطابق خوبی با داده های سنجنده کالیو دارد. همچنین، شکل ۶-ج نشان می دهد که مقدار نمای آنگستروم بالاتر از ۱ است، که این مقدار بیانگر غلبه ذرات ریزدانه در جو یزد در این روز است.



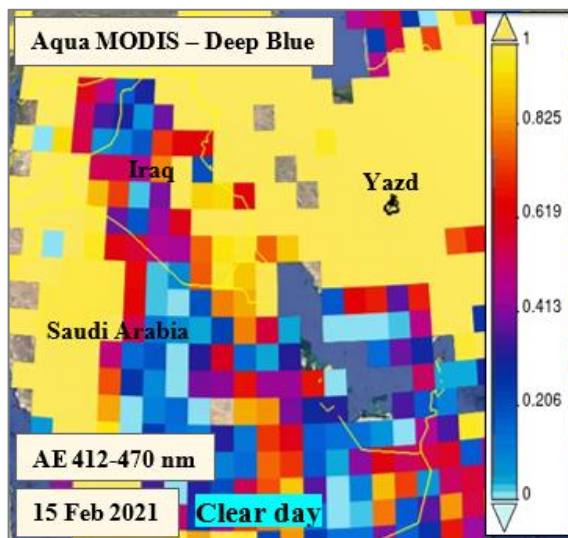


(ج)

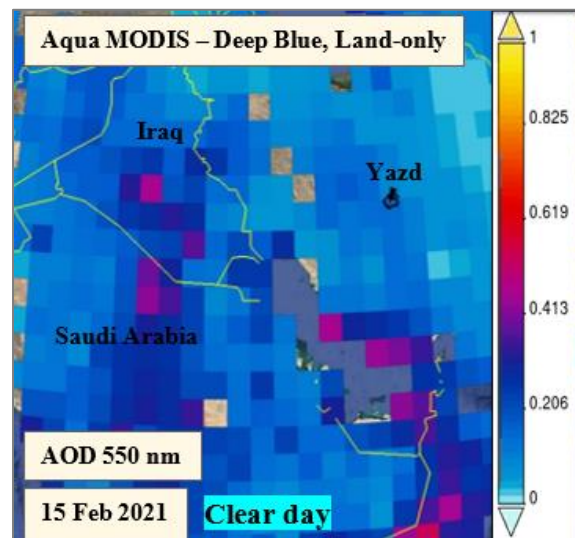


(ث)

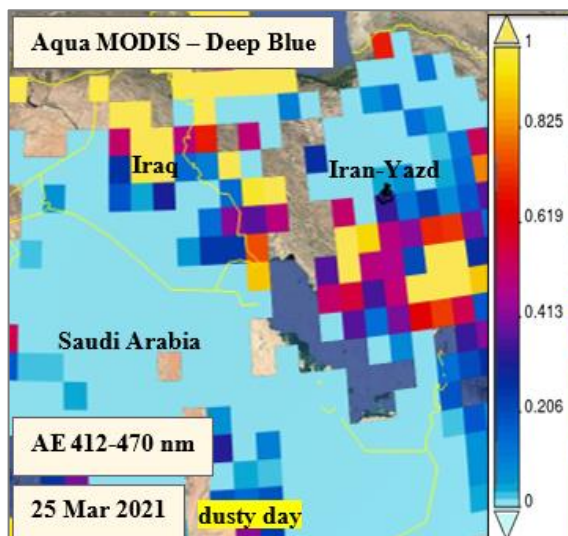
شکل ۵. (الف، پ و ث) نمودار سری زمانی تغییرات عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم، اندازه‌گیری شده توسط شیدسنگ خورشیدی دستی کالیتر در شرایط مختلف جوی در یزد، (ب، ت و ج) نمودار دید افقی در شرایط مختلف جوی در یزد (داده‌های هواشناسی استان یزد).



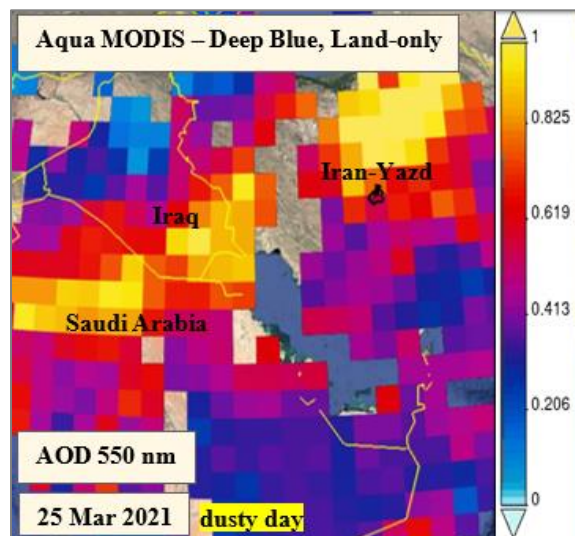
(ب)



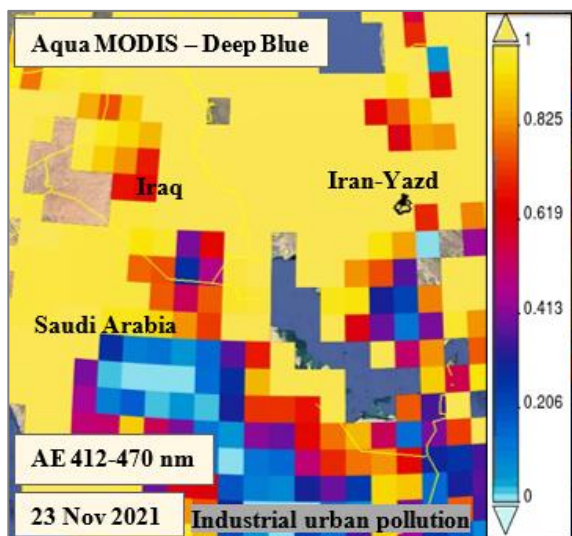
(الف)



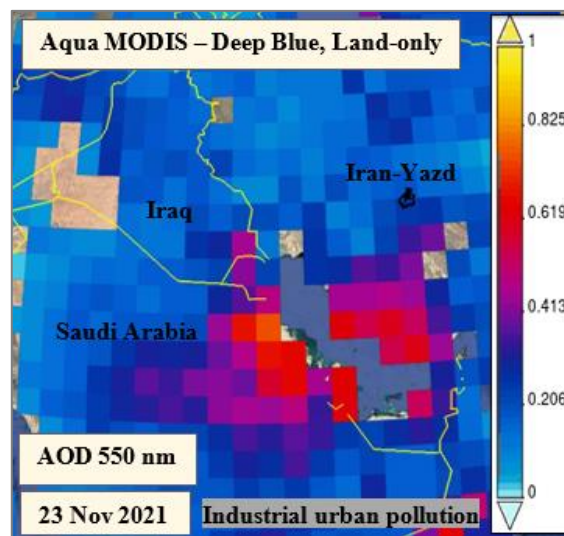
(ت)



(پ)



(ج)

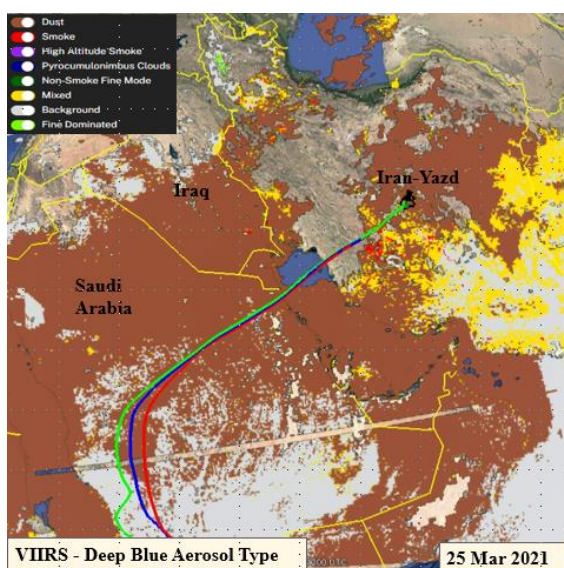


(ث)

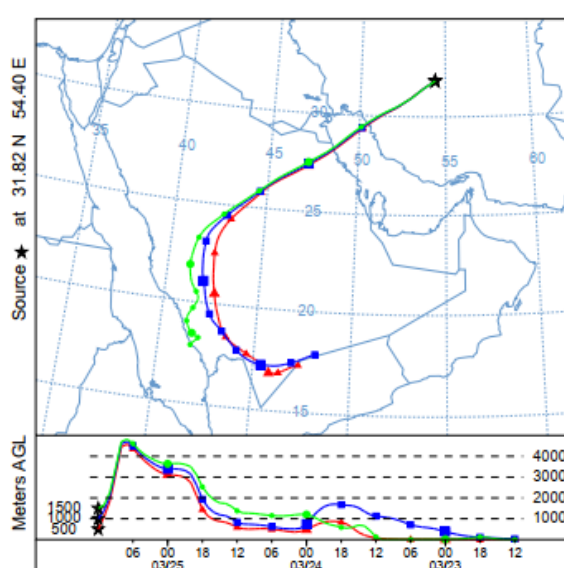
شکل ۶. (الف، پ و ث) عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های ماهواره آکوا-مودیس، (ب، ت و ج) نمای آنگستروم با استفاده از داده‌های ماهواره آکوا-مودیس (وبسایت جیووانی)، مرز شهر یزد و محل داده‌برداری با کالیتر با رنگ سیاه روی تصویر با استفاده از گوگل ارث مشخص شده است.

این روز از شبه‌جزیره عربستان به منطقه یزد منتقل شده است. (شکل ۷-ب) توزیع انواع مختلف ذرات معلق جوی را در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ نشان می‌دهد. در این تصویر، گردوغبار با رنگ قهوه‌ای مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر انتقال بسته‌های هوایی از فراز عربستان عبور می‌کند، که در این روز به شدت غباری بوده است.

نتایج مدل مسیریابی پسر و HYSPLIT برای جو یزد در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ (شکل ۷-الف) نشان می‌دهد که بسته‌های هوا طی ۷۲ ساعت گذشته از چه مناطقی و در چه ارتفاعی عبور کرده‌اند تا در نهایت، در ساعت ۱۶:۳۰ (۱۲ UTC) روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱، در سه ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر بالاتر از سطح زمین، به جو یزد برسند. داده‌های مدل HYSPLIT همچنین نشان می‌دهد که گردوغبار در



(ب)



(الف)

شکل ۷. (الف) نتایج مدل مسیریابی پسر و HYSPLIT برای جو یزد، روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ (READY-(noaa.gov))، (ب) توزیع انواع هواویز برای روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱، رنگ قهوه‌ای، نشان‌دهنده گردوغبار است (وبسایت EarthData ناسا).

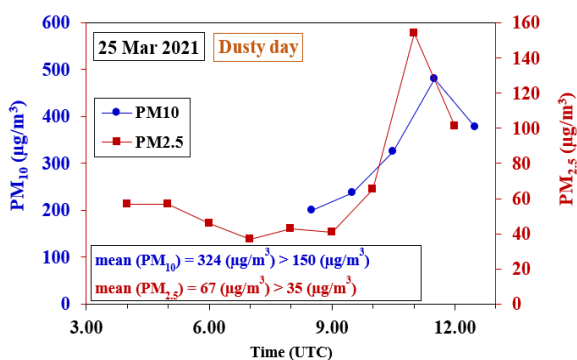
بیش از ۱۰ کیلومتر بود، مقدار عمق نوری هواویزها در هر سه طول موج بسیار کم و بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ ثبت شد، در حالی که نمای آنگستروم با میانگین ۱/۶۰ مقدار بالایی را نشان داد. در روز گردوغباری (۲۵ مارس ۲۰۲۱) که دید افقی به کمتر از ۵ کیلومتر کاهش یافت، عمق نوری هواویزها در هر سه طول موج مقدار بالایی بین ۰/۵۶ تا ۰/۵۷ داشت و نمای آنگستروم با میانگین ۰/۱۰ به مقدار نزدیک به صفر رسید. در این شرایط، روند تغییرات عمق نوری در طول موج‌های مختلف تفاوت چندانی نداشت. در مقابل، در روز آلودگی صنعتی (۲۳ نوامبر ۲۰۲۱)، تغییرات عمق نوری در طول موج‌های مختلف، تفکیک قابل ملاحظه‌ای را نشان داد. بر این اساس، این پژوهش یک سنجه نوری کمی برای تفکیک هواویزهای طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد.

داده‌های سنجنده مودیس ماهواره آکوا نشان داد که مقدار عمق نوری هواویزها در روزهای ۱۵ فوریه، ۲۵ مارس و ۲۳ نوامبر به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۵۴ و ۰/۳۰ بوده که همخوانی بالایی با داده‌های شیدسنج کالیته داشت. همچنین، مقدار نمای آنگستروم در ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر بالاتر از ۱ و در ۲۵ مارس نزدیک به صفر بود که تأییدکننده حضور ذرات ریزدانه در دو روز نخست و ذرات درشت‌دانه در روز گردوغباری است. علاوه بر این، نتایج مدل HYSPLIT نشان داد که گردوغبار ثبت شده در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ از شبه جزیره عربستان به منطقه یزد منتقل شده است.

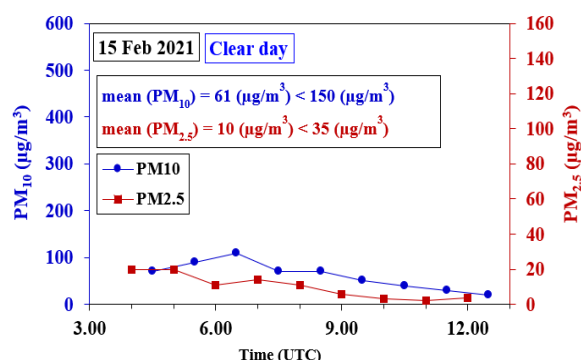
بررسی نمودارهای تغییرات روزانه ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) برای این سه روز نشان می‌دهد که در روز ۱۵ فوریه ۲۰۲۱ میانگین PM_{10} و $PM_{2.5}$ به ترتیب ۶۱ و ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب بوده که کمتر از مقدار مجاز در شبانه روز است و نشان دهنده یک روز صاف با هوای سالم می‌باشد (شکل ۸-الف). در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ میانگین PM_{10} و $PM_{2.5}$ به ترتیب ۳۲۴ و ۶۷ میکروگرم بر مترمکعب بوده که بیشتر از مقدار مجاز در شبانه روز است و نشان دهنده حضور ذرات درشت‌دانه و ریزدانه بیش از حد مجاز در جو و شرایط هوای ناسالم می‌باشد (شکل ۸-ب). در روز ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱ میانگین PM_{10} و $PM_{2.5}$ به ترتیب ۵۸ و ۶۶ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. در این روز ذرات درشت‌دانه (PM_{10}) کمتر از مقدار مجاز در شبانه روز است ولی ذرات ریزدانه ($PM_{2.5}$) بیشتر از حد مجاز بوده و نشان دهنده آلودگی ناشی از منابع شهری-صنعتی است (شکل ۷-پ).

۴. بحث و نتیجه گیری

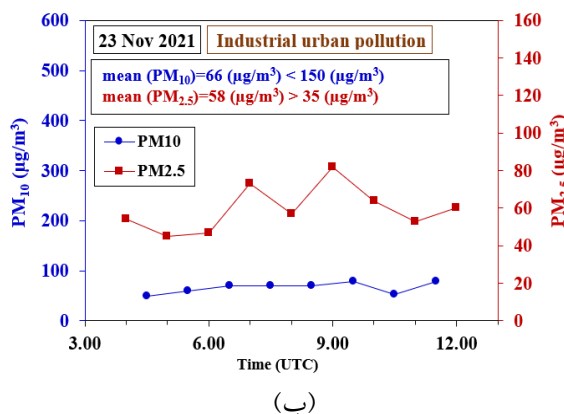
در این پژوهش، مشخصات نوری و فیزیکی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های شیدسنج دستی کالیته و داده‌های ماهواره‌ای بررسی شد. برای سه روز با شرایط جوی متفاوت، شامل هوای صاف، گردوغبار معمولی و گردوغبار صنعتی، نتایج مربوط به عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم در طول موج‌های آبی، سبز و قرمز مقایسه شد. در روز هوای صاف (۱۵ فوریه ۲۰۲۱) که دید افقی



(ب)



(الف)



شکل ۸. نمودار تغییرات روزانه PM₁₀ و PM_{2.5}، در شرایط مختلف جوی در منطقه یزد (داده‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست و سازمان هواشناسی استان یزد).

مراجع

منشایابی غبار با مدل هواشناسی HYSPLIT در شهر یزد. بیستمین کنفرانس آموزش فیزیک ایران و دهمین کنفرانس فیزیک و آزمایشگاه، ایلام. جبال، ع.؛ اختصاصی، م.؛ میرزاده، م. و زارع چاهوکی، ا. (۱۳۹۶). پایش و ارزیابی میزان غلظت هواویزهای حاکم بر شهر یزد، چهارمین همایش ملی فرسایش بادی و طوفانهای گردو غبار، یزد، ایران.

بیات، ع. (۱۳۹۲). دسته‌بندی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی، پایان‌نامه دکتری، تحصیلات تکمیلی زنجان. دهقان بهابادی، م.؛ بیات، ع. و جغتایی، م. (۱۴۰۰). بررسی روز غباری ۲۷ مارس ۲۰۲۱ با شیدسنج دستی کالیتو و

Anaman, K. A., & Looi, C. N. (2000). Economic impact of haze-related air pollution on the tourism industry in Brunei Darussalam. *Economic Analysis and Policy*, 30, 133-144.

Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156-166.

Ångström, A. (1964). The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16(1), 64-75.

Bayat, A., & Assarenayati, A. (2023). How to measure the amount of Aerosol Optical Thickness in the atmosphere in a simple way: a Calitoo Handheld Sun-Photometer Measurement. *Atmospheric Environment*, 295, 119570.

Bell, M. L., Ebisu, K., Peng, R. D., Walker, J., Samet, J. M., Zeger, S. L., & Dominici, F. (2008). Seasonal and regional short-term effects of fine particles on hospital admissions in 202 US counties, 1999–2005. *American journal of epidemiology*, 168(11), 1301-1310.

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.

Dubovik, O., Holben, B. N., 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.

García, R. D., Barreto, Á., Rey, C., Fraile-Nuez, E., González-Vega, A., León-Luis, S. F., ... & Bouchar, F. (2025). Aerosol retrievals derived from a low-cost Calitoo sun-photometer taken on board a research vessel. *Atmospheric Environment*, 341, 120888.

http://www.calitoo.fr/uploads/documents/en/user_manual_2020_en.pdf.

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis>.

<https://modis.gsfc.nasa.gov/about>.

<https://modis.gsfc.nasa.gov/data>.

<https://visibleearth.nasa.gov/source/74/aqua-modis>.

<https://worldview.earthdata.nasa.gov>.

<https://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT>.

Jacob, D. J. (1999). *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton University Press.

Kaskaoutis, D. G., Kambezidis, H. D., Hatzianastassiou, N., Kosmopoulos, P. G., & Badarinath, K. V. S. (2007). Aerosol climatology: dependence of the Ångström exponent on wavelength over four AERONET sites. *Atmospheric chemistry and physics discussions*, 7(3), 7347-7397.

Kaskaoutis, D. G., Kosmopoulos, P. G., Tripathi, S. N., Misra, A., Sharma, M., & Singh, R. P. (2013). Aerosol properties and radiative

- forcing over Kanpur during severe aerosol loading conditions. *Atmospheric Environment*, 79, 7-19.
- Léon, J. F., Akpo, A. B., Bedou, M., Djossou, J., Bodjrenou, M., Yoboué, V., & Liousse, C. (2021). PM 2.5 surface concentrations in southern West African urban areas based on sun photometer and satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1815-1834.
- Peixoto, J. P., Oort, A. H., & Lorenz, E. N. (1992). *Physics of climate* (Vol. 520). New York: American Institute of Physics.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520-7540.
- Rollin, E. M. (2000). An introduction to the use of Sun-photometry for the atmospheric correction of airborne sensor data. Activities of the NERC EPFS in support of the NERC ARSF. In *ARSF Annual Meeting, Keyworth, Nottingham, UK*. 1-22.
- Scagliotti, A. F., & Jorge, G. A. (2020). Análisis de un año de mediciones con fotómetro solar en el noroeste del conurbano bonaerense. In *Anales (Asociación Física Argentina)*, 31(2), 46-50. Asociación Física Argentina.
- Szyszkowicz, M., Rowe, B. H., & Colman, I. (2009). Air pollution and daily emergency department visits for depression. *International journal of occupational medicine and environmental health*, 22(4), 355.