نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره۶۲، پاییز ۱۴۰۰

صحت‌سنجی پارامتر عمق اپتیکی هواویز سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی با شیدسنج خورشیدی در شهر زنجان

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۹ **پذیرش نهایی:** ۹۸/۳/۲

صفحات: ۲۱۹-۲۰۱

علی بیات: استادیار گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران[۱]
Email: abayat@znu.ac.ir
احمد عصار عنایتی: دانشجوی کارشناسی فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
Email: enayati@znu.ac.ir
عظیمه توشنی: دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
az.toshani@gmail.com **Email**:

چکیده

در این مقاله، عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی با داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان، از دسامبر سال ۲۰۰۹ تا دسامبر سال ۲۰۱۳ مقایسه و صحت‌سنجی شده است. رگرسیون خطی، میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق بین اندازه-گیری‌های سنجنده‌های فضابرد و سنجنده زمین‌پایه محاسبه شده است. همچنین تخمین رو به بالا و تخمین رو به پایین تعیین شد. نتایج نشان می‌دهند که سنجنده کالیوپ و میزر به ترتیب بیشترین همبستگی (۰/۶۱ و ۰/۵۴) را با اندازه‌گیری‌های زمین‌پایه بر فراز منطقه زنجان دارد. سنجنده‌های میزر، کالیوپ و امی به ترتیب نزدیکترین داده‌های عمق اپتیکی را نسبت به اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی (شیب خط برازش شده به ترتیب برابر ۰/۶۸، ۰/۶۱ و ۰/۵۹) دارند که نشان دهنده مدل مناسب استفاده شده در سنجنده‌ها برای استخراج عمق اپتیکی هواویزها است. همچنین کمترین عرض از مبداء خط برازش شده مربوط به داده‌های سنجنده مادیس است. میانگین عمق اپتیکی هواویزهای اندازه‌گیری شده با سنجنده‌های فضابرد و سنجنده زمین پایه نشان می‌دهد که سنجنده‌های مادیس و کالیوپ دارای تخمین رو به پایین (به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۸۳) و سنجنده-های امی و میزر دارای تخمین روبه بالا (به ترتیب ۱/۲۳ و ۱/۰۸) نسبت به شیدسنج خورشیدی دارند.

کلید واژگان: عمق اپتیکی هواویز، سنجنده و شیدسنج خورشیدی.

۱. نویسنده مسئول: دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک. ۰۹۱۲۷۴۲۰۰۱۹

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

مقدمه

هواویزها، ذرات معلق جامد یا مایع موجود در جو هستند که می‌توانند به طور طبیعی، مانند غبار و نمک‌های دریایی، یا با دخالت انسان، مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی، آلودگی‌های شهری و صنعتی، به جو زمین افزوده شوند که به صورت افقی و عمودی در جو منتشر می‌شوند (راماچاندرا[۱] و همکاران، ۲۰۱۳). نمک‌های دریایی، غبار و سولفات تولید شده از روی سطح اقیانوس، بخشی از هواویزهای موجود در جو را تشکیل می‌دهند، اما بخشی از غبار موجود در جو مربوط به فعالیت‌های انسانی است (پروسپرو[۲] و همکاران، ۲۰۰۲ و حبیب[3] و همکاران، ۲۰۰۶). میزان مانایی هواویزها در لایه پایینی تروپوسفر حدود یک هفته است و به دلیل پراکنده بودن منابع تولید کننده هواویزها در سطح زمین، توزیع فضایی و زمانی آن‌ها در جو زمین غیریکنواخت است (راماچاندرا و همکاران، ۲۰۱۳). هواویزها یکی از مهم‌ترین پارامترهای سیستم اقلیمی زمین هستند که تاثیر زیادی در فهم ما از زور تابشی جو زمین دارند. با این حال، به علت درک محدود ما از خصوصیات هواویزها و تغییرات زیاد زمانی و مکانی آن‌ها در جو زمین، عدم قطعیت زیادی در محاسبه اثرات اقلیمی هواویزها باقی می‌ماند (چنگ[۴] و همکاران، ۲۰۰۱). در مطالعات جوی، اثرات تابشی هواویزها (اثرات تابش مستقیم و غیر مستقیم) یک منبع مهم عدم قطعیت به شمار می‌رود (راماچاندرا[۱] و همکاران، ۲۰۱۳ و سلومون[۵] و همکاران، ۲۰۰۷). از آن‌جایی که هواویزها نقش اساسی در پیش‌بینی اقلیم زمین دارند، برای کاهش عدم قطعیت زیاد آن‌ها، نیاز به اندازه‌گیری دقیق و پیوسته خصوصیات و توزیع هواویزها است (لیو[۶] و همکاران، ۲۰۰۲ و سلومون[۵] و همکاران، ۲۰۰۷). اندازه‌گیری‌های سنجش از دور ماهواره‌ای امکان استخراج خواص اپتیکی هواویزها را در دو مقیاس محلی و جهانی فراهم می‌کند. اندازه‌گیری‌های زمین‌پایه هواویزها، اطلاعات کاملی از خواص اپتیکی و میکروفیزیکی هواویزها و همچنین از اثرات تابشی آن‌ها، روی یک منطقه مشخص، در اختیار ما قرار می‌دهند (کاهن[۷] و همکاران، ۲۰۱۰ و کافمن[۸] و همکاران، ۱۹۹۷). با توسعه شبکه خودکار هواویزها [۹]در چند دهه اخیر، توانایی بررسی خواص اپتیکی هواویزهای جوی، مانند عمق اپتیکی هواویزها، با استفاده از روش‌های خودکار سنجش از دور زمین‌پایه بهبود قابل توجهی یافته است (جتوا[۱۰] و همکاران، ۲۰۰۷). سری‌های زمانی عمق اپتیکی هواویزها به صورت پیوسته با تفکیک زمانی بسیار بالا برای ایستگاه‌های مشخصی در سطح زمین در دسترس قرار دارد (هولبن[۱۱] و همکاران، ۱۹۹۷ و فوتیادی[۱۲] و همکاران، ۲۰۰۷). با این حال برای پوشش جهانی، اندازه‌گیری سنسورهای متصل به ماهواره‌های همگام با خورشید در مدار قطبی، برای تعیین ویژگی‌های

۱ Ramachandran
۲ Prospero
۳ Habib
۴ Change
۵ Solomon
۶ Liu
۷ Kahn
۸ Kaufman
9 AErosol RObotic NETwork (AERONET)
۱۰ Jethva
۱۱ Holben
۱۲ Fotiadi

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

هواویزهای فصلی استفاده می‌شوند (چو[۱] و همکاران، ۲۰۰۳ و سنتز[۲] و همکاران، ۲۰۰۷). مشاهدات ماهواره‌ای علاوه بر پوشش جهانی، توانایی اندازه‌گیری داده‌های یک منطقه بزرگ در یک تصویر را دارد (کسموپولوس[۳] و همکاران، ۲۰۰۸). در دهه گذشته سنسورهای متصل به ماهواره‌ها، مانند ماهواره پایش هواویز-ابر (کالپسو[۴])، طیف‌سنج تصویری با تفکیک‌پذیری متوسط (مادیس[۵])، طیف‌سنج تصویری چند زاویه‌ای (میزر[۶]) و ابزار پایش ازن (امی[۷])، جو زمین را به منظور مشخص کردن خواص فیزیکی و شیمیایی هواویزها، با استفاده از اندازه‌گیری‌ها و الگوریتم‌های بازیابی، مورد بررسی قرار داده‌اند (مارتونچیک[۸] و همکاران، ۱۹۹۸، وینکر[۹] و همکاران، ۲۰۱۰، ژنگ[۱۰] و همکاران، ۲۰۰۳ و کافمن و همکاران، ۱۹۹۷). ویژگی هواویزهای استخراج شده از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای در مقیاس جهانی، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های جوی است. یک سوال بسیار مهم در تفسیر تغییرات هواویزها در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، قابل اطمینان بودن مجموعه داده‌های مختلف اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌ها است (لی و همکاران، ۲۰۰۴). به منظور تعیین تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای هواویزها و به منظور صحت‌سنجی پارامترهای اندازه‌گیری شده از هواویزها، توسط سنجنده‌های متصل به ماهواره، این داده‌ها باید درکنار داده‌های زمین‌پایه هواویزها بررسی شود (لی[۱۱] و همکاران، ۲۰۰۴ و مایهر[۱۲] و همکاران، ۲۰۰۵). با دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای، درک ما از توزیع هواویزها در جو بسیار بهبود یافته است (کای[۱۳] و همکاران، ۲۰۱۳). در این مقاله عمق اپتیکی هواویزها، استخراج شده از اندازه‌گیری‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای و سنجنده زمین‌پایه، مقایسه و صحت‌سنجی شده است. ماهواره‌های مورد استفاده شامل سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی است. اندازه‌گیری‌های زمین‌پایه با استفاده از شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ به‌کابرده شده است.

روش تحقیق

سنجنده‌های فضابرد و زمین‌پایه

سنجنده کالیوپ

ماهواره کالیپسو در ۲۸ آوریل ۲۰۰۶ به فضا پرتاب شد. این ماهواره هر روز ساعت ۱۳:۳۰ و ۰۱:۳۰ به وقت گرینویچ از خط استوا عبور می‌کند و هر ۱۶ روز یکبار چرخه حرکت این ماهواره دوباره آغاز می‌شود (وینکر و همکاران، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰). اندازه‌گیری‌های ماهواره کالیپسو موجب پیشرفت قابل توجه درک ما از اثرات تابشی

---

۱ Chu
۲ Santese
۳ Kosmopoulos
4 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO)
5 Moderate Resolution Imagining Spectroradiometer (MODIS)
6 Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR)
7 Ozone Monitoring Instrument (OMI)
۸ Martonchik
۹ Winker
۱۰ Zhang
۱۱ Li
۱۲ Myhre
۱۳ Qi

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

هواویزها می‌شود. برخلاف سایر ماهواره‌هایی که به روش سنجش غیرعامل اندازه‌گیری می‌کنند، کالیپسو می‌تواند هواویزها را در هر دو شرایط آسمان صاف و آسمانی با لایه‌های نازک ابر و همچنین برفراز سطوح روشن اندازه‌گیری کند (وینکر و همکاران، ۲۰۰۷، لیو و همکاران، ۲۰۰۸، گنگ[۱] و همکاران، ۲۰۱۱، هوانگ[۲] و همکاران، ۲۰۰۷ الف و ب و ما و یو[۳]، ۲۰۱۴). مزیت اصلی داده‌های ماهواره کالیپسو، توانایی اندازه‌گیری نمایه توزیع عمودی هواویزها در هر دو مقیاس جهانی و منطقه‌ای است. ماهواره کالیپسو حامل سنجنده کالیوپ است که دارای دو طول موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر است که پس‌پراکنش نور لیزر خاموش شده را در کل جو زمین به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. سنجنده کالیوپ اندازه‌گیری‌های منحصر به‌فردی از نمایه عمودی هواویزها و ابرها در اختیار می‌گذارد (وینکر و همکاران، ۲۰۰۳ و میشچنکو[۴] و همکاران، ۱۹۹۹). تا به امروز، داده‌های کالیوپ غالباً برای تحلیل هواویزهای غباری، به خصوص برای مطالعه توزیع توده‌های غباری آسیایی مورد استفاده قرار گرفته است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۷ الف و ب).

سنجنده مادیس

مادیس یک ابزار کلیدی است که بر روی ماهواره‌های ترا و آکوا قرار دارد. ماهواره ترا در چرخش به دور زمین از شمال به جنوب در هنگام صبح و ماهواره آکوا از جنوب به شمال در هنگام عصر از استوا عبور می‌کند. سنجنده مادیس دارای ۳۶ باند طیفی است که اطلاعات فراوانی از جو زمین و اقیانوس‌ها در اختیار ما قرار می‌دهد. مادیس از روش‌های مختلفی برای استخراج داده از زمین (کافمن و همکاران، ۱۹۹۷) و اقیانوس‌ها (تانر[۵] و همکاران، ۱۹۹۷)، استفاده می‌کند. به منظور بهبود دقت و کیفیت داده‌های استخراج شده، الگوریتم‌های حذف اثر ابر، مدل‌های هواویزها و پایگاه داده‌های بازتاب سطحی سنجنده مادیس به روزرسانی می‌شود (رمر[۶] و همکاران، ۲۰۰۵). الگوریتم DB[۷] در داده‌های سطح ۲/۰ مادیس اعمال شده است که در آن اثر سطوح درخشان، مانند بیابان صحرا (واقع در آفریقا)، تصحیح می‌شود. این ابزار دارای دقت تفکیک‌پذیری فضایی متوسط (کیلومتر ۲۵۰-۱) و تفکیک‌پذیری زمانی (۲-۱ روز) در طول موج‌های مختلف است (بیبی[۸] و همکاران، ۲۰۱۵).

سنجنده میزر

سنجنده میزر[۹] متصل به ماهواره ترا، در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد و در مدار چرخش همگام با خورشید در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از زمین قرار گرفت. تفکیک‌پذیری زمانی این سنجنده ۱۶ روز است و تفکیک‌پذیری مکانی آن ۲۵۰، ۲۷۵ و ۱۰۰۰ متر است، اما داده‌های اندازه‌گیری شده با تفکیک فضایی ۱۱۰۰ متر برای استخراج عمق

---

۱ Geng
۲ Huang
۳ Ma and Yu
۴ Mishchenko
۵ Tanre
۶ Remer
۷ Deep Blue
۸ Bibi
۹ Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

اپتیکی هواویزها در داده‌های سطح ۲ به کار برده می‌شود که در نهایت داده‌هایی با تفکیک‌پذیری ۱۷/۵ × ۱۷/۵کیلومتر را برای عمق اپتیکی خروجی می‌دهد (مارتونچیک و همکاران، ۱۹۹۸). این سنجنده به طور پیوسته، هر روز از بیشتر نقاط زمین داده‌برداری می‌کند. تفکیک‌پذیری این سنجنده وابسته به عرض جغرافیایی است. با توجه به هم‌پوشانی مسیرها در نزدیکی قطب‌ها و جداسازی وسیع آن‌ها در استوا، فواصل پوشش زمانی برای قطب و استوا به ترتیب بین ۲ تا ۹ روز متغیر است (بیبی و همکاران، ۲۰۱۵).

سنجنده امی

سنجنده امی (ابزار پایش ازن)، بر روی ماهواره آئورا نصب و در جولای ۲۰۰۴ توسط آژانس هلند (NIVR[1]) با همکاری موسسه هواشناسی فنلاند (FMI[2]) جهت اجرای برنامه‌های هوافضا به جو پرتاب شد. سنجنده امی، یک طیف‌سنج تصویربردار با تفکیک فضایی ۱۳ در ۲۵ کیلومتر است که تابش ماوراء بنفش و طیف مرئی خورشید را در طول موج‌های ۲۷۰-۵۰۰ نانومتر را با تفکیک طول موجی ۰/۵ نانومتر در بالای جو اندازه‌گیری می‌کند (لولت[3] و همکاران، ۲۰۰۶). امی به منظور بازیابی اطلاعات در خصوص گازهای O_3، NO_2، SO_2 و... موجود در جو طراحی شده است. علاوه بر آن، اطلاعات مفیدی درباره هواویزهای جوی در اختیار ما قرار می‌دهد. این سنجنده دارای یک محدوده طیفی حوالی ۴۰۰ نانومتر است که داده‌های آن برای بررسی و تشخیص میزان جذب هواویزهای حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی و غبار در لایه‌های بالایی جو به کار می‌رود (بیبی و همکاران، ۲۰۱۵). داده‌های تمامی سنجنده‌ها از سایت https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ استخراج شده است.

شبکه خودکار شیدسنج خورشیدی

شبکه خودکار شیدسنج خورشیدی هواویزها، شبکه‌ای از ابزارهای سنجش از دور زمین‌پایه است که توسط ناسا ایجاد شده است. این شبکه از طیف‌سنج‌های خورشید/آسمان شرکت سیمل [4]استفاده می‌کند که نور مستقیم خورشید و تابش پراکنده آسمان را در محدوده طیفی ۳۴۰-۱۰۲۰ و ۴۴۰-۱۰۲۰ نانومتر به ترتیب اندازه‌گیری می‌کند (هولبن و همکاران، ۱۹۹۸). داده‌های شبکه خودکار هواویزها در سه سطح در دسترس است؛ سطح ۱/۰ داده‌های خام، سطح ۱/۵ که در آن اثر ابر حذف شده است و سطح ۲/۰، علاوه بر حذف سهم حضور ابر، داده‌های با کیفیت را از بقیه جدا کرده است (بیات، ۱۳۸۷). شبکه خودکار هواویزها، عمق اپتیکی هواویزها را روی خشکی و دریا در یک نقطه گزارش می‌کند. اگرچه این روش سنجش از دور زمین‌پایه محدود به اندازه‌گیری در یک ناحیه مشخص است، اما اندازه‌گیری‌های طیفی و زاویه‌ای آن از تابش خورشید و آسمان در طول روز، داده‌های پیوسته و قابل اعتمادی از خواص اپتیکی و میکروفیزیکی هواویزهای یک ناحیه در اختیار ما قرار می‌دهد (دوبوویک[5] و همکاران ۲۰۰۲، بیات، ۱۳۹۱). در این مقاله از داده‌های سطح۲ عمق اپتیکی هواویزها که معیاری از میزان آنها در

۱ Netherlands Agency for Aerospace Programs
۲ Finnish Meteorological Institute
۳ Levelt
۴ CIMEL
۵ Dubovik

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

جو زمین است بین بازه ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ استفاده شده است. داده‌ها از سایت http://aeronet.gsfc.nasa.gov/ استخراج گردیده است. پس از استخراج داده‌های سنجنده‌ها برای پیکسل بالاسر شیدسنج خورشیدی شهر زنجان، داده‌های همزمان استخراج شده و سپس مقایسه بین داده‌ها انجام می‌شود.

روش‌های مورد استفاده در مقایسه داده‌های ماهواره‌ای و زمین‌پایه

مقایسه داده‌های مربوط به عمق اپتیکی هواویزها که توسط ماهواره‌ها و ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمین‌پایه به دست آمده‌اند، نقش تعیین کننده‌ای در محاسبه زور تابشی، تخمین خطا در اندازه‌گیری ماهواره‌ها، ادغام و به دست آوردن داده‌ها و توسعه الگوریتم‌ها دارد. در این مقاله داده‌های عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده با سنجنده‌های فضابرد کالیوپ، مادیس، میزر و امی با اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ مقایسه و صحت‌سنجی شده است. به منظور مقایسه دقیق عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌های فضابرد و زمین‌پایه لازم است تا داده‌ها در یک طول موج مشترک مقایسه شوند. به همین دلیل عمق اپتیکی هواویزها (AOD[1]) شیدسنج خورشیدی، به طول موج‌های سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی با استفاده از رابطه (۱) تبدیل می‌شود:

$$AOD_a = AOD_b(\frac{a}{b})^{-\alpha}$$ رابطه (۱)

که در آن AOD عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌های فضابرد و زمین پایه است. ضریب a طول‌موج سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر ۵۳۲، ۵۵۰، ۵۵۵ و ۵۰۰ نانومتر و b طول‌موج شیدسنج خورشیدی و برابر ۴۴۰ نانومتر است. نمای آنگستروم، α، از عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده در دو طول موج ۴۴۰ و ۸۷۰ نانومتر محاسبه می‌شود که معیاری از ابعاد ذرات هواویزهای داخل جو زمین را نشان می‌دهد (آلم[2] و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ الف، لیو و همکاران، ۲۰۰۸ الف و ب و پراسد[3] و همکاران، ۲۰۰۷). برای محاسبه ضریب همبستگی، بین داده‌های سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی با داده‌های شیدسنج خورشیدی، ابتدا عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی با استفاده از رابطه (۱) به طول‌موج اندازه‌گیری سنجنده‌های فضابرد تبدیل می‌شود و سپس داده‌های متناظر از لحاظ مکانی و زمانی برای مقایسه انتخاب می‌شود (اک[4] و همکاران، ۱۹۹۹، ژاو[5] و همکاران، ۲۰۰۲ و رمر و همکاران، ۲۰۰۵). با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی، رابطه خطی (۲) بین عمق اپتیکی هواویزهای به دست آمده از کالیوپ، مادیس، میزر و امی و عمق اپتیکی استخراج شده از شیدسنج خورشیدی شبکه خودکار هواویزها به کار می‌رود:

$$AOD_{Satellite} = m \times AOD_{Aeronet} + c$$ رابطه(۲).

در رابطه (۲)، m شیب، c عرض از مبدا، $AOD_{Aeronet}$ و $AOD_{Satellite}$ به ترتیب عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط شیدسنج خورشیدی و سنجنده‌های فضابرد را نشان می‌دهند. ضریب رگرسیون، R^2،

۱ Aerosol Optical Depth (AOD)
۲ Alam
۳ Prasad
۴ Eck
۵ Zhao

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

نشان دهنده مربع ضریب همبستگی بین عمق اپتیکی هواویزهای شیدسنج خورشیدی و سنجنده‌های فضابرد است. تمام این کمیت‌ها (m, c, R^2) به عنوان شاخص‌هایی از مشخصات محلی هواویزها برای یک ناحیه به شمار می‌روند. شیب معادله رگرسیون خطی نشان‌دهنده نزدیکی مدل‌های هواویزهای فرض شده در یک منطقه خاص به نوع هواویزهای اندازه‌گیری شده در آن محل است و عرض از مبدا نشان‌دهنده خطای ناشی از بازتاب سطحی است. بنابراین معادله رگرسیون خطی اطلاعاتی در مورد پارامترهای مؤثر بر همبستگی را ارائه می‌دهد. اگر عرض از مبدا مقدار ۰ و شیب مقدار ۱ را داشته باشد، عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌ها و ایستگاه‌های زمین‌پایه دارای همبستگی کامل خواهند بود (هیر[۱] و همکاران، ۲۰۱۱، ایچوکو[۲] و همکاران، ۲۰۰۲ و تانگ[۳] و همکاران، ۲۰۰۳). عرض از مبداهای بزرگ به دلیل خطا در بازتاب سطحی هستند و الگوریتم‌ها برای بازتاب سطح زمین مقادیر عمق اپتیکی کمتری را نشان می‌دهد، که این به صورت عرض از مبدا غیر صفر نشان داده می‌شود که ممکن است با یک فرض نامناسب یا خطای کالیبراسیون همراه باشد. در مقایسه با شرایط واقعی، زمانی که شیب برابر یک نباشد، نشان‌دهنده خواص اپتیکی و میکروفیزیکی نامناسب هواویزهای استفاده شده در الگوریتم بازیابی سنجنده‌های فضابرد است. علاوه بر استفاده از رگرسیون خطی، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، رابطه (۳)، و میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، رابطه (۴)، که به صورت زیر تعریف می‌شوند، محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(AOD_{(Satellite)i} - AOD_{(Aeronet)i}\right)^2}$$ رابطه (۳)

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\left(AOD_{(Satellite)i} - AOD_{(Aeronet)i}\right)\right|$$ رابطه (۴)

که در آن n تعداد مشاهدات ثبت شده مشترک است (Remer et al., 2005). تخمین رو به بالا یا رو به پایین عمق اپتیکی استخراج شده از سنجنده‌های ماهواره‌ای نسبت به عمق اپتیکی استخراج شده از شیدسنج خورشیدی با پارامتر جذر بایاس میانگین (RMB[۴])،رابطه (۵)، بیان می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMB = \frac{\overline{AOD}_{Satellite}}{\overline{AOD}_{Aeronet}}$$ رابطه (۵)

که در آن $\overline{AOD}$ متوسط عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده مشترک را نشان می‌دهد. اگر RMB > 1 باشد، نشان‌دهنده تقریب رو به بالا و RMB < 1 نشان‌دهنده تقریب رو به پایین اندازه‌گیری سنجنده‌های ماهواره‌ای نسبت به شیدسنج خورشیدی است (رمر و همکاران، ۲۰۰۵).

نتایج

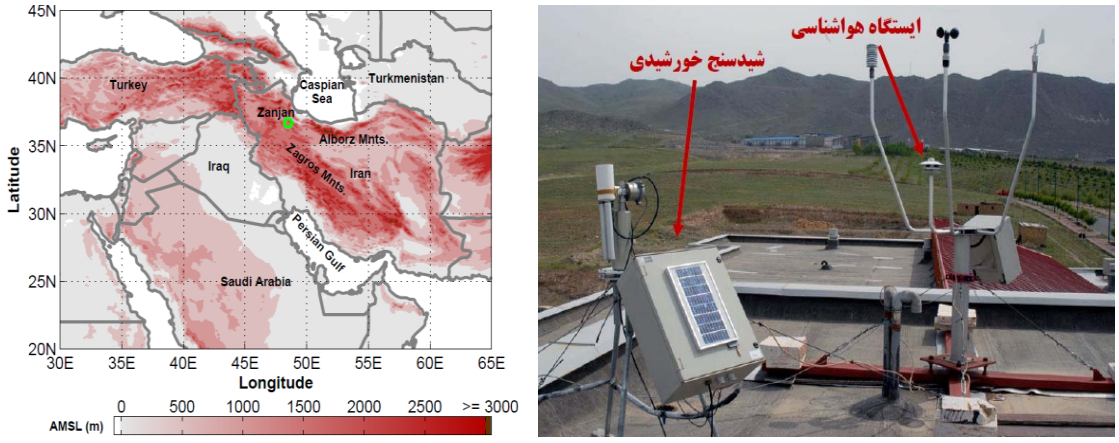
مقایسه عمق اپتیکی هواویزهای اندازه‌گیری شده ماهواره‌ای و زمین‌پایه

۱ Hyer
۲ Ichoku
۳ Tang
۴ Root Mean Bias

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

زنجان شهری است در شمال غربی ایران در عرض جغرافیایی ۳۶/۷۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸/۵۱ درجه شرقی که در ارتفاع متوسط ۱۶۶۰ متری از سطح دریا قرار دارد. این شهر ۵۰۰ هزار نفر جمعیت دارد. نتایج بررسی‌های قبلی نشان می‌دهد که غبار و آلودگی شهری دو نوع غالب هواویزهای شهر زنجان هستند. همچنین عراق اصلی‌ترین منبع خارجی رویدادهای غباری در این شهر است (بیات،۱۳۸۷، بیات،۱۳۹۱). شیدسنج خورشیدی CE318-2 ساخت شرکت فرانسوی سیمل است که در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان نصب شده است. این شیدسنج در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۰، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر نور مستقیم و پراکنده خورشید را به صورت خودکار در طول روز اندازه‌گیری می‌کند. در شکل(۱) تصویر شیدسنج و محل قرار گیری آن در نقشه ایران نشان داده شده است.

ماهواره‌ها در مدار حرکت خود، به طور منظم و در زمان مشخصی از فراز یک منطقه عبور می‌کنند. در هنگام داده‌برداری از یک منطقه ممکن است در بعضی مواقع به دلیل ابری بودن جو، سنجنده قادر به اندازه‌گیری نباشد. شیدسنج خورشیدی که یک ابزار اندازه‌گیری زمین‌پایه است، در مقایسه با ماهواره‌ها، به طور منظم و با تفکیک زمانی زیاد (هر ۱۵ دقیقه در طول روز) و به روش مستقیم‌تر و با دقت بالاتری عمق اپتیکی هواویزها را برای یک منطقه اندازه‌گیری می‌کند. در ادامه اندازه‌گیری سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی برای زمان و مکان مشخص (زنجان) با داده‌های شیدسنج خورشیدی برای بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ مقایسه می‌شود.

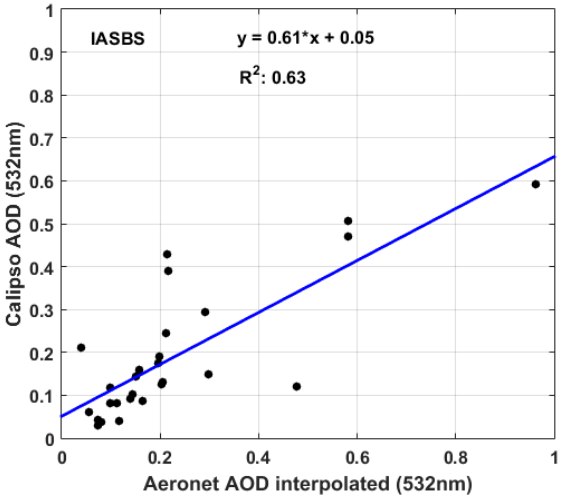


شکل(۱): محل قرارگیری شیدسنج‌خورشیدی (دایره سبزرنگ) در شهر زنجان. شیدسنج خورشیدی بر روی پشت‌بام دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان قرار دارد.

در شکل (۲)، نمودار پراکندگی عمق اپتیکی هواویز استخراج شده از سنجنده فضابرد کالیوپ و شیدسنج خورشیدی زمین پایه مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان در طول موج ۵۳۲ نانومتر برای بازه زمانی بین ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ بر حسب یکدیگر ترسیم شده است. رابطه خطی، ضریب همبستگی در نمودار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط سنجنده کالیوپ در حالت کلی

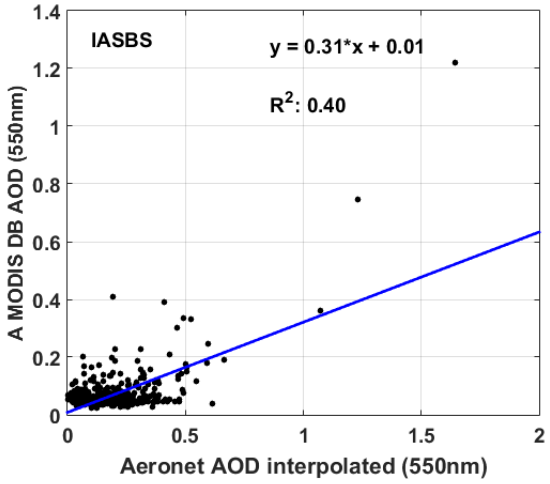
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

مقدار کمتری نسبت اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی دارد. خط همبستگی برازش شده به داده‌ها، دارای شیب ۰/۶۱ و عرض از مبدا ۰/۰۵ است. ضریب همبستگی برای این داده‌ها ۰/۶۳ است.



شکل (۲): نمودار پراکندگی عمق اپتیکی هواویز استخراج شده از سنجنده کالیوپ بر حسب اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان در طول موج ۵۳۲ نانومتر برای بازه زمانی بین دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳.

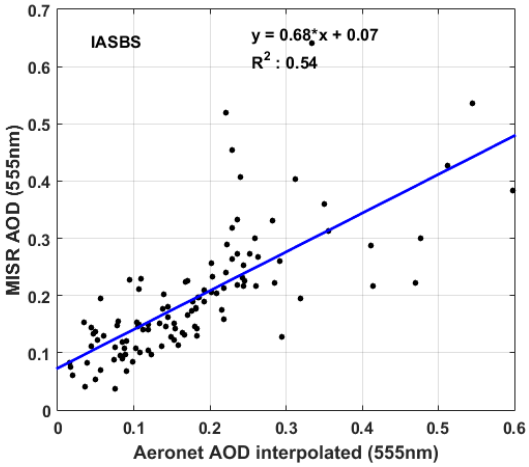
نمودار پراکندگی بین داده‌های عمق اپتیکی مادیس حاصل از الگوریتم DB و شیدسنج خورشیدی بر فراز شهر زنجان در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، خط همبستگی برازش شده به داده‌ها، دارای شیب ۰/۳۱ و عرض از مبدا ۰/۰۱ است. ضریب همبستگی برای این داده‌ها ۰/۴۰، برای منطقه زنجان به دست آمد.



شکل (۳): نمودار پراکندگی عمق اپتیکی هواویز استخراج شده از سنجنده مادیس بر حسب اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی در طول موج ۵۵۰ نانومتر برای بازه زمانی بین دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ بر فراز منطقه زنجان.

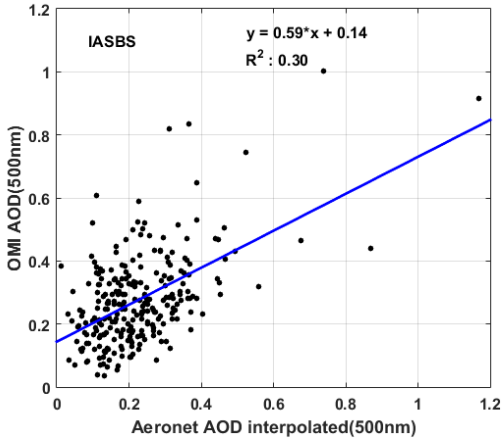
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

در شکل (۴)، همبستگی بین داده‌های عمق اپتیکی هواویزهای استخراج شده از اندازه‌گیری‌های سنجنده میزر در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی در طول موج ۵۵۵ نانومتر نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، خط همبستگی برازش شده به داده‌ها دارای شیب ۰/۶۸ و عرض از مبدا ۰/۰۷ است. ضریب همبستگی برای این داده‌ها ۰/۵۴، برای منطقه زنجان به دست آمده است.



شکل (۴): نمودار پراکندگی عمق اپتیکی هواویز استخراج شده از سنجنده میزر بر حسب اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان در طول موج ۵۵۵ نانومتر برای بازه زمانی بین دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳.

شکل (۵)، نمودار پراکندگی بین داده‌های عمق اپتیکی هواویزهای استخراج شده از اندازه‌گیری‌های سنجنده امی و اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی در طول موج ۵۰۰ نانومتر برای بازه اندازه‌گیری ذکر شده را نمایش می‌دهد. شیب، عرض از مبداء و ضریب همبستگی خط برازش شده به داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵۹، ۰/۱۴ و ۰/۳۰، برای منطقه زنجان به دست آمدند.



شکل (۵): نمودار پراکندگی عمق اپتیکی هواویز استخراج شده از سنجنده امی بر حسب اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی در طول موج ۵۰۰ نانومتر برای بازه زمانی بین دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳ بر فراز منطقه زنجان.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

در جدول (۱)، تعداد داده‌های مشترک بین شیدسنج خورشیدی با هر یک از سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر و امی آورده شده است. همچنین ضریب همبستگی، شیب و عرض از مبداء خط برازش شده بین داده‌های شیدسنج خورشیدی با هر یک از سنجنده‌ها بیان شده است. کمترین داده مشترک برابر ۲۷ عدد است و مربوط به سنجنده کالیوپ با شیدسنج خورشیدی است. زیرا سنجنده کالیوپ هر ۱۶ روز یکبار از نزدیکی شیدسنج خورشیدی در طول روز عبور می‌کند. بیشترین داده مشترک بین سنجنده مادیس و شیدسنج خورشیدی است که در هر روز یک داده از فراز زنجان دارد. بیشترین (کمترین) ضریب همبستگی بین سنجنده کالیوپ (امی) با شیدسنج خورشیدی مشاهده می‌شود. کمترین شیب برابر ۰/۳۱ مربوط به خط برازش شده به داده‌های مادیس و شیدسنج خورشیدی است که نشان می‌دهد مدل هواویز در نظر گرفته شده در مادیس کمتر به واقعیت نزدیک است. کمترین بازتاب سطح در مادیس دیده می‌شود که نشان‌دهنده تاثیر کم بازتاب سطح زمین در استخراج عمق اپتیکی هواویزها از داده‌های سنجنده مادیس است.

جدول(۱). تعداد داده‌های مشترک عمق اپتیکی هواویزها، ضریب همبستگی (R^2)، شیب (m) و عرض از مبداء (c) برای نمودارهای پراکندگی رسم شده بین داده‌های سنجنده‌های فضابرد کالیوپ، مادیس، میزر و امی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان بین بازه اندازه‌گیری دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۱۳.

شیدسنج-امی ۵۰۰ نانومتر				شیدسنج-میزر ۵۵۵ نانومتر				شیدسنج-مادیس ۵۵۰ نانومتر				شیدسنج-کالیوپ ۵۳۲ نانومتر			
N	R^2	m	c	N	R^2	m	c	N	R^2	m	c	N	R^2	m	c
۲۶۱	۰,۲۹	۰,۵۹	۰,۱۴	۱۱۰	۰,۵۴	۰,۶۸	۰,۰۷	۵۵۹	۰,۴۰	۰,۳۱	۰,۰۱	۲۷	۰,۶۲	۰,۶۱	۰,۰۵

در جدول (۲)، برای تعیین میزان هم‌خوانی اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و زمین‌پایه، مقادیر مربوط به ریشه میانگین مربعات (RMSE) و خطای مطلق (MAE) با توجه به روابط (۳) و (۴) محاسبه شده است. همچنین تخمین رو به بالا یا رو به پایین بودن عمق اپتیکی استخراج شده از سنجنده‌های ماهواره‌ای نسبت به عمق اپتیکی استخراج شده از شیدسنج خورشیدی با پارامتر جذر بایاس میانگین (RMB) با رابطه (۵) محاسبه شده است و در جدول (۲)، آورده شده است.

جدول(۲): ریشه میانگین مربعات (RMSE)، خطای مطلق (MAE) و جذر بایاس میانگین (RMB) برای داده‌های سنجنده-های کالیوپ، مادیس، میزر و امی با اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی

شیدسنج-امی ۵۰۰ نانومتر			شیدسنج-میزر ۵۵۵ نانومتر			شیدسنج-مادیس ۵۵۰ نانومتر			شیدسنج-کالیوپ ۵۳۲ نانومتر		
RMSE	MAE	RMB	RMSE	MAE	RMB	RMSE	MAE	RMB	RMSE	MAE	RMB
۰,۱۴	۰,۱۱	۱,۲۳	۰,۰۸	۰,۰۶	۱,۰۸	۰,۱۷	۰,۱۳	۰,۳۲	۰,۱۳	۰,۰۸	۰,۸۳

همان‌طور که در جدول(۲) نشان داده شده است، کمترین (بیشترین) مقدار ریشه میانگین مربعات برابر ۰/۰۸ (۰/۱۷) مربوط به میزر (مادیس) نسبت به شیدسنج خورشیدی است. کمترین (بیشترین) مقدار خطای مطلق برابر ۰/۰۶ (۰/۱۳) مربوط به میزر (مادیس) است. کمترین (بیشترین) مقدار جذر بایاس میانگین برابر ۰/۳۲ (۱/۲۳) مربوط به مادیس (امی) نسبت به شیدسنج خورشیدی است. با توجه به این سه پارامتر مقایسه‌ای سنجنده

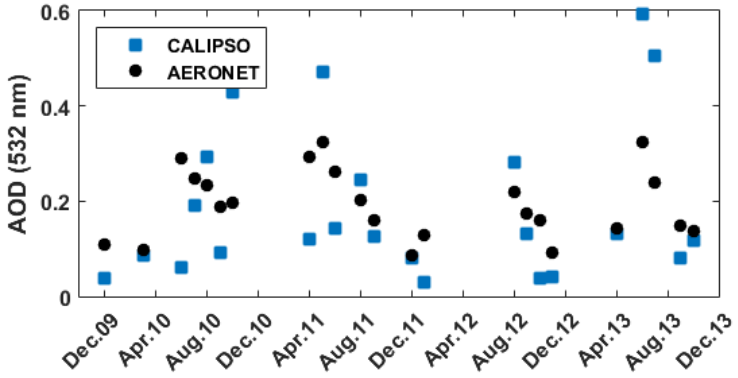
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

میزر دارای نزدیک‌ترین مقادیر عمق اپتیکی هواویز به اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی است. بیشترین اختلاف مقادیر نیز مربوط به داده‌های سنجنده مادیس است.

بررسی تغییرات ماهانه عمق اپتیکی هواویزهای سنجنده‌های فضابرد نسبت به شیدسنج خورشیدی

در این بخش میانگین ماهانه عمق اپتیکی استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های زمین‌پایه شیدسنج خورشیدی مقایسه شده است. با استفاده از این نمودارها می‌توان روند تغییرات فصلی عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده با استفاده از ماهواره و ابزار زمین‌پایه را بررسی کرد.

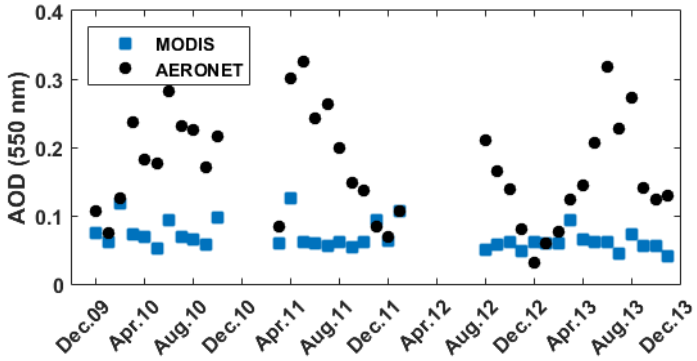
شکل (۶)، میانگین ماهانه عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده با استفاده از لیدار فضابرد کالیوپ و شیدسنج خورشیدی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل نیز مشخص است تغییرات عمق اپتیکی برای هر دو سنجنده تقریبا یکسان است و هر دو سنجنده در فصل تابستان بیشترین مقدار هواویز و در فصل زمستان کمترین مقدار هواویزها را نشان می‌دهند. عمق اپتیکی هواویزهای اندازه‌گیری شده با سنجنده کالیوپ برای منطقه زنجان بین مقادیر ۰/۰۳ تا ۰/۵۹ که کمترین (بیشترین) مقدار آن در ماه دسامبر (ژوئن ۲۰۱۳) دیده می‌شود. تغییرات عمق اپتیکی هواویزها برای شیدسنج خورشیدی بین ۰/۰۹ تا ۰/۳۲ است. بیشترین مقدار عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری شده توسط شیدسنج خورشیدی برابر ۰/۳۲ در ماه می سال ۲۰۱۱ مشاهده شده است. داده‌های عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط لیدار فضابرد کالیوپ دارای تخمین رو به پایین (RMB = ۰/۸۳) در مقایسه با عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری توسط شیدسنج خورشیدی است.



شکل (۶): نمودار سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده کالیوپ و شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان.

شکل (۷)، سری زمانی میانگین ماهانه داده‌های عمق اپتیکی استخراج شده از اندازه‌گیری سنجنده مادیس در مقایسه با شیدسنج خورشیدی سایت دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان را نمایش می‌دهد. در فصل بهار و تابستان که بارش باران در منطقه زنجان کم است، میزان عمق اپتیکی افزایش پیدا می‌کند.

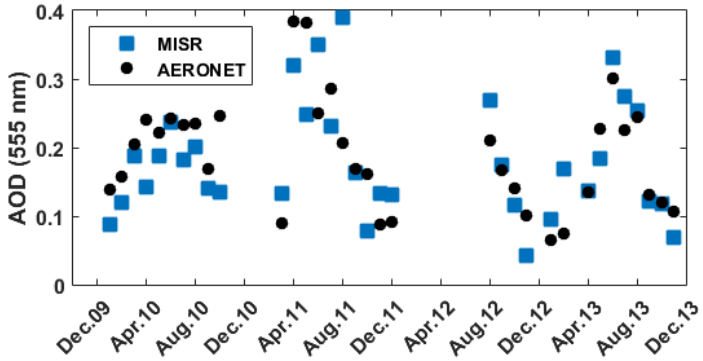
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]



شکل (۷): نمودار سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده مادیس و شیدسنج خورشیدی سایت دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان.

میانگین عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با سنجنده مادیس بین مقادیر ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ تغییر می‌کند. این تغییرات برای مقادیر عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ قرار دارد. داده‌های عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط مادیس در مقایسه با مقادیر عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط شیدسنج خورشیدی دارای تخمین رو به پایین (RMB = ۰/۳۲) است. بیشترین مقدار عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با استفاده از شیدسنج خورشیدی (مادیس) برابر ۰/۳۵ (۰/۱۵) مربوط به ماه آپریل سال ۲۰۱۱ است.

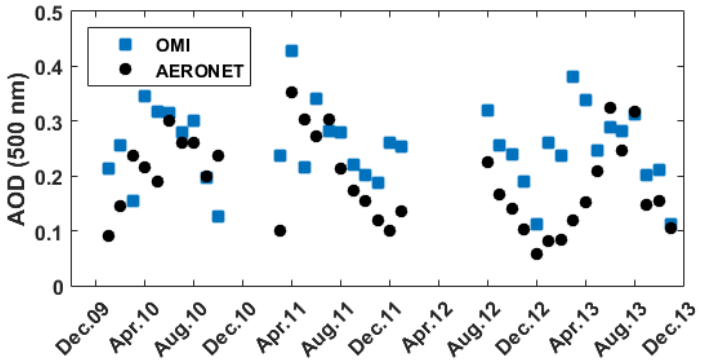
سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده میزر و شیدسنج خورشیدی در شکل (۸) نشان داده شده است. میانگین عمق اپتیکی هوایز سنجنده میزر بین مقادیر ۰/۰۴ تا ۰/۳۹ تغییر می‌کند. این تغییرات برای مقادیر عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی بین ۰/۰۶ تا ۰/۳۸ است. در ماه آپریل سال ۲۰۱۱ بیشترین مقدار عمق اپتیکی برابر ۰/۳۸ توسط شیدسنج خورشیدی اندازه‌گیری شده است. بیشترین مقدار عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری شده توسط سنجنده میزر در ماه آگوست سال ۲۰۱۱ برابر ۰/۳۹ به دست آمده است که نشان‌دهنده تخمین رو به بالای (RMB = ۱/۰۸) داده‌های میزر نسبت به داده‌های شیدسنج خورشیدی است.



شکل (۸): نمودار سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده میزر و شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

شکل (۹)، سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها را برای اندازه‌گیری‌های سنجنده امی و شیدسنج خورشیدی برای منطقه زنجان را نشان می‌دهد. میانگین عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با استفاده از سنجنده امی بین مقادیر ۰/۱۱ تا ۰/۴۳ تغییر می‌کند. این تغییرات برای مقادیر عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده با شیدسنج خورشیدی بین ۰/۰۶ تا ۰/۳۵ است. بنابراین، داده‌های عمق اپتیکی هواوی سنجنده امی دارای تخمین رو به بالا (RMB = ۱/۲۳) در مقایسه با شیدسنج خورشیدی برای منطقه زنجان است. بیشترین مقدار میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها اندازه‌گیری شده توسط امی و شیدسنج خورشیدی در ماه آپریل سال ۲۰۱۱ رخ می‌دهد که به ترتیب برابر ۰/۴۳ و ۰/۳۵ است.



شکل (۹): نمودار سری زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویز اندازه‌گیری شده توسط سنجنده امی و شیدسنج خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان.

در تمامی شکل‌های (۲ تا ۹) بیشینه مقدار عمق اپتیکی هواویزها در فصل تابستان و کمینه مقدار آن در فصل زمستان رخ می‌دهد. مطالعات قبلی نیز همین نکته را برای جو زنجان نشان می‌دهد. میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها، انحراف معیار و تعداد کل داده‌ها اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر، امی و شیدسنج خورشیدی بر فراز شهر زنجان در جدول (۳) آورده شده است. کمترین مقدار عمق اپتیکی برابر ۰/۰۶ و مربوط به داده‌های مادیس است. میانگین مقدار داده‌های سنجنده‌های کالیوپ (۰/۲۳) و میزر (۰/۱۹) به داده‌های شیدسنج خورشیدی (۰/۲۲) نزدیک است.

جدول(۳): میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها (AVG)، انحراف معیار (std) و تعداد (N) کل داده‌ها در کل بازه اندازه‌گیری توسط سنجنده‌های کالیوپ، مادیس، میزر، امی و شیدسنج خورشیدی بر فراز شهر زنجان.

کالیوپ ۵۳۲ نانومتر		مادیس ۵۵۰ نانومتر		میزر ۵۵۵ نانومتر		امی ۵۰۰ نانومتر		شیسنج خورشیدی ۴۴۰ نانومتر	
AVG (std)	N	AVG (std)	N	AVG (std)	N	AVG (std)	N	AVG (std)	N
۰,۲۳ (۰,۲۴)	۵۱	۰,۰۶ (۰,۱۱)	۳۳۶۱	۰,۱۹ (۰,۱۱)	۶۷۸	۰,۳۰ (۰,۱۶)	۱۸۳۵	۰,۲۲ (۰,۱۴)	۱۱۲۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

نتیجه‌گیری

در این مقاله، داده‌های عمق اپتیکی استخراج شده از سنجنده‌های فضابرد کالیوپ، مادیس، میزر و امی با داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان مقایسه و صحت‌سنجی شده است. بی‌بی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ برای چهار شهر کراچی، لاهور، جیپور و کانپور عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده توسط شیدسنج‌خورشیدی را با اندازه‌گیری‌های سنجنده‌های فضابرد مقایسه کرد. در جدول ۴، مقادیر R^2 یا همبستگی، m یا شیب خط برازش شده و c یا عرض از مبداء خط برازش شده برای داده‌های مشترک زمانی و مکانی سنجنده کالیوپ، مادیس، میزر و امی با شیدسنج‌خورشیدی به ترتیب برای شهر زنجان و چهار شهر کراچی، لاهور، جیپور و کانپور (بیبی و همکاران، ۲۰۱۵) آورده شده است. R^2 همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمین‌پایه را نشان می‌دهد و هر چقدر به یک نزدیکتر باشد همبستگی بیشتر را نشان می‌دهد. برای شهر زنجان، داده‌های سنجنده کالیوپ و میزر با اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی بیشترین همبستگی را نشان می‌دهند. سنجنده میزر برای چهار شهر کراچی، لاهور، جیپور و کانپور نیز همبستگی بالایی با شیدسنج خورشیدی نشان می‌دهد. نزدیک بودن m یا شیب خط به یک، نشان دهنده مدل انتخابی بهتر سنجنده در استخراج عمق اپتیکی هواویز است. برای شهر زنجان، سنجنده میزر مدل انتخابی مناسب‌تری نسبت به سایر سنجنده‌ها دارد. این مقدار برای شهرهای دیگر متفاوت است. مقادیر c یا عرض از مبداء خط برازش شده تاثیر بازتاب زمینی بر روی داده‌های سنجنده‌های فضابرد را نشان می‌دهد. هر چقدر اثر بازتاب سطح زمین بر روی داده‌ها کمتر باشد مقدار این پارامتر به صفر نزدیک‌تر خواهد بود. برای شهر زنجان، اثر بازتاب سطح زمین بر روی داده‌های سنجنده مادیس کمترین مقدار است. نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که برای چهار شهر کراچی، لاهور، جیپور و کانپور نیز بازتاب سطح زمین کمترین اثر را بر روی اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویزها می‌گذارد.

جدول (۴). مقادیر R^2 یا همبستگی، m یا شیب خط و c یا عرض از مبداء خط برازش شده برای داده‌های مشترک زمانی و مکانی سنجنده کالیوپ، مادیس، میزر و امی با شیدسنج‌خورشیدی به ترتیب برای شهر زنجان و چهار شهر کراچی، لاهور، جیپور و کانپور.

	شیدسنج-کالیوپ ۵۳۲ نانومتر			شیدسنج-مادیس ۵۵۰ نانومتر			شیدسنج-میزر ۵۵۵ نانومتر			شیدسنج-امی ۵۰۰ نانومتر		
	R^2	m	c	R^2	m	c	R^2	m	c	R^2	m	c
زنجان	۰.۶۲	۰.۶۱	۰.۰۵	۰.۴۰	۰.۳۱	۰.۰۱	۰.۵۴	۰.۶۸	۰.۰۷	۰.۲۹	۰.۵۹	۰.۱۴
کراچی	۰.۴۷	۰.۹۷	۰.۰۲	۰.۵۴	۰.۹۱	-۰.۱۳	۰.۷۹	۰.۷۸	۰.۰۴	۰.۵۵	۱.۱۱	۱.۱۱
لاهور	۰.۲۳	۰.۷۲	۰.۰۸	۰.۶۴	۱.۰۹	-۰.۰۶	۰.۵۷	۰.۵۴	۰.۱۱	۰.۵۱	۰.۷۷	۰.۷۷
جیپور	۰.۲۳	۱.۲۰	-۰.۰۱	۰.۷۳	۱.۵۵	-۰.۲۱	۰.۶۳	۰.۶۸	۰.۰۶	۰.۶۲	۱.۰۵	۱.۰۵
کانپور	۰.۳۶	۰.۸۳	۰.۰۷	۰.۶۱	۱.۳۶	-۰.۱۵	۰.۷۳	۰.۶۰	۰.۱۲	۰.۴۵	۰.۸۵	۰.۸۵

در مجموع مقدار عمق اپتیکی هواویزها در فصل بهار از ماه مارس تا ژوئن و تابستان از ماه جولای تا سپتامبر به بیشترین مقدار خود در شهر زنجان رسیده است. چرخه فصلی تغییرات عمق اپتیکی هواویزها در زنجان به گونه‌ای است که در فصل‌های کم بارش، هواویزها افزایش پیدا می‌کنند که بیشتر منشاء آن غبارهای خارجی است (بیات، ۱۳۹۲). هواویزهای ریزدانه که عمدتا ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند، عمده‌ترین منبع هواویز در منطقه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

زنجان محسوب می‌شوند. در بررسی‌های انجام شده مقادیر بالای عمق اپتیکی در زمان بروز پدیده‌های غباری در منطقه زنجان مشاهده می‌شود. با توجه به غالب بودن هواویزهای درشت دانه در فصول بهار و تابستان، میزان عمق اپتیکی در این فصول بیشتر است. رفتار نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های زمین‌پایه و ماهواره‌ای در منطقه زنجان تقریبا یکسان بوده است. اگرچه در مورد سنجنده مادیس از لحاظ زمان وقوع، بیشترین اختلاف با اندازه‌گیری‌های شبکه خودکار هواویزها وجود دارد. اما در بقیه موارد رفتار آن‌ها از نظر زمانی و مقداری تقریبا مشابه است. در طول اندازه‌گیری در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ بیشترین مقدار عمق اپتیکی هواویزها در ماه ژوئن سال ۲۰۱۳ توسط سنجنده کالیوپ به دست آمده است. مقدار میانگین عمق اپتیکی هواویزها برای سنجنده‌های امی و مادیس نسبت به اندازه‌گیری‌های شیدسنج‌خورشیدی بیشتر از یک و برای کالیوپ کمتر از یک است.

سپاسگزاری

از دکتر حمیدرضا خالصی‌فرد مسئول سایت اندازه‌گیری سنجش از دور دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های شیدسنج خورشیدی تشکر می‌کنیم.

منابع

بیات، علی،(۱۳۹۱). **دسته‌بندی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی**. رساله دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم‌پایه زنجان، دی ۱۳۹۱.

بیات، علی، (۱۳۷۸). **مطالعه پارامترهای اپتیکی جو زنجان با استفاده از شیدسنج خورشیدی**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم‌پایه زنجان، شهریور ۱۳۸۷.

Alam, K., Qureshi, S. and Blaschke, T. (2011). **Monitoring spatiotemporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model**. Atmospheric environment, 45(27), 4641-4651.

Alam, K., Sahar, N. and Iqbal, Y. (2014). **Aerosol characteristics and radiative forcing during premonsoon and postmonsoon seasons in an urban environment**. Aerosol Air Qual. Res, 14(1), 99-107.

Aubert, B., Bazan, A., Boucham, A., Boutigny, D., De Bonis, I., Favier, J., Gaillard, J.M., Jeremie, A., Karyotakis, Y., Le Flour, T. and Lees, J.P. (2002). **The BABAR detector**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 479(1), 11-16.

Bibi, H., Alam, K., Chishtie, F., Bibi, S., Shahid, I. and Blaschke, T. (2015). **Intercomparison of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the IndoGangetic plains and validation against AERONET data**. Atmospheric Environment, 111, 113-126.

Change, C. (2001). **The Scientific Basis–Cambridge**, United Kingdom and New York.

Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Zibordi, G., Chern, J.D., Mao, J., Li, C. and Holben, B.N. (2003). **Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, PP.108 (D21).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

Dubovik, O., Holben, B., Eck, T.F., Smirnov, A., Kaufman, Y.J., King, M.D., Tanré, D. and 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.

Eck, T.F., Holben, B.N., Reid, J.S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'neill, N.T., Slutsker, I. and Kinne, S. (1999). **Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 104(24), 31333-31349.

Fotiadi, A., Hatzianastassiou, N., Drakakis, E., Matsoukas, C., Pavlakis, K.G., Hatzidimitriou, D., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N. and Vardavas, I. (2006). **Aerosol physical and optical properties in the Eastern MediTerranean Basin, Crete, from Aerosol Robotic Network data**. Atmospheric Chemistry and Physics, 6(12), 5399-5413.

Geng, F., Liu, Q., Chen, Y., Hua, Z. and Xiaoqin, M. (2011). **Preliminary study of vertical distribution of aerosols during dry haze periods around Shanghai based on CALIPSO**. Procedia Earth and Planetary Science, 2, 217-222.

Habib, G., Venkataraman, C., Chiapello, I., Ramachandran, S., Boucher, O. and Reddy, M.S., (2006). **Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: Relationship to regional meteorology and emissions**. Atmospheric Environment, 40(11), 1909-1921.

olben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T. and Lavenu, F. (1998). **AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization**. Remote sensing of environment, 66(1), 116.

Huang, C., Ai, H., Li, Y. and Lao, S. (2007). **Highperformance rotation invariant multiview face detection**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29(4), 671-686.

Huang, J., Minnis, P., Yi, Y., Tang, Q., Wang, X., Hu, Y., Liu, Z., Ayers, K., Trepte, C. and Winker, D. (2007). **Summer Dust Aerosols Detected from CALIPSO Observations over the Tibetan Plateau**. Geophys. Res. Lett. 34.

Hyer, E.J., Reid, J.S. and Zhang, J. (2011). **An overland aerosol optical depth data set for data assimilation by filtering, correction, and aggregation of MODIS Collection 5 optical depth retrievals**. Atmospheric Measurement Techniques, 4(3), 379-408.

Ichoku, C., Chu, D.A., Mattoo, S., Kaufman, Y.J., Remer, L.A., Tanré, D., Slutsker, I. and Holben, B.N. (2002). **A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products**. Geophysical Research Letters, 29(12), pp.MOD11.

Jethva, H., Satheesh, S.K. and Srinivasan, J. (2007). **Assessment of second-generation MODIS aerosol retrieval (Collection 005) at Kanpur, India**. Geophysical Research Letters, pp. 34(19).

Kahn, R.A., Gaitley, B.J., Garay, M.J., Diner, D.J., Eck, T.F., Smirnov, A. and Holben, B.N., (2010). **Multiangle Imaging SpectroRadiometer global aerosol product assessment by comparison with the Aerosol Robotic Network**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, pp. 115(D23).

Kaufman, Y.J., Tanré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., Grassl, H., Herman, B.M., King, M.D. and 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., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A. and Holben, B.N. (1997). **Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate**

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

resolution imaging spectroradiometer. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D14), 17051-17067.

Kosmopoulos, P.G., Kaskaoutis, D.G., Nastos, P.T. and Kambezidis, H.D. (2008). **Seasonal variation of columnar aerosol optical properties over Athens, Greece, based on MODIS data**. Remote Sensing of Environment, 112(5), 2354-2366.

Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F. and Kaufman, Y.J. (2007). **Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D13).

Li, D.F. and Yang, J.B. (2004). **Fuzzy linear programming technique for multi attribute group decision making in fuzzy environments**. Information Sciences, 158, 263-275.

Liu, J., Xia, X., Li, Z., Wang, P., Min, M., Hao, W., Wang, Y., Xin, J., Li, X., Zheng, Y. and Chen, Z. (2010). **Validation of multi angle imaging spectroradiometer aerosol products in China**. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 62(2), 117-124.

Liu, J., Zheng, Y., Li, Z. and Wu, R. (2008). **Ground based remote sensing of aerosol optical properties in one city in Northwest China**. Atmospheric Research, 89(12), 194-205.

Ma, X. and Yu, F. (2014). **Seasonal variability of aerosol vertical profiles over east US and west Europe: GEOSChem/APM simulation and comparison with CALIPSO observations**. Atmospheric research, 140, 28-37.

Martonchik, J.V., Diner, D.J., Kahn, R.A., Ackerman, T.P., Verstraete, M.M., Pinty, B. and Gordon, H.R. (1998). **Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multi angle imaging**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4), pp.1212-1227.

Masoumi, A., Khalesifard, H.R., Bayat, A. and Moradhaseli, R. (2013). **Retrieval of aerosol optical and physical properties from groundbased measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran**. Atmospheric research, 120, 343-355.

Mishchenko, M.I., Hovenier, J.W. and Travis, L.D. (1999). **Light scattering by nonspherical particles: theory, measurements, and applications**. Academic Press.

Myhre, G., Stordal, F., Johnsrud, M., Diner, D.J., Geogdzhayev, I.V., Haywood, J.M., Holben, B.N., HolzerPopp, T., Ignatov, A., Kahn, R.A. and Kaufman, Y.J. (2005). **Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean during the period September 1997 to December 2000**. Atmospheric Chemistry and Physics, 5(6), 1697-1719.

Prasad, A.K., Singh, S., Chauhan, S., Srivastava, M.K., Singh, R.P., Singh, R. (2007). **Aerosol radiative forcing over the Indo-Gangetic plains during major dust storms**. Atmos. Environ. 41, 6289-6301.

Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. and Gill, T.E. (2002). **Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product**. Reviews of geophysics, 40(1), pp.21.

Qi, Y., Ge, J. and Huang, J. (2013). **Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET**. Chinese science bulletin, 58(20), 2497-2506.

Ramachandran, S. and Kedia, S. (2013). **Aerosol optical properties over South Asia from groundbased observations and remote sensing: a review**. Climate, 1(3), 84-119.

Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G. and Eck, T.F. (2005). **The MODIS aerosol algorithm, products, and validation**. Journal of the atmospheric sciences, 62(4), 947-973.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]

Santese, M., De Tomasi, F. and Perrone, M.R. (2007). **AERONET versus MODIS aerosol parameters at different spatial resolutions over southeast Italy**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D10).

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K. and Marquis, M. eds. (2007). **Climate change 2007the physical science basis**, Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge university press.

Tang, Y., Carmichael, G.R., Woo, J.H., Thongboonchoo, N., Kurata, G., Uno, I., Streets, D.G., Blake, D.R., Weber, R.J., Talbot, R.W. and Kondo, Y. (2003). **Influences of biomass burning during the Transport and Chemical Evolution Over the Pacific (TRACE-P) experiment identified by the regional chemical transport model**. Journal of geophysical research: atmospheres, 108(D21).

Winker, D.M., Hunt, W.H. and McGill, M.J. (2007). **Initial performance assessment of CALIOP**. Geophysical Research Letters, 34(19).

Winker, D.M., Pelon, J., Coakley Jr, J.A., Ackerman, S.A., Charlson, R.J., Colarco, P.R., Flamant, P., Fu, Q., Hoff, R.M., Kittaka, C. and Kubar, T.L. (2010). **The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds**. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(9), 1211-1230.

Winker, D.M., Pelon, J.R. and McCormick, M.P. (2003). **The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds**. In Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III (Vol. 4893, pp. 112). International Society for Optics and Photonics.

Winker, D.M., Vaughan, M.A., Omar, A., Hu, Y., Powell, K.A., Liu, Z., Hunt, W.H. and Young, S.A. (2009). **Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(11), 2310-2323.

Wong, M.S., Shahzad, M.I., Nichol, J.E., Lee, K.H. and Chan, P.W. (2013). **Validation of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical thickness using ground based sunphotometers in Hong Kong**. International journal of remote sensing, 34(3), 897-918.

Zhang, J. and Christopher, S.A. (2003). **Longwave radiative forcing of Saharan dust aerosols estimated from MODIS, MISR, and CERES observations on Terra**. Geophysical Research Letters, 30(23).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1400.21.62.10.0]
[DOI: 10.52547/jgs.21.62.201]