

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

معصومه دهقان بهابادی^۱، محمد جغتایی^{۲*} و علی بیات^۳

۱. کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران (masumedeaghan54@gmail.com)
۲. استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران (* نگارنده رابط: mjoghataei@yazd.ac.ir)
۳. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (abayat@znu.ac.ir)

چکیده:

عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم از ویژگی‌های مهم نوری و فیزیکی هواویزها هستند که اطلاعات مهمی درباره‌ی 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، ۴۴۰ 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 سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی 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 کالیتو داشت. همچنین، مقدار نمای آنگستروم در ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر بالاتر از ۱ و در ۲۵ مارس نزدیک به صفر بود که تأییدکننده‌ی 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 شبه‌جزیره‌ی عربستان به منطقه یزد منتقل شده است.

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

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

Abstract

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 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 days. The consistency between CALITOO and MODIS data, complemented by HYSPLIT modeling, demonstrated the effectiveness of integrated remote sensing approaches in understanding aerosol behavior and guiding air quality management strategies.

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

مقدمه

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 زیست توده در نواحی جنگلی و مراتع دسته‌بندی می‌کنند (دوبویک، ۲۰۰۲). هواویزهای شهری-صنعتی، در محدوده ذرات ریز (با قطر بین ۰/۱ تا ۱ میکرومتر) و 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، شیشک‌وویچ و همکاران، ۲۰۰۹). از طرفی 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 سنسجشن‌ازدور با شناخت ویژگی‌های نوری و فیزیکی هواویزها می‌توان اطلاعات مفیدی از چشمه، نوع و اثرات هواویزها به دست آورد. یکی از دستگاه‌های سنسجشن‌ازدور زمین‌پایه، 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 موثر برای اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها ((Aerosols Optical Depth (AOD معرفی شده است و برای مناطقی که دسترسی به ایستگاه‌های پیشرفته شبکه ایرونت (Aerosol Robotic Network (AERONET) 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 لوس‌پولورین 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 ((MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) از دسامبر ۲۰۱۴ تا آوریل ۲۰۱۷ گزارش کردند که گردوغبار شهرهای شمال خلیج گینه (یعنی ایبجان 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 شش‌ماهه 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 طول‌موج‌ها به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۱ و ۰/۲۰ است. همچنین مقدار میانگین نمای آنگستروم ((Angstrom Exponent (AE) 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 پنج‌ساله (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، کانتابریا 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 اندازه گیری شده و نمای آنگستروم محاسبه شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی نتایج، از داده های ماهواره ای مودیس - آکوا و اطلاعات هواشناسی و محیط زیست استفاده شده است.

داده و روش

۲-۱- داده

داده برداری مطالعه ی حاضر طی یک دوره ی 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 ی 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 ی 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 ی کامل آن ها تا تکمیل فرآیند اعتبارسنجی اجتناب شده است. امید است این نتایج در آینده ی 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 ی زمینی دستگاه کالیتو (عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم)، تصاویر سنجنده ی 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.

جدول ۱. منبع، نوع و زمان داده های 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}	داده های سه ساعتی، داده های ساعتی
سازمان حفاظت محیط زیست	PM ₁₀	داده های ساعتی

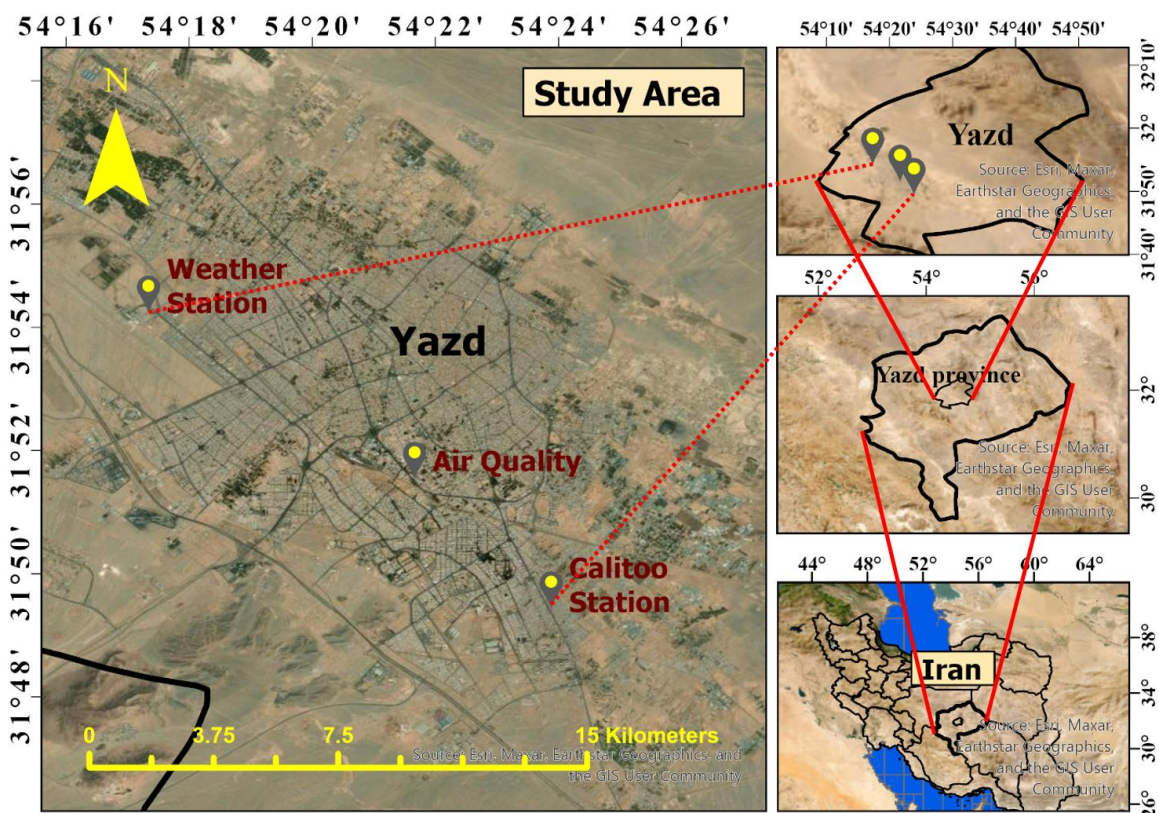
۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه ی مورد مطالعه در این پژوهش شهر یزد است که مرکز استان یزد بوده و در میانه ی 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 گونه‌ای که در برخی روزهای سال، غلظت گردوغبار تا چندین برابر حد استاندارد افزایش می‌یابد (جبال 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 می‌کند (راهنمای کاربری کالیتو، ۲۰۲۰). علت انتخاب این طول موج‌ها (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 موج‌های انتخاب شده در این مطالعه دارای کمترین جذب توسط مولکول‌های موجود در جو، به ویژه بخار آب و ازن هستند. این ویژگی باعث می‌شود که داده‌ها 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 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.



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

۲-۳-۱- نحوه استفاده از دستگاه

در شکل ۲- الف نمای ظاهری دستگاه دیده می شود. در قسمت جلوی دستگاه دو روزنه وجود دارد (شکل ۲- ب). یکی از روزنه ها برای حسگرهایی است که شدت تابش خورشید را در طول موج های ذکر شده ثبت کند و دیگری برای هم راستا کردن دستگاه با تابش خورشید به کار می رود. با استفاده از دایره های هم مرکز آن، اگر نقطه روشن دقیقاً در مرکز دایره هم مرکز قرار گیرد، می توان اطمینان حاصل کرد که دستگاه با خورشید موازی است (شکل ۲- پ). علاوه بر موازی ساز که نشان می دهد دستگاه با خورشید موازی است، یک صفحه نمایش و تنها یک دکمه قرمز برای ثبت داده ها روی دستگاه وجود دارد.

دستگاه ابتدا با نگه داشتن دکمه قرمز روشن می شود و پس از یافتن سیگنال GPS که ۱ الی ۳ دقیقه طول می کشد، دستگاه آماده اندازه گیری است. چسب محافظ از روزنه ها برداشته شده و دستگاه رو به خورشید قرار می گیرد تا لکه نورانی در مرکز دایره های متحدالمرکز بیفتد. پس از تنظیم موقعیت، با فشار دکمه قرمز و انتظار کوتاه، شدت تابش ثبت می شود و دستگاه اطلاعاتی مانند عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم را نشان می دهد. داده ها ذخیره شده و فرایند اندازه گیری حداقل سه بار تکرار می شود. در پایان، برای جلوگیری از آلودگی، روزنه ها پوشانده و دستگاه خاموش می گردد.



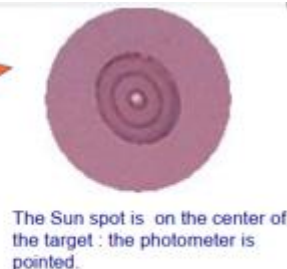
(ب)



(الف)



(پ)



شکل ۲. (الف) نمای ظاهری شیدسنج خورشیدی دستی کالیتو، (ب) ۱- روزنه موازی ساز، ۲- روزنه ثبت شدت خورشید، (پ) دایره های متحدالمرکز جهت

۲-۳-۲- زمان و تعداد اندازه گیری در هر روز

در روزهای ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱ در ساعت های ۴، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ به وقت گرینویچ، داده برداری انجام گرفته و در روز گردوغباری ۲۵ مارس ۲۰۲۱ به دلیل اهمیت بررسی روزهای گردوغباری، اندازه گیری هر نیم ساعت به نیم ساعت انجام شده است. در هر نوبت داده برداری، فرایند اندازه گیری، سه یا چهار بار تکرار شده است. سپس با اتصال دستگاه شیدسنج به لپ تاپ، داده ها از سطح ۱/۰ به سطح ۱/۵ برده شده و در یک فایل تکست یا متنی استخراج و برای تحلیل و بررسی به نرم افزار اکسل وارد شده اند. داده های سطح ۱/۰ داده های خام هستند و داده های سطح ۱/۵ پس از حذف ایر و نگه داشتن کمترین عمق نوری (بیشترین شدت تابش جو در هر نوبت اندازه گیری) به دست می آیند.

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

شدت نوری که به صورت مستقیم از جو، عبور می کند، به دلیل جذب و پراکندگی توسط مولکول ها و هواویزها تضعیف می شود. 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 می شود (پیکسوتو و همکاران، ۱۹۹۲):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\int_0^{s_{max}} k_{ext}(s, \lambda) \rho(s) ds\right) \quad (1)$$

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 زاویه سرسوی θ_{sun} است. می توان مختصه s در معادله (۱) را با توجه به (شکل ۳) بر حسب ارتفاع قائم z و زاویه خورشید با سرسوی θ_{sun} نوشت. در این صورت به رابطه زیر می رسیم:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\frac{1}{\cos\theta_{sun}} \int_0^{z_{max}} k_{ext}(z, \lambda) \rho(z) dz\right) \quad (2)$$

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

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\frac{\tau_\lambda}{\cos\theta_{sun}}\right) \quad (2)$$

عمق نوری یک کمیت بدون بعد و نشان دهنده خاموشی نور ورودی خورشید در عبور قائم از جو و معیاری از میزان هواویزها و مولکول های موجود در ستون قائم جو است. با توجه به رابطه (۲)، به عنوان مثال اگر خورشید عمود بتابد و عمق نوری،

برابر یک فرض شود، خواهیم داشت (پیکستو و همکاران، ۱۹۹۲):

$$\theta_{sun} = 0, \tau_{\lambda} = 1 \Rightarrow \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-1} = 0.37 \quad (3)$$

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

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m(\tau_a + \tau_g + \tau_{NO2} + \tau_w + \tau_r + \tau_{O3})) \quad (4)$$

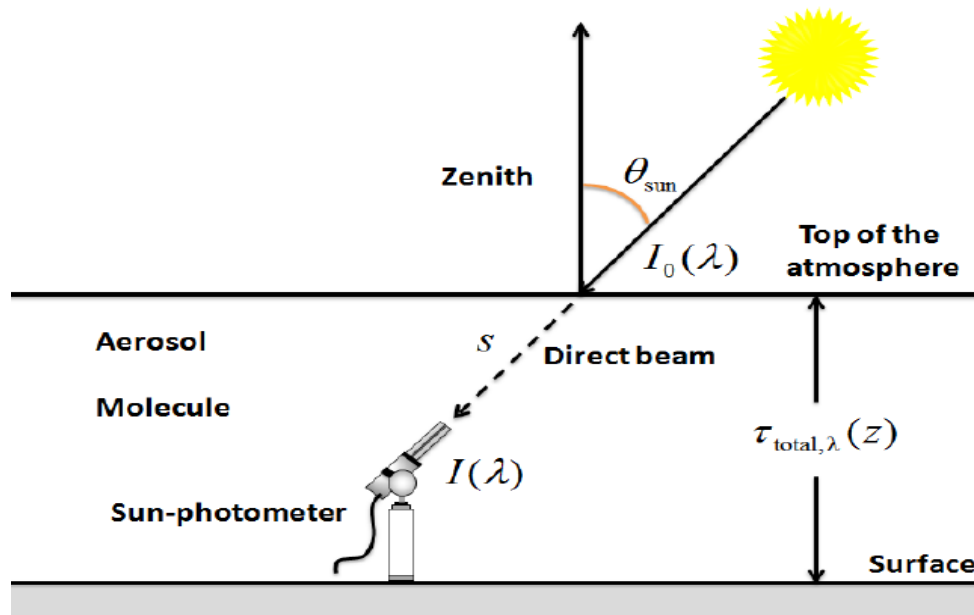
در رابطه‌ی بالا τ_a عمق نوری هواویزها (AOD)، τ_g عمق نوری مربوط به گازهای CO_2 و O_2 ، τ_{NO2} عمق نوری دی‌اکسید نیتروژن، τ_w عمق نوری بخار آب، τ_r عمق نوری ریلی، τ_{O3} عمق نوری ازن و $m = \frac{1}{\cos \theta_{sun}}$ توده‌ی هوا (Air mass) است (بوداین و همکاران، ۱۹۹۹). اگر از اثر بخار آب، دی‌اکسید نیتروژن، 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 (۴) به صورت ساده‌ی زیر در می‌آید:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m(\tau_a + \tau_r + \tau_{O3})) \quad (4)$$

سنجنده‌هایی مثل ابزار پایش ازن (Ozone Monitoring Instrument (OMI)) و طیف‌سنج نقشه‌برداری کل ازن (Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)) مقادیر ازن را گزارش می‌کنند؛ عمق نوری مولکولی هم با فشار هوا در محل اندازه‌گیری (P) نسبت به فشار هوا در سطح دریاها (P₀) متناسب است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

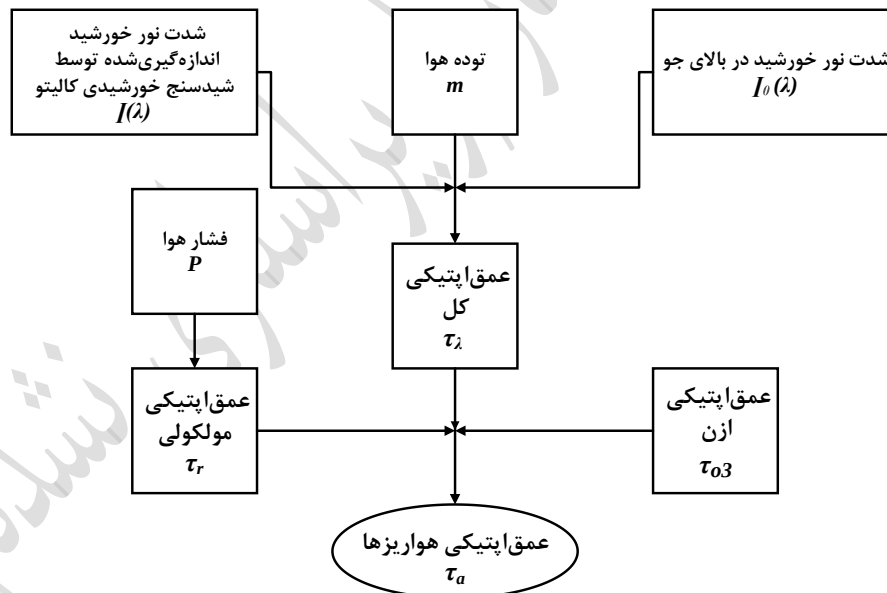
$$\tau_r = a_R \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

a_R برای سه طول موج ۴۶۵، ۵۴۰ و ۶۱۹ نانومتر به ترتیب برابر ۰/۱۹۴۹۰، ۰/۱۰۶۳۷ و ۰/۰۶۱۱۹ است. دستگاه با 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، ۲۰۰۰). عمق نوری هواویزها، برای جو کاملاً تمیز ۰/۰۱ است و با افزایش غلظت هواویزها در جو، افزایش می‌یابد؛ به طوری که برای یک روز گردوغباری و خیلی تیره، می‌تواند بیشتر از یک باشد.



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

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



شکل ۴. نمای شماتیک از سازوکار الگوریتم استخراج عمق نوری هوایزها از داده‌های شیدسنج خورشیدی دستی کالیته.

۲-۲-۳-۲- نمای آنگستروم

آنگستروم دانشمند سوئدی در سال ۱۹۲۹ میلادی فرمول تجربی زیر را پیشنهاد کرد که در آن عمق نوری هوایزها را

برحسب طول‌موج نور اندازه‌گیری بیان می‌کند (آنگستروم، ۱۹۲۹):

$$\tau_{a,\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا، β ضریب ثابتی به نام ضریب تاریکی (Turbidity coefficient)، نشان‌دهنده‌ی عمق نوری هواویزها در طول موج یک میکرومتر (آنگستروم، ۱۹۶۴) و α نمای آنگستروم (AE) است. با اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها در دو طول موج برای یک لحظه و گرفتن لگاریتم طبیعی از رابطه‌ی (۶) و اندکی محاسبات ریاضی (روابط ۸ تا ۱۱)، نهایتاً می‌توان نمای آنگستروم را استخراج کرد (کاسکاوئیس و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha} \quad (8)$$

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

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

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

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 (کاسکاوئیس 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 طول موج‌های کوتاه‌تر است که به‌طور معمول برای ذرات جوی، رفتار طیفی عمق نوری هواویزها اینگونه است؛ اما زمانی که ذرات، بسیار درشت‌دانه شوند (پدیده‌ی گردوغبار) و با افزایش طول موج، عمق نوری هواویزها افزایش یابد، نمای آنگستروم، بسیار نزدیک صفر می‌شود و حتی می‌تواند مقدار منفی نیز داشته باشد (دهقان بهابادی و همکاران، ۱۴۰۰).

۲-۴- تصاویر سنجنده مودیس

مودیس، طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط، یک ابزار کلیدی بر روی دو ماهواره‌ی 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 به‌وقوع می‌پیوندند، بهبود بخشیده است (وب‌سایت Visible Earth، لی و همکاران، ۲۰۰۴). ماهواره‌ی ترا هر روز در ساعت ۱۰:۳۰ به وقت محلی و آکوا در ساعت ۱۳:۳۰ به وقت محلی از یک مکان

عبور می کنند. مشخصات فنی و کانال های سنجنده مودیس برای دو ماهواره ترا و آکوا در وبسایت ladsweb قابل مشاهده است.

در پژوهش حاضر از داده های 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 بسته های هوا و همچنین شبیه سازی های پیچیده حمل و نقل، پراکندگی و رسوب است. مدل HYSPLIT همچنان

یکی از پرکاربردترین مدل های انتقال و پراکندگی در تحقیقات علوم جوی است. یک کاربرد رایج آن تجزیه و تحلیل مسیر برگشتی

برای تعیین منشأ توده های 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، به طوری که مسیرها یا بسته های هوایی از محل اولیه خود حرکت

می کنند، و روش اویلری، که از یک شبکه سه بعدی ثابت استفاده می کند. 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.

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 طول موج های ۶۱۹-۴۶۵ nm در این روز برابر با ۱/۶۰ است که نشان می دهد

ذرات غالب در این روز از نوع بسیار ریزدانه بوده و در دسته ی هوای صاف قرار دارند (شکل ۵-الف). میانگین دید افقی در این روز

بیشتر از ۱۰ کیلومتر بوده است (شکل ۵-ب). نتایج به دست آمده از داده های سنجنده ی مودیس ماهواره ی آکوا (شکل ۶-الف) نشان

می دهد که مقدار عمق نوری هواویزها در منطقه ی مورد مطالعه در این روز برابر با ۰/۱۳ است. این مقدار نسبت به نتایج سنجنده ی

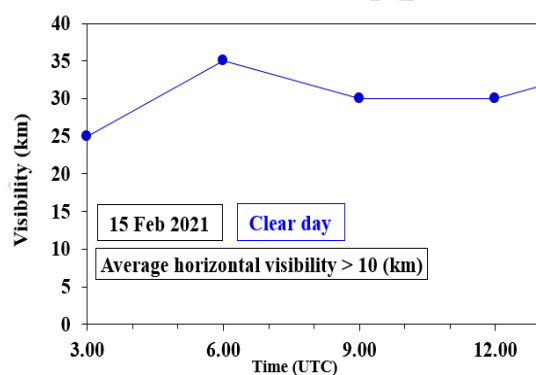
کالیفو بیشتر است، اما پایین بودن مقدار AOD با شرایط جوی صاف مطابقت دارد. علاوه بر این، همان طور که در شکل ۶-ب مشاهده

می شود، مقدار نمای آنگستروم بالاتر از یک بوده که تأیید کننده ی حضور ذرات ریزدانه در جو است.

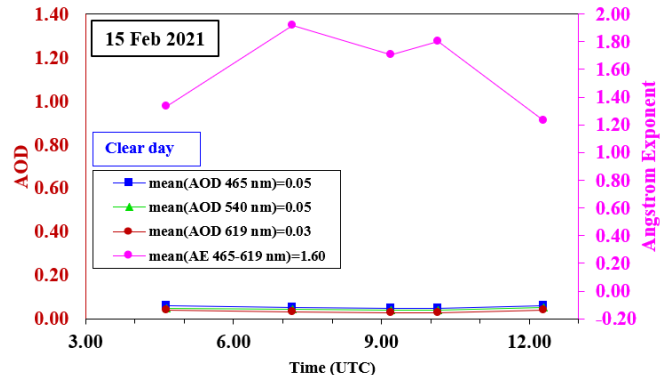
در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱، میانگین عمق نوری هواویزها در طول موج قرمز ۰/۵۶ و در طول موج های سبز و آبی ۰/۵۷ ثبت شده

است که نشان‌دهنده‌ی استقرار شرایط جوی گردوغباری است. میانگین نمای آنگستروم در این روز ۰/۱۰ تعیین شده است که بیانگر غلبه‌ی ذرات درشت‌دانه در جو است (شکل ۵-پ). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند تغییرات عمق نوری هواویزها در طول موج‌های مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر است که این نیز تأیید‌کننده‌ی حضور هواویزهای درشت‌دانه در جو می‌باشد. علاوه بر این، میانگین دید افقی در این روز کمتر از ۵ کیلومتر ثبت شده است (شکل ۵-ت). همان‌طور که در شکل ۶-پ مشاهده می‌شود، داده‌های عمق نوری سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی آکوا در منطقه‌ی مورد مطالعه نزدیک به ۰/۵۴ است که تطابق خوبی با داده‌های سنجنده‌ی کالی‌تو دارد. همچنین، با توجه به شکل ۶-ت، مقدار نزدیک به صفر نمای آنگستروم این ماهواره نشان می‌دهد که ذرات غالب جو در این روز از نوع درشت‌دانه هستند.

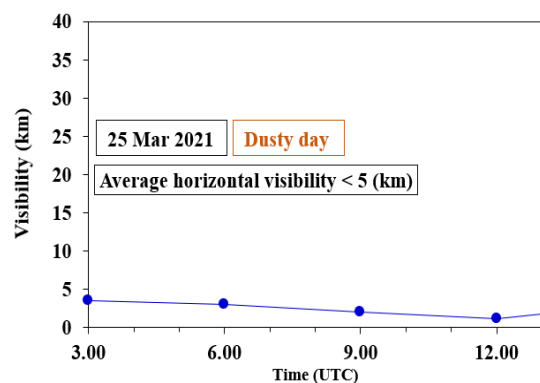
در روز ۲۳ نوامبر ۲۰۲۱ میانگین عمق نوری هواویزها در طول موج قرمز ۰/۳۲، در طول موج سبز ۰/۳۰ و در طول موج آبی ۰/۴۶ ثبت شده است. همچنین میانگین نمای آنگستروم در این روز برابر با ۱/۳۰ است که نشان می‌دهد ذرات غالب در این روز از نوع ریزدانه و در دسته آلودگی شهری-صنعتی قرار دارند (شکل ۵-ث). لازم به ذکر است روند عمق نوری طول موج‌های مختلف کاملاً از هم جدا شده‌اند 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 داده‌های عمق نوری سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی آکوا (شکل ۶-ث)، میزان عمق نوری هواویزها در این روز حدود ۰/۳۰ اندازه‌گیری شده است که تطابق خوبی با داده‌های سنجنده‌ی کالی‌تو دارد. همچنین، شکل ۶-ج نشان می‌دهد که مقدار نمای آنگستروم بالاتر از ۱ است، که این مقدار بیانگر غلبه‌ی ذرات ریزدانه در جو یزد در این روز است.



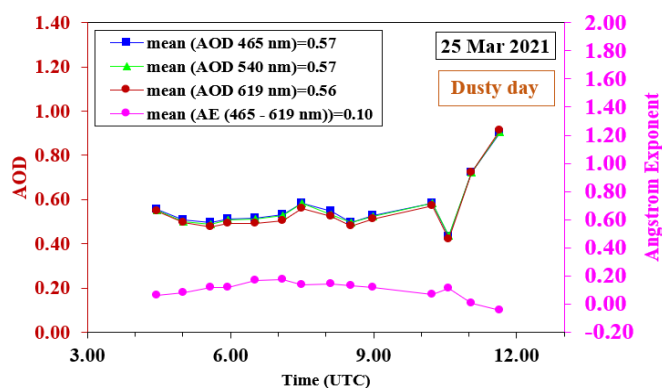
(ب)



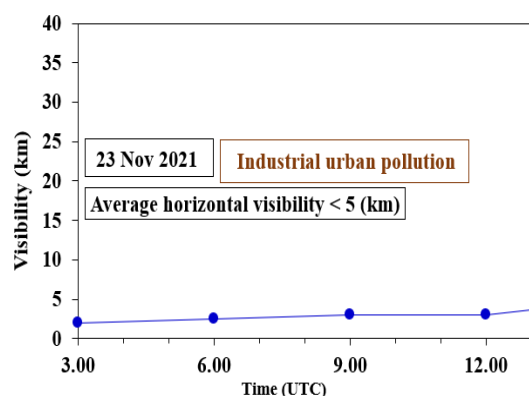
(الف)



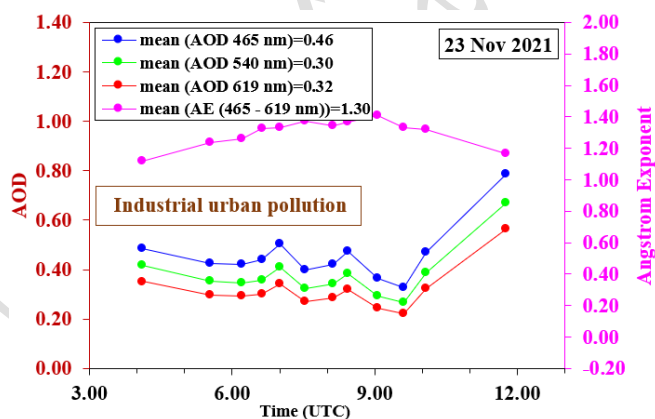
(ت)



(پ)

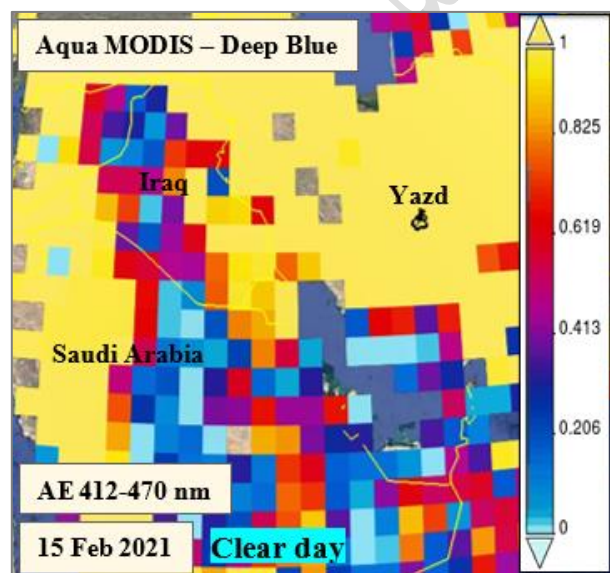


(ج)

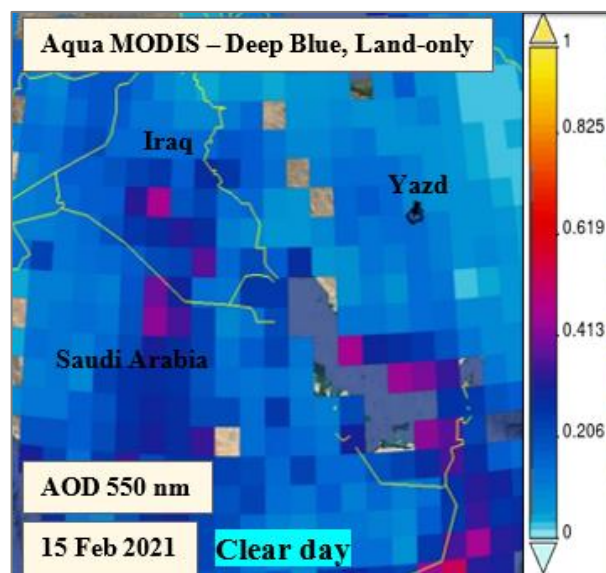


(ث)

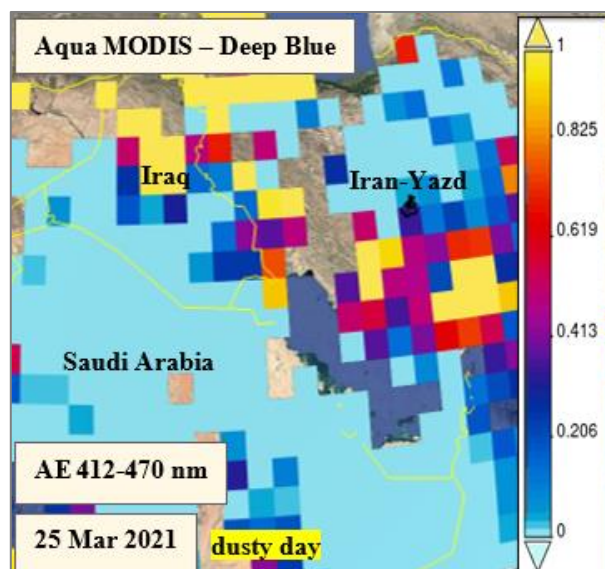
شکل ۵. (الف، پ و ث) نمودار سری زمانی تغییرات عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم، اندازه گیری شده توسط شیدسنج خورشیدی دستی کالیته در شرایط مختلف جوی در یزد، (ب، ت و ج) نمودار دید افقی در شرایط مختلف جوی در یزد (داده های هواشناسی استان یزد).



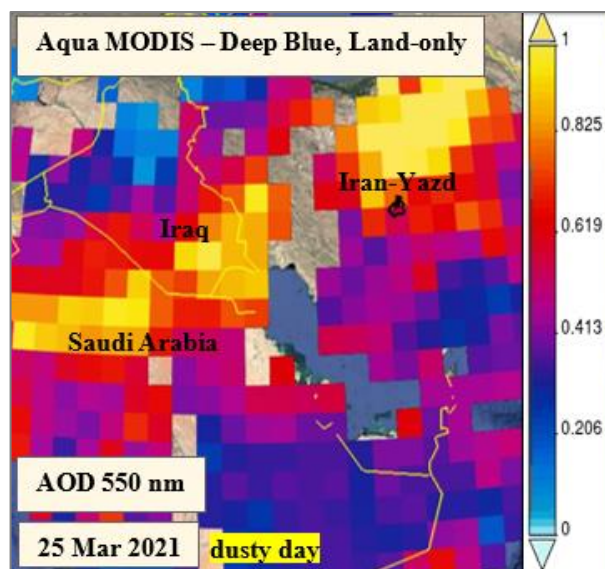
(ب)



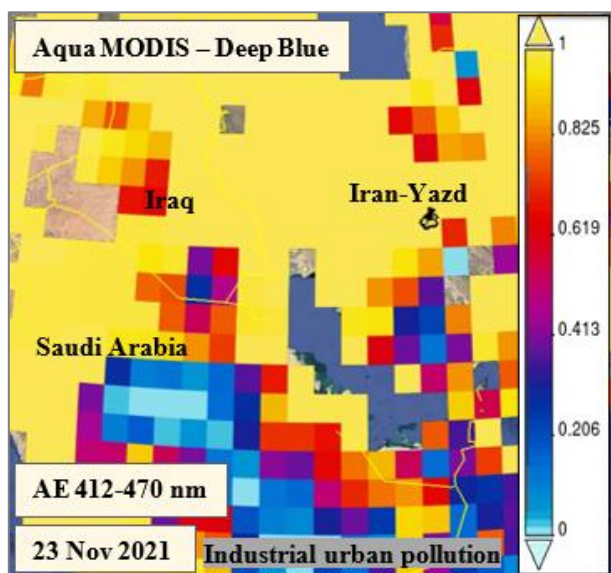
(الف)



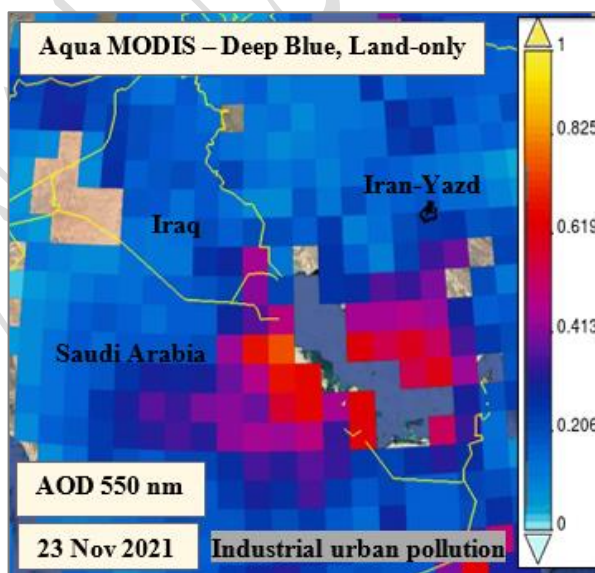
(ت)



(پ)

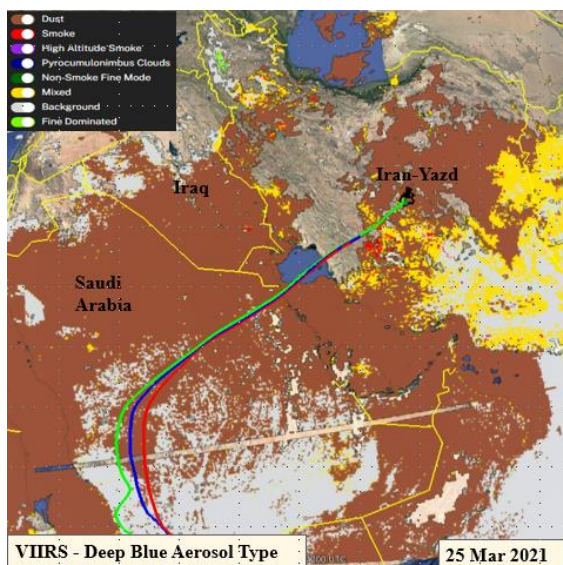


(ج)

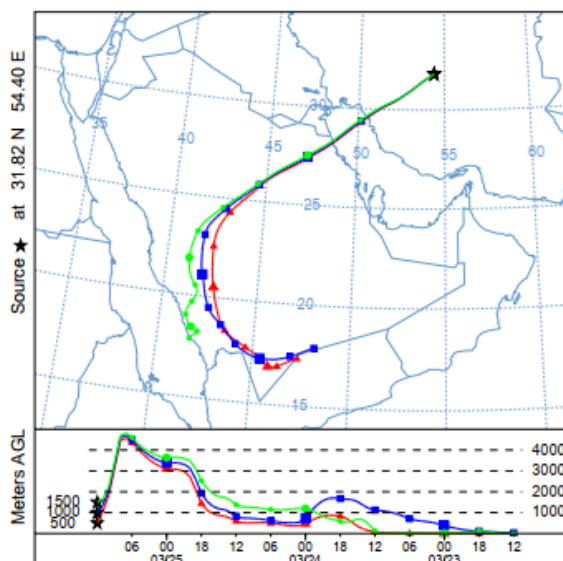


(ث)

شکل ۶. (الف، پ و ث) عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی آکوا-مودیس، (ب، ت و ج) نمای آنگستروم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی آکوا-مودیس (وبسایت جیووانی)، مرز شهر یزد و محل داده‌برداری با کالیتو با رنگ سیاه روی تصویر با استفاده از گوگل ارث مشخص شده است. نتایج مدل مسیریابی پسرو 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 (12 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 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.



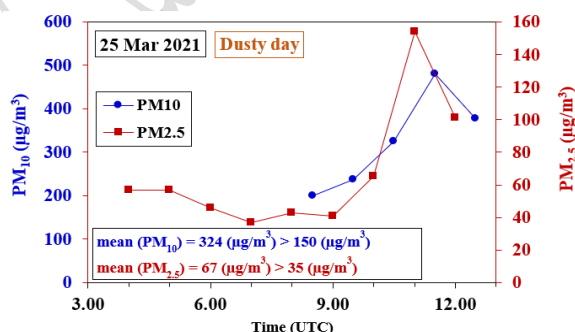
(ب)



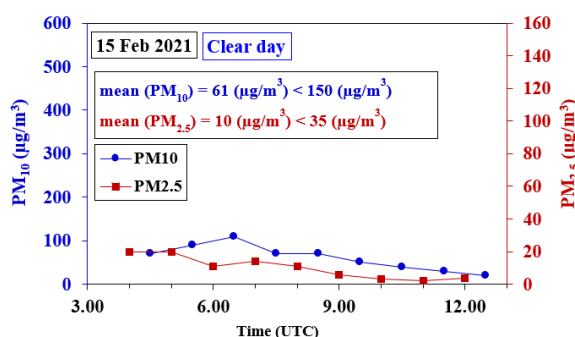
(الف)

شکل ۷. (الف) نتایج مدل مسیریابی پسرو 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).

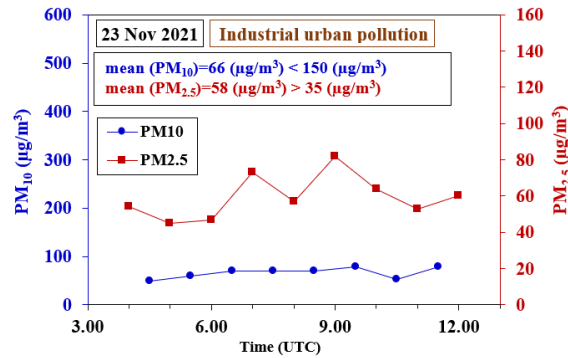
بررسی نمودارهای تغییرات روزانه ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) برای این سه روز نشان می‌دهد که در روز ۱۵ فوریه ۲۰۲۱ میانگین PM_{10} و $PM_{2.5}$ به ترتیب ۶۱ و ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب بوده که کمتر از مقدار مجاز در شبانه‌روز است و نشان‌دهنده یک روز صاف با هوای سالم می‌باشد (شکل ۸-الف). در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱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



(ب)



(الف)



(پ)

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).

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، مشخصات نوری و فیزیکی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های شیدسنج دستی کالیتو 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 گردید. در روز هوای صاف (۱۵ فوریه ۲۰۲۱) که دید افقی 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، درحالی 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 سنج‌ی نوری کمی برای تفکیک هواویزهای طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد.

داده‌های سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی 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 کالیتو داشت. همچنین، مقدار نمای آنگستروم در ۱۵ فوریه و ۲۳ نوامبر بالاتر از ۱ و در ۲۵ مارس نزدیک به صفر بود که تأییدکننده‌ی حضور ذرات ریزدانه در دو روز نخست و ذرات درشت‌دانه در روز گردوغباری است. علاوه بر این، نتایج مدل HYSPLIT نشان داد که گردوغبار ثبت‌شده در روز ۲۵ مارس ۲۰۲۱ از شبه‌جزیره‌ی عربستان به منطقه‌ی یزد منتقل شده است.

مراجع

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 گردوغباری ۲۷ مارس ۲۰۲۱ با شیدسنج دستی کالیتو و منشایابی گردوغبار با مدل هواشناسی HYSPLIT در شهر یزد، <https://civilica.com/doc/1270079>

جبال‌ی، 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 گرد و غبار، یزد، ایران، <https://civilica.com/doc/714417>

سازمان هواشناسی استان یزد، <https://www.yazdmet.ir/SC.php?type=static&id=455>

A.naman, 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., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. 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/usermanual_2020_en.pdf.

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

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

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

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

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

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

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

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

Kaskaoutis, D. G., Sinha, P. R., Vinoj, V., Kosmopoulos, P. G., Tripathi, S. N., Misra, A., ... & Singh, R. P. (2013). Aerosol properties and radiative forcing over Kanpur during severe aerosol

loading conditions. *Atmospheric Environment*, **79**, 7-19.

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

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.

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.

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)* (Vol. 31, No. 2, pp. 46-50). Asociación Física Argentina.

Zdunkowski, W., Trautmann, T., & Bott, A. (2007). *Radiation in the atmosphere: a course in theoretical meteorology*. Cambridge University Press.