

## تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور در دو منطقه شهری در ایران

مسعود خوش سیما<sup>۱\*</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۲</sup> و فرهنگ احمدی گیوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۲/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۱/۱/۰۵)

### چکیده

برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از تعیین عمق نوری هواویزها (AOD) کاربرد بسیاری در تحقیقات مرتبط با آلودگی هوا دارد. در مقاله حاضر عمق نوری هواویزها در زنجان و تهران درحکم نمونه‌هایی از مناطق شهری و آبرشهری در دوره دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ بررسی شده است. بدین منظور از داده‌های حسگر مادیس و همچنین نورسنج خورشیدی مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و دید افقی ایستگاه‌های همدیدی واقع در موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و زنجان، در تعیین AOD استفاده شده است. داده‌های نورسنج خورشیدی برای ارزیابی درستی داده‌های به‌دست آمده با حسگر مادیس و دید افقی در زنجان به کار رفته که دقت زیاد اندازه‌گیری‌های مادیس را نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها با حسگر مادیس و نورسنج خورشیدی در زنجان، همبستگی این دو عمق نوری را با ضریب ۰/۸۷ نشان می‌دهد. مقادیر AOD برآورد شده از دید افقی همراه با نتایج اندازه‌گیری‌های نورسنج خورشیدی (با ضریب همبستگی ۰/۶۲) نیز برای ارزیابی میزان درستی استفاده از داده‌های دید در تعیین میزان عمق نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر است. به‌علاوه، وجود همبستگی بین داده‌های مادیس و نتایج حاصل از داده‌های دید افقی (در حد ۰/۶۶ برای زنجان و ۰/۲۳ برای تهران) بیانگر امکان استفاده از داده‌های دید به‌صورت کمی به‌منزله منبع اطلاعاتی ثانویه و جایگزین اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای در تحقیقات آلودگی هوا به شکل روزانه است و این داده‌ها به‌صورت روزانه و ساعتی در ایستگاه‌های همدیدی به فواصل کم، در دسترس هستند.

واژه‌های کلیدی: عمق نوری هواویزها، دید افقی، نورسنج خورشیدی، مادیس، مناطق شهری و آبرشهری

## Evaluation of aerosol optical depth using visibility and remote sensing data in urban and semi urban areas in Iran

Khoshsima, M.<sup>1</sup>, Bidokhti, A. A.<sup>2</sup> and Ahmadi-Givi, F.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran.

(Received: 07 May 2012, Accepted: 25 Dec 2012)

### Abstract

Remote sensing of aerosol optical depth (AOD) could be used to assess particulate matter levels at the ground; however, such measurements often need further validation. AOD is a measure of aerosol loading in the atmosphere, which means a higher AOD shows a higher aerosol loading and thus lower visibility. Aerosol concentration, determined by AOD, affects air quality in urban and semi-urban environments.

E-mail: khoshsima1805@gmail.com

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۵۴۸

تلفن: ۰۹۱۲۲۳۸۷۴۵۲

\*نگارنده رابط:

Visibility is defined as the distance at which a large dark object can just be discerned against a light sky. Visibility degradation is the most obvious manifestations of pollution, which is mainly due to absorption and scattering effects of aerosols in the atmosphere. Thus, visibility can also reflect the local air quality. In this paper an overall study for assessing aerosol optical thickness over Zanjan and Tehran area, representatives of semi urban and urban areas in Iran, are presented.

In this study, aerosol optical depth retrieved by; 1) measurements of the MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) on board NASA's Terra and Aqua satellites, 2) sun-photometer measurements from a Cimel sun-photometer located in Zanjan area and 3) visibility measurements taken from Geophysics Institute of Tehran University and Zanjan synoptic stations. The data were collected from Decembere 2009 to September 2010 for both stations.

Our objectives in this study are, to validate the MODIS AOD measurements, to find the possibilities of establishing near-real time AOD retrievals based on visibility data and to determine the atmospheric pollution of the study area, on a local scale.

The sun-photometer was used for the validation of both MODIS and visibility data at Zanjan area. Validation of MODIS AOD retrievals is presented for the first time in Iran. The results obtained by the direct comparison between MODIS and sun-photometer AOD data exhibited a significant correlation ( $r=0.87$ ). We have also compared the AOD retrieved by sun-photometer to visibility data in Zanjan area to verify the formula which is used to estimate AOD from visibility data. A significant correlation ( $r=0.62$ ) between sun-photometer AOD and that estimated from visibility measurements was found.

A relationship between MODIS AOD and AOD estimated from visibility values was also examined for both locations. Correlation coefficient was found 0.66 for Zanjan and 0.23 for Tehtan area. It is concluded that MODIS AOD data provide more accurate information on the aerosol content in Zanjan than for Tehran area.

The major finding derived from this study suggests that MODIS AOD data provide relatively accurate information of the aerosol loading, in terms of aerosol optical depth. While in the absence of such data, visibility measurements could be used as a secondary source of aerosol load information in such a semi urban area. The advantage of using visibility data is that such data are available every hour on each day from meteorological stations and provide useful information on a near-real time basis, whenever data are available.

**Keywords:** Aerosol optical depth, Visibility, Sun-photometer, MODIS, Urban and semi urban areas

## ۱ مقدمه

(۲۰۰۰). این اثر به صورت واداشت تابشی هواویزهای جوئی اعمال می شود. به طور کلی، اثر هواویزها بر بودجه و تعادل تابشی در جو به همراه موضوع آلودگی هوا را می توان اثر مستقیم هواویزها دانست. براساس گزارش هیئت رئیسه بین دولتی تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC) (سولمون و همکاران، ۲۰۰۷)، میانگین جهانی واداشت تابشی هواویزها، برخلاف گازهای گلخانه ای، منفی و اندازه آن در حالت کلی

هواویزهای جوئی ذرات جامد و مایع معلق در هوا هستند که می توانند توسط چشمه های طبیعی (ذرات گرد و غبار، نمک دریا و ذرات ناشی از فعالیت های آتش فشانی) و چشمه های انسان ساخت (Anthropogenic) (از قبیل فعالیت های صنعتی، حمل و نقل و سوخت) ایجاد شوند (سینفلد و پانديس، ۱۹۹۸). در نظر گرفتن تاثیر هواویزها بر بودجه تابشی جو در مدل های اقلیمی موجب یکی از بزرگ ترین عدم قطعیت ها می شود (هیوود و بوچر،

مشخص‌کننده کیفیت هوا است و در مقاصد تحقیقات آلودگی هوا کاربرد دارد. مقادیر بیشتر AOD بیانگر انباشت بیشتر هواویزها در ستون جو و در نتیجه دید افقی کمتر است (ونگ و کریستوفر، ۲۰۰۳). دید افقی به معنای بیشینه فاصله‌ای است که جسم در جو قابل مشاهده است و مقدار آن با جذب و خاموشی نور در اثر مولکول‌های گاز و ذرات تعیین می‌شود. بنابراین، دید نیز یک نشانگر مشاهداتی ساده از کیفیت هوا به شمار می‌رود. با افزایش فعالیت‌های انسانی در سال‌های اخیر، غلظت ذرات معلق موجود در جو افزایش و دید افقی کاهش یافته است.

از هواویزهای تاثیرگذار بر عمق نوری جو و به دنبال آن کمیت دید افقی، می‌توان به ذرات ریز (آلاینده‌های جو) و ذرات درشت (گرد و غبار) اشاره کرد. بومر و همکاران (۲۰۰۸) تحقیقات پیشین درباره همبستگی میان دید و خصوصیات هواویزها در آمریکا و اروپا را بررسی کردند و روشن ساختند که انباشت هواویزها در جو با غلظت‌های متفاوت، شرایط نورشناخت جو و به دنبال آن دید افقی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای تعیین دقت AOD اندازه‌گیری شده با حسگر مادیس (تابش سنج طیفی (اسپکترورادیومتر) تصویربردار با تفکیک متوسط) با استفاده از اندازه‌گیری زمینی نورسنج خورشیدی، تحقیقات بسیاری در جهان صورت گرفته است (برای نمونه: شاپ و همکاران، ۲۰۰۸؛ رمر و همکاران، ۲۰۰۵؛ لوی و همکاران، ۲۰۰۵؛ لی و همکاران، ۲۰۰۵؛ چو و همکاران، ۲۰۰۲). رتالیس و میسالدیز (۲۰۰۹) نیز تحقیقی در زمینه دید و داده‌های AOD مادیس برای پدیده‌های گرد و غبار روی قبرس به انجام رسانده‌اند.

برای پایش دقیق توزیع ذرات معلق و آلاینده‌های جو از ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی نورسنج خورشیدی استفاده می‌شود. شبکه اندازه‌گیری‌های زمینی عموماً بسیار پراکنده و نادرند و برآورد کیفیت هوا در مکان‌هایی که این ایستگاه‌ها موجود نباشند، دقت

احتمالاً قابل‌مقایسه با واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای جو و گاهی از آن بزرگ‌تر است. نکته دیگر آنکه برخلاف گازهای گلخانه‌ای، اثرات تابشی هواویزهای گوناگون، هنوز به‌خوبی مشخص نیست و اطلاع از خصوصیات تابشی آنها امری ضروری است. از این رو، هرگونه تحقیق در زمینه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و نوری هواویزها می‌تواند در درک بهتر هواویزهای جو یک منطقه و اثر آن بر تغییر اقلیم، بسیار حائز اهمیت باشد. به‌علاوه، با توجه به شواهد فراوانی که نشانگر اثر ذرات و گازهای جو بر سلامتی انسان‌ها است، تمایل پژوهشگران به چنین تحقیقاتی دو چندان شده است (داکری و همکاران، ۱۹۹۳؛ لیوین و رلاف، ۲۰۰۲).

برای بررسی هواویزها و آلاینده‌های جو، به‌خصوص ذرات معلق موجود در جو (با منشأ طبیعی و انسان‌ساز)، معمولاً از پارامتر عمق نوری هواویزها (Aerosol Optical Depth) (AOD) استفاده می‌شود. عمق نوری یا ضخامت نوری هواویزها کمیته بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد و بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از هواویزها در مسیر عبوری نور است (سازمان هواشناسی جهانی، ۱۹۹۵). به بیان دیگر، AOD مجموع ضرایب خاموشی جو برای یک طول موج خاص در هر لایه از جو و معیاری از میزان هواویزهای موجود در جو است.

یکی از راه‌های تعیین عمق نوری هواویزها، استفاده از روش‌های سنسج از دور است. از آنجا که میزان جذب و پراکنش نور را می‌توان از مقدار کاهش شدت نور مستقیم خورشید تعیین کرد، عمق نوری از روی طیف خورشیدی و با اندازه‌گیری مستقیم تابش به کمک دستگاه نورسنج خورشیدی (Sun Photometer) زمینی و یا استفاده از بازتاب تابش سطحی دریافتی با حسگرهای ماهواره‌ای محاسبه می‌شود. این مقدار تا حدودی

خورشید در طول موج‌ها و زاویه‌های سوسوی خورشیدی متفاوت را دریافت و قابلیت عبوردهی جو را تعیین می‌کند (دیرمندجیان، ۱۹۸۰). این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری مستقیم نور خورشید را دارد. میزان شدت نور خورشید در بام جو، با شدت نوری که به سطح زمین می‌رسد، به علت جذب و پراکنش نور خورشید در مسیر عبور از جو، متفاوت است. از آنجا که نور رسیده به نورسنج خورشیدی تبدیل به ولتاژ می‌شود، اختلاف ولتاژ به دست آمده از دستگاه به نوعی مرتبط با پراکندگی هواویزها در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیس است. بنابراین، اساس کار نورسنج های خورشیدی بر پایه تبدیل نور به ولتاژ است. با استفاده از قانون بیر-لامبرت، رابطه شدت نور و عمق نوری جو به صورت زیر است:

$$I = I_0 \exp(-\tau_\lambda / \cos Z) \quad (1)$$

که در آن،  $I_0$  و  $I$  به ترتیب شدت نور رسیده به بام جو و سطح زمین،  $Z$ ، زاویه سوسوی خورشید و  $\tau_\lambda$  عمق نوری جو است که با استفاده از آن می‌توان عمق نوری هواویزها را به دست آورد (ایکبال، ۱۹۸۳).

نورسنج خورشیدی مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان که برای این تحقیق استفاده شده است، با طول موج‌های ۴۴۰، ۶۷۰، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر کار می‌کند و از نوع نورسنج خورشیدی سیمل (Cimel sunphotometer) است که به دلیل کوچک بودن دهانه این دستگاه، شدت نور اندازه‌گیری شده، تحت تاثیر نورهای پراکنشی از ناحیه جو قرار نمی‌گیرد. این کار باعث کاهش بروز خطا در محاسبه عمق نوری هواویزها می‌شود. نورسنج خورشیدی سیمل، نور خورشید را مستقیماً دریافت می‌کند و شامل قسمت‌هایی مانند بخش اصلی اپتیکی، بخش الکترونیکی و روپات است. در جعبه الکترونیکی آن دو ریزپردازنده وجود دارد که یکی مسئول جمع‌آوری داده‌ها است و دیگری مسئولیت موتور گرداننده خودکار را بر عهده دارد (شکل ۱).

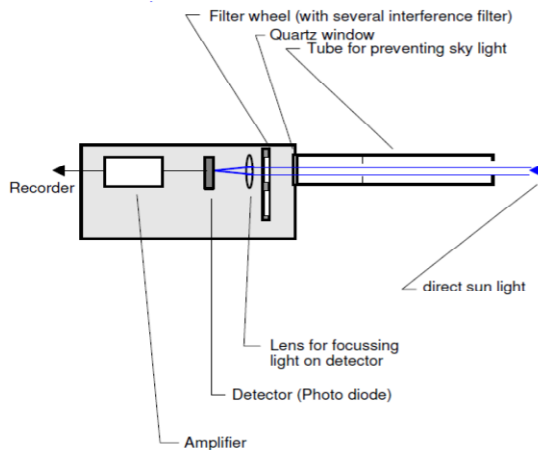
قابل قبولی ندارد. بنابراین لازم است که از منابع داده‌ای دیگری برای بررسی آلودگی هوا و کیفیت هوا استفاده شود که داده‌های سنجش از جمله این منابع است. ماهواره‌ها ابزاری مناسب و قابل دسترس با پوشش زیاد برای چنین اندازه‌گیری به شمار می‌روند؛ ولی به علت خطاهایی که ممکن است در اندازه‌گیری‌ها وجود داشته باشد، ضرورت دارد که داده‌ها اعتبارسنجی شود. همچنین، دید افقی نیز منبع دیگری برای استخراج کمیت عمق نوری هواویزها است. در مناطق وسیعی که امکان اندازه‌گیری نورسنج خورشیدی وجود ندارد، می‌توان AOD را با استفاده از این پارامتر تعیین کرد. از آنجا که AOD با غلظت آلاینده‌ها می‌تواند همبستگی داشته باشد، در این صورت از مقادیر برآورد شده AOD می‌توان در حکم منبعی برای تحقیقات آلودگی هوا استفاده کرد. در مقاله حاضر، نتایج حاصل از بررسی داده‌های عمق نوری هواویزهای حس گر مادیس ماهواره‌های آکوا (Aqua) و ترا (Terra) و همچنین اندازه‌گیری‌های دستگاه نورسنج خورشیدی (نورسنج خورشیدی) و داده‌های دید افقی دو ایستگاه هواشناسی شهرهای تهران (منطقه آبرشهر) و زنجان (منطقه شهری) در دوره تحقیقاتی دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ عرضه می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، ابتدا ارزیابی اندازه‌گیری حس گر مادیس از عمق نوری هواویزها در این دو منطقه و سپس بررسی امکان تعیین AOD ساعتی براساس داده‌های دید افقی برای مشخص کردن آلودگی جو در مقیاس محلی است.

## ۲ داده‌ها

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در این پژوهش از سه دسته داده به شرح زیر استفاده شده است.

### ۱-۲ داده‌های عمق نوری هواویزها حاصل از نورسنج خورشیدی

نورسنج خورشیدی دستگاهی است که پرتو باریک



شکل ۱. تصویری از یک دستگاه نورسنج خورشیدی سیمبل به همراه بخش‌های اصلی آن؛ عکس سمت راست، دستگاه را در وضعیت اندازه‌گیری نشان می‌دهد.

در نورسنج‌های خورشیدی سیمبل، دقت اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ با در نظر گرفتن  $m=2$  برای توده هوا است (رینواتر و گریگوری، ۲۰۰۵). خطاهای ناشی از نبود واسنجی و تغییرات دمایی هوا نیز کمتر از ۸ درصد است (لاندولفو و همکاران، ۲۰۰۳). نورسنج‌های خورشیدی سیمبل معمولاً ۵ تا ۸ کانال اندازه‌گیری طول موج دارند که طول موج ۹۳۶ نانومتر برای جذب بخار آب و طول موج‌های ۵۰۰ و ۶۷۰ نانومتر مربوط به جذب ازن است. مهم‌ترین منبع خطا در اندازه‌گیری‌ها، تاثیر ابر، به‌ویژه ابرهای پُرسا (سیروس) است. برای جلوگیری از خطای ناشی از ابر، روزهای بدون ابر برای اندازه‌گیری انتخاب شده است. از داده‌های نورسنج خورشیدی فوق برای ارزیابی هواویزهای به‌دست آمده از اطلاعات مادیس استفاده شده است. داده‌های نورسنج خورشیدی به فاصله زمانی حدود ۱۵ دقیقه پس از عبور ماهواره خوانده می‌شود.

در نورسنج‌های خورشیدی سیمبل، دقت اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ با در نظر گرفتن  $m=2$  برای توده هوا است (رینواتر و گریگوری، ۲۰۰۵). خطاهای ناشی از نبود واسنجی و تغییرات دمایی هوا نیز کمتر از ۸ درصد است (لاندولفو و همکاران، ۲۰۰۳). نورسنج‌های خورشیدی سیمبل معمولاً ۵ تا ۸ کانال اندازه‌گیری طول موج دارند که طول موج ۹۳۶ نانومتر برای جذب بخار آب و طول موج‌های ۵۰۰ و ۶۷۰ نانومتر مربوط به جذب ازن است. مهم‌ترین منبع خطا در اندازه‌گیری‌ها، تاثیر ابر، به‌ویژه ابرهای پُرسا (سیروس) است. برای جلوگیری از خطای ناشی از ابر، روزهای بدون ابر برای اندازه‌گیری انتخاب شده است. از داده‌های نورسنج خورشیدی فوق برای ارزیابی هواویزهای به‌دست آمده از اطلاعات مادیس استفاده شده است. داده‌های نورسنج خورشیدی به فاصله زمانی حدود ۱۵ دقیقه پس از عبور ماهواره خوانده می‌شود.

۲-۲ داده‌های عمق نوری هواویزها از حس‌گر مادیس ماهواره‌های آکوا و ترا متعلق به مؤسسه ملی هوافضای امریکا (National Aeronautics and Space)

پیکسل‌های شامل ابر، آب، یخ، برف و پوشش گیاهی، (۲) برآورد میزان بازتابش سطح با در نظر گرفتن تغییرات فصلی از بانک داده‌های بازتابی، (۳) استفاده از روش بیشینه احتمال رخداد (Maximum Likelihood) برای تعیین مدل هواویز بهینه با الگوریتم دو کانالی برای هواویزهای با غلظت کم و متوسط و الگوریتم سه کانالی برای غلظت زیاد، (۴) محاسبه عمق نوری هواویزها و سایر پارامترهای نوری (لوی و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۲-۳ میدان دید افقی

میدان دید، بیشینه فاصله‌ای است که یک جسم واقع در آن قابل مشاهده است. ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی کشور دیدبانی‌های لازم را به شکل منظم و در ساعت‌های مشخص در طی شبانه روز عملی می‌سازند. این فرایند شامل جمع‌آوری کمیت‌های متفاوت هواشناختی از جمله دما، رطوبت نسبی، تندی و جهت باد، گزارش هوای حاضر و میدان دید افقی است. برآورد دید می‌تواند تحت تاثیر نقص سامانه آشکارسازی (دیده‌بان) و یا محیط جداکننده (برای مثال در حضور مه) قرار گیرد (هوروات، ۱۹۹۵). اندازه‌گیری‌های دید به کار رفته در این پژوهش را دیده‌بان‌های آموزش‌دیده و با تجربه عملی ساخته‌اند. در این تحقیق از داده‌های میدان دید افقی در دو ایستگاه ژئوفیزیک تهران و شهر زنجان استفاده شده که دوره زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ را پوشش می‌دهد. اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های همدیدی در این تحقیق، دارای اختلاف زمانی یک ساعته با داده‌های مادیس است.

### ۳ بحث نتایج

۳-۱ مقایسه عمق نوری حاصل از داده‌های مادیس و نورسنج خورشیدی  
همان‌طور که پیش از این ذکر شد، یکی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری توزیع ذرات معلق و آلاینده‌های

آکوا نیز در ساعت ۱۰:۳۰ ظهر و ۱:۳۰ شب است. از تصاویر به‌دست آمده در شب (ساعت ۱۰:۳۰ و ۱:۳۰)، نمی‌توان AOD را تعیین کرد؛ بنابراین، این ساعت‌ها در تحقیق کنونی قابل استفاده نیستند و حذف شده‌اند.

حس‌گر مادیس مجموع درخشندگی خورشیدی پراکنده شده در جو و نور بازتاب شده از سطح و تضعیف شده در اثر عبور از جو را اندازه‌گیری می‌کند. شدت بازتاب از سطح بستگی به زاویه سوسو، محل ماهواره و خصوصیات بازتابندگی پوشش سطحی دارد. الگوریتمی که AOD را محاسبه می‌کند، از دقت مکانی ۲۵۰ متر (نوارهای ۴۷۰ و ۵۵۰ نانومتر) و حس‌گر مادیس استفاده و محصول آماری با دقت ۱۰×۱۰ کیلومتر را ایجاد می‌کند (کافمن و همکاران، ۲۰۰۳). الگوریتمی که با استفاده از آن هواویزهای جوی آشکارسازی می‌شوند، موسوم به MOD04 است که اساس آن بر تحلیل بازتاب‌های سطحی در هفت طول موج (۰/۴۷ تا ۲/۱۳ میکرومتر) روی اقیانوس و دو طول موج (۰/۴۷ و ۰/۶۷ میکرومتر) روی خشکی است.

در این تحقیق از داده‌های AOD حس‌گر مادیس ماهواره‌های ترا و آکوا (MOD04\_L2, MYD04\_L2) در نوار ۵۵۰ نانومتر و با دقت مکانی ۱۰×۱۰ کیلومتر استفاده شده است. سه الگوریتم برای تعیین هواویزها با استفاده از حس‌گر مادیس وجود دارد که یکی روی اقیانوس (رمر و همکاران، ۲۰۰۵؛ تنره و همکاران، ۱۹۹۷) و دو مورد دیگر روی خشکی واقع و موسوم به الگوریتم‌های دارک پیکسل (Dark Pixel) و دیپ بلو (Deep Blue) هستند (رمر و همکاران، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹).

در این پژوهش، برای به‌دست آوردن AOD از داده‌های ماهواره، الگوریتم دیپ بلو به کار رفته است. اساس این الگوریتم، استفاده از طول موج‌های آبی و بانک داده‌های بازتابش سطوح متفاوت است. فرایندهای الگوریتم دیپ بلو عبارت است از: (۱) تصحیح عوارض ناخواسته تصویر

### ۲-۳ مقایسه عمق نوری حاصل از داده‌های نورسنج خورشیدی و دید افقی

عمق نوری هواویزها را می‌توان از دید افقی نیز با استفاده از روابط ریاضی به‌دست آورد (ورموت و همکاران، ۲۰۰۲). بنابراین در مناطق یا زمان‌هایی که امکان اندازه‌گیری نورسنج خورشیدی و سنجش از دور وجود ندارد، از دید افقی استفاده می‌شود. از این رو لازم است درستی رابطه ریاضی با اندازه‌گیری‌های میدانی نورسنج خورشیدی ارزیابی شود.

غلظت زیاد هواویزها با مقادیر بزرگ AOD مشخص می‌شود. از سوی دیگر، تعداد بیشتر هواویزها در جو باعث پراکندگی بیشتر نور و در نتیجه کاهش میزان دید می‌شود. به‌طور کلی، AOD اندازه‌گیری شده با نورسنج خورشیدی و ماهواره، بیانگر ضخامت نوری هواویزها در راستای قائم است؛ یعنی این مقادیر مطابق با انتگرال ضریب خاموشی هواویزها در ستون قائم جو است. برعکس، دید افقی نشانگر چگونگی ضریب خاموشی جو در راستای افقی است. ورموت و همکاران (۲۰۰۲) رابطه‌ای به‌صورت زیر بین دید افقی و ضخامت نوری هواویزها با استفاده از داده‌های سامانه ماهواره‌ای (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) NPOESS به‌دست آوردند:

$$V = 3.449 / (AOD_{550} - 0.08498) \quad (2)$$

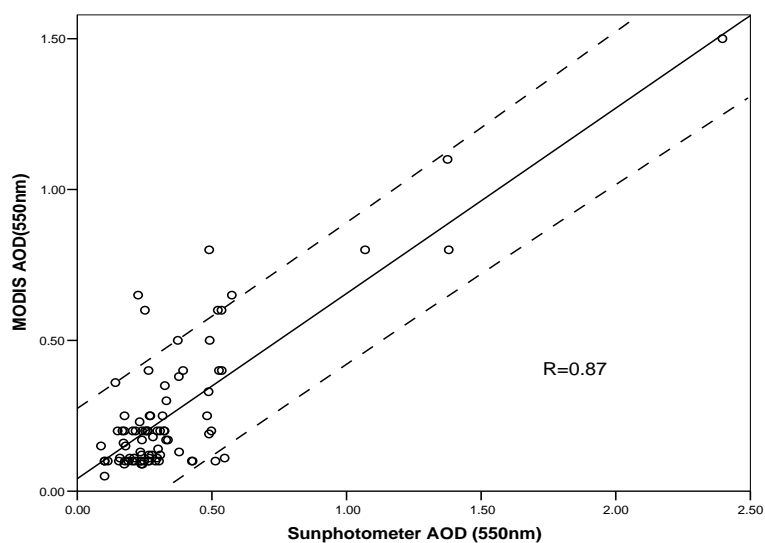
که در آن، V بیانگر دید برحسب کیلومتر و AOD<sub>550</sub> معرف ضخامت نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر است. رابطه بالا برای مقادیر AOD کمتر و یا مساوی ۰/۰۸۴۹۸ معتبر نیست و این مقدار AOD در منطقه مورد بررسی مشاهده نشد. در این پژوهش، از رابطه (۲) برای برآورد AOD<sub>550</sub> حاصل از اندازه‌گیری‌های دید در دو شهر زنجان و تهران استفاده شده است. برای واسنجیدن رابطه، مقایسه مقادیر AOD برآورد شده از دید و مربوط

جوی، استفاده از اندازه‌گیری زمینی نورسنج خورشیدی است. ولی به‌علت پراکندگی ایستگاه‌های زمینی، برآورد کیفیت هوا در محل‌هایی که این ایستگاه‌ها موجود نباشند، دقت زیادی ندارد و استفاده از داده‌های ماهواره درحکم ابزار تکمیلی چنین مطالعاتی پیشنهاد می‌شود. به‌علت وجود خطاهای ممکن در این اندازه‌گیری‌ها، معمولاً داده‌های حاصل از ماهواره در نقاطی که اندازه‌گیری زمینی نیز وجود دارد، اعتبارسنجی می‌شود.

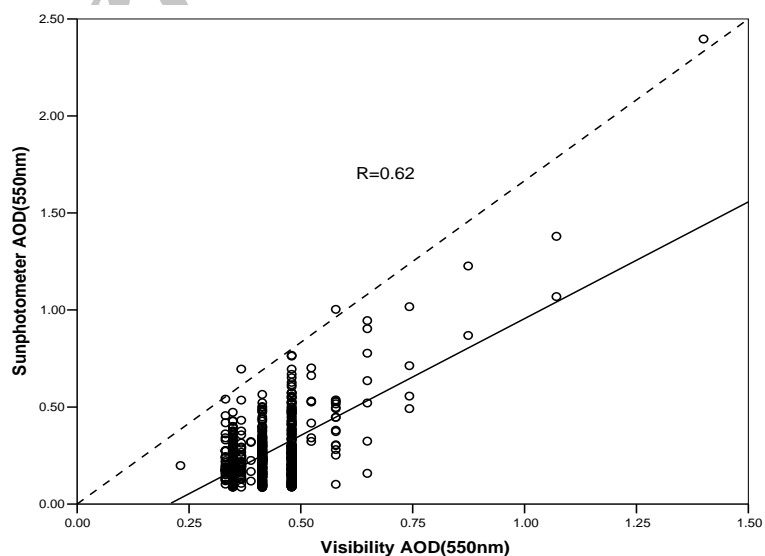
شکل ۲ ارزیابی نتایج اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها با حس‌گر مادیس و نورسنج خورشیدی را در زنجان نشان می‌دهد. این دو عمق نوری شدیداً به هم وابسته (۲ پیرسون = ۰/۸۷) و ضرایب همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار هستند. معادله همبستگی خطی نیز به‌صورت  $AOD_{MODIS} = 0.04 + 0.61 AOD_{Sunph}$  است. AOD<sub>MODIS</sub> عمق نوری حاصل از حس‌گر مادیس و AOD<sub>Sunph</sub> عمق نوری حاصل از نورسنج خورشیدی است. متوسط AOD اندازه‌گیری شده با مادیس برابر ۰/۲۷ و با نورسنج خورشیدی برابر ۰/۳۷ است. تفاوت ناچیز بین داده‌های حاصل از مادیس و دستگاه نورسنج خورشیدی احتمالاً ناشی از نبود تطابق کامل پهنای نوار ماهواره و نوار طیفی نورسنج خورشیدی و همچنین اختلاف فاصله زمانی حدود ۱۵ دقیقه بین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته با دو دستگاه است که در نوار ۵۵۰ نانومتر استفاده شده است. رتالیس و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق روی قبرس، ضریب همبستگی بین دو عمق نوری فوق را برابر ۰/۸۳ به‌دست آورده‌اند. به‌علاوه، در همه ایستگاه‌های موجود در اروپا چنین بررسی‌هایی صورت پذیرفته است و نتایج ضریب همبستگی حداقل ۵۰٪ را نشان می‌دهد (شاپ و همکاران، ۲۰۰۸؛ بامر و همکاران، ۲۰۰۸).

با نتایج رتالیس و همکاران (۲۰۱۰) که ضریب همبستگی ۰/۷ به دست آورده‌اند، تطابق دارد. هاند و همکاران (۲۰۰۴) نیز با به دست آوردن ضریب همبستگی ۰/۸۷ در منطقه تگزاس نتیجه گرفتند که دید افقی، معیار خوبی برای بیان عمق نوری هواویزها در آن منطقه است.

به داده‌های نورسنج خورشیدی در زنجان در شکل ۳ نشان داده شده است. ضریب همبستگی معادل ۰/۶۲ بیانگر رابطه قابل قبول بین این دو کمیت است. معادله همبستگی خطی نیز به صورت  $AOD_{Sunph} = 1.204 AOD_{Vis} - 0.24$  است، که عمق نوری برآورد شده از دید است. نتایج این پژوهش

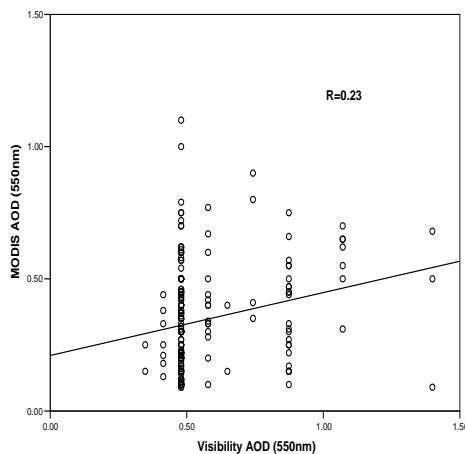


شکل ۲. مقایسه عمق نوری هواویزها حاصل از حسگر مادیس و نورسنج خورشیدی در زنجان از دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰؛ خط چین نشانگر سطح اعتماد ۷۹٪ است.

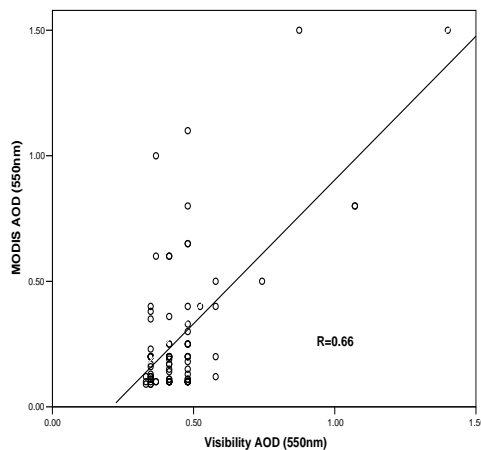


شکل ۳. مقایسه بین مقادیر AOD برآورد شده از دید و حاصل از نورسنج خورشیدی در زنجان برای دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰.





(ب)



(الف)

شکل ۴. مقایسه بین مقادیر AOD برآورد شده از دید و حاصل از داده‌های مادیس برای ایستگاه ژئوفیزیک تهران (الف) و زنجان (ب) از دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰.

ناشی از موارد زیر باشد: الف) تفاوت دقت مکانی حس گر مادیس در مقایسه با اندازه‌گیری نقطه‌ای دید، ب) استفاده از فرض همگنی؛ اکثر آلاینده‌های جوئی در لایه مرزی منتشر می‌شوند و از راه فرایندهای تلاطمی (همرفتی و مکانیکی) لایه آمیخته همگن می‌شوند. از این رو عمق لایه آمیخته و رشد لایه مرزی در حکم عاملی کلیدی در پخش آلاینده‌ها مطرح است. به دلیل اینکه ماهواره عمق نوری هواویزهای جوئی را در راستای قائم اندازه‌گیری می‌کند و دید در راستای افقی اندازه‌گیری می‌شود، لازم است لایه مرزی به صورت همگن در نظر گرفته شود تا دو راستای اندازه‌گیری بیشترین شباهت را به یکدیگر داشته باشند (آلفولدی و همکاران، ۲۰۰۷)، ج) تفاوت زمانی بین اندازه‌گیری مقادیر AOD مادیس و دید افقی؛ ممکن است توزیع فضایی ذرات معلق در جو و غلظت آنها در زمان عبور ماهواره از نقطه مورد نظر و زمان گزارش دیده‌بان ایستگاه هواشناسی با یکدیگر متفاوت باشد، د) نبود تصحیحات جوئی به صورت دقیق و محلی در بازتابش رسیده به حس گر ماهواره؛ اجرای این تصحیحات مستلزم داشتن

۳-۳ مقایسه عمق نوری حاصل از داده‌های مادیس و

دید افقی

در تحقیق حاضر، از داده‌های عمق نوری مربوط به حس گر مادیس برای مقایسه با مقادیر برآورد شده AOD حاصل از اندازه‌گیری‌های دید افقی با استفاده از فرمول پیشنهادی ورموت و همکاران (۲۰۰۲) در ساعت‌های عبور ماهواره از دو ایستگاه همدیدی ژئوفیزیک تهران و زنجان استفاده شده است. تحلیل ضریب همبستگی نشان می‌دهد که بین مقادیر برآوردی AOD حاصل از داده‌های دید افقی و مقادیر به دست آمده از حس گر مادیس در هر دو ایستگاه، همبستگی معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ وجود دارد (شکل ۴) و ضریب همبستگی در منطقه زنجان (۰/۶۶) نسبت به ایستگاه ژئوفیزیک تهران (۰/۲۳) بیشتر است. برای اطمینان یافتن از نتایج، در سه ایستگاه دیگر واقع در شهر تهران (ایستگاه‌های مهرآباد، دوشان تپه و اقدسیه) نیز ضرایب همبستگی محاسبه شده (شکل‌ها نشان داده نشده است) که بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه مهرآباد تهران است و در مقایسه با شهر زنجان مقدار کمتری دارد. باید در نظر داشت که منطبق نبودن این دو نوع داده می‌تواند

## ۴ نتیجه گیری

در مقاله حاضر عمق نوری هواویزها در زنجان و تهران از دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ بررسی شده است. برای این کار از داده‌های حس گر مادیس ماهواره‌های آکوا و ترا و همچنین داده‌های نورسنج خورشیدی مرکز تحسیلات تکمیلی زنجان و دید افقی ایستگاه‌های همدیدی تهران و زنجان، به منظور تعیین عمق نوری هواویزها استفاده شده است. داده‌های نورسنج خورشیدی برای ارزیابی درستی داده‌های حاصل از حس گر مادیس و دید افقی در زنجان به کار رفته است. ارزیابی AOD مربوط به حس گر مادیس در این پژوهش، اولین بار در ایران به انجام رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های AOD مادیس دارای دقت قابل قبولی هستند و همبستگی بسیار زیاد بین مقادیر اندازه گیری شده با مادیس و نورسنج خورشیدی وجود دارد (ضریب همبستگی ۰/۸۶). مقادیر AOD برآورد شده از دید افقی با نتایج مربوط به اندازه گیری‌های نورسنج خورشیدی برای ارزیابی رابطه ورموت و همکاران (۲۰۰۲) در برآورد AOD مقایسه شد و نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول این رابطه در تعیین میزان عمق نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر است. مقایسه‌ای بین مقادیر AOD حاصل از اندازه گیری توسط حس گر مادیس و برآورد شده از دید افقی در دو ایستگاه هواشناسی همدیدی تهران و زنجان نیز صورت گرفت تا در صورت وجود همبستگی، از داده‌های دید به منزله جایگزین مناسب برای داده‌های حس گر مادیس استفاده شود. این بررسی‌ها نشان داد که بین این دو مقدار، همبستگی معنی دار در هر دو ایستگاه زنجان و تهران وجود دارد و ضریب همبستگی در زنجان بیشتر از تهران است. علی‌رغم معنی دار بودن ضریب همبستگی، تفاوت‌های موجود می‌تواند ناشی از اختلاف دقت مکانی مادیس در مقایسه با اندازه گیری نقطه‌ای دید، استفاده از فرض همگنی برای هواویزهای جای گزیده در راستای

نمایه‌های قائم دقیق از اجزای تشکیل دهنده جو نظیر  $CH_4$ ،  $CO_2$ ،  $SO_2$ ، بخار آب و ذرات معلق در منطقه مورد بررسی است. هرچند در فرایند پس پردازش، تصحیح فوق به صورت پیش فرض صورت می‌پذیرد، ولی هرچه جو آلوده‌تر و ذرات آلاینده متنوع‌تر باشند، استفاده از تصحیح پیش فرض از منابع خطای مهم است که در مناطق شهری نسبت به مناطق نیمه شهری و غیر شهری مشهودتر است (کافمن و همکاران، ۲۰۰۳).

مقدار کم ضریب همبستگی بین AOD حاصل از داده‌های مادیس و دید افقی در تهران، می‌تواند ناشی از نقص شرایط گفته شده در بالا باشد. توپوگرافی پیچیده و آلودگی شهر تهران علت اصلی ناهمگنی است (سلطانزاده، ۱۳۹۰). علاوه بر این، با توجه به اینکه آلاینده‌های شهر تهران بیشتر از نوع صنعتی و آلاینده‌های زنجان بیشتر از نوع ذرات گرد و غبار هستند، انتظار می‌رود که AOD به دست آمده از حس گر مادیس در تهران نسبت به زنجان دارای همان دقت نباشد. اگر اختلاط در لایه آمیخته جو به صورت کامل صورت گیرد، ضریب همبستگی بهینه می‌شود (هاند و همکاران، ۲۰۰۴؛ شاپ و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجا که دستگاه اندازه گیری نورسنج خورشیدی در منطقه تهران وجود ندارد، نمی‌توان به دقت و با قطعیت بیشتر درباره علت این تفاوت اظهار نظر کرد.

با توجه به وجود ضریب همبستگی معنی دار بین AODهای حاصل از حس گر مادیس و حاصل از رابطه ورموت و همکاران (۲۰۰۲) برای داده‌های دید، برآورد AOD از داده‌های دید افقی که به صورت ساعتی در دسترس هستند، می‌توان در حکم منبع اطلاعاتی ثانویه و تکمیلی برای بررسی کیفیت هوا در زنجان در مقیاس محلی و روزانه استفاده کرد. البته در کاربست این داده‌ها باید بسیار دقت کرد، زیرا این داده‌ها فقط برآوردی از AOD هستند و اندازه گیری‌ها دقیق نیست.

- Chu, D. A., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Remer, L. A., Tanré, D. and Holben, B. N., 2002, Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(12), MOD2, 1-4.
- Deirmendjian, D., 1980, A survey of light-scattering techniques used in remote monitoring of atmospheric aerosols, *Rev. Geoph. Space Phys.*, **18**, 341-360.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Martha, E. F., Ferris, B. G. and Speizer, F. F., 1993, An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *New England J. Med.*, **329**, 1753-1759.
- Hand, J. L., Kreidenweis, S. M., Slusser, J. and Scott, G., 2004, Comparison of aerosol optical properties derived from Sun photometry to estimates inferred from surface measurements in Big Bend National Park, Texas, *Atmos. Environ.*, **38**, 6813-6821.
- Haywood, J., Boucher, O., 2000, Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review, *Review of Geophysics*, **38**, 513-543.
- Horvath, H., 1995, Estimation of the average visibility in central Europe, *Atmos. Environ.*, **29**, 241-246.
- Iqbal, M., 1983, An introduction to solar radiation, Academic Press, 390pp.
- Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Giglio, L., Korontzi, S., Chu, D. A., Hao, W. M., Li, R.-R. and Justice, C. O., 2003, Fire and smoke observed from the earth observing system MODIS instrument products, validation, and operational use, *Int. J. Remote Sens.*, **24**, 1765-1781.
- Landulfo, E., Papayannis, A., Artaxo, P., Castanho, A., de Freitas, A., Sousa, R., Vieira Junior, D., Jorge, P., Sánchez-Ccoyllo, R. and Moreira, D., 2003, Synergetic measurements of aerosols over São Paulo, Brazil using LIDAR, sunphotometer and satellite data during the dry season, *Atm. Chem. Phys.*, **3**, 2835-2877.
- Leeuwen, F., X. and Rolaf, V., 2002, A european prospective on hazardous air pollutants, *Toxicology*, **181**, 355-359.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Martins, J. V., Kaufman, Y. J., Plana-Fattori, A., Redemann, J. and Wenny, B., 2005, Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 974-992.
- Levy, R. C., Leptoukh, G. G., Kahn, R., Zubko, V., Gopalan, A. and Remer, L. A., 2009, A critical look at deriving monthly aerosol

قائم در مقایسه با راستای افقی، اختلاف زمانی بین اندازه‌گیری‌های مادیس و دید افقی و نبود تعیین دقیق میزان عبوردهی جو در دو منطقه شهری و آبرشهری باشد. با وجود همبستگی قوی بین داده‌ها در منطقه زنجان، می‌توان نتیجه گرفت که فرض همگنی در منطقه‌ای شهری با خصوصیات زنجان در مقایسه با آبرشهر تهران در نقش نماینده‌ای از یک منطقه شهری پیچیده، کاربرد و صحت بیشتری دارد. بنابراین بر اساس مقایسه‌های صورت گرفته می‌توان از داده‌های دید در حکم منبع اطلاعاتی ثانویه و جایگزین اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای در تحقیقات آلودگی هوا به شکل روزانه استفاده کرد. مزیت داده‌های دید، در دسترس بودن آنها به صورت روزانه و ساعتی در ایستگاه‌های همدیدی است که در فواصل کوتاهی از هم قرار دارند.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی خود را از مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و سازمان هواشناسی کشور به خاطر همکاری در اجرای این تحقیق ابراز می‌دارند.

#### منابع

- سلطانزاده، ا.، ۱۳۹۰، بررسی مشاهداتی و شبیه‌سازی عددی الگوی باد و گردش‌های میان‌مقیاس روی یک منطقه شهری با توپوگرافی پیچیده (تهران)، رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Alfoldy, B., Osán, Z., Tóth, S., Török, A., Harbusch, C. and Jahn d., 2007, Aerosol optical depth, aerosol composition and air pollution during summer and winter conditions in Budapest, *Science of the Total Environment*, **383**, 141-163.
- Baumer, D., Vogel, B., Versick, S., Rinke, R., Möhler, O. and Schnaiter, M., 2008, Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, *Atmos. Environ.*, **42**, 989-998.

- Schaap, M., Timmermans, R. M. A., Koелеmeijer, R. B. A., de Leeuw, G. and Bultjes, P. J. H., 2008, Evaluation of MODIS aerosol optical thickness over Europe using sun photometer observations, *Atmos. Environ.*, **42**, 2187-2197.
- Seinfeld, H. and Pandis, N., 1998, *Atmospheric chemistry and physics, from air pollution to climate change*, New York, John Wiley & Sons, 1191pp.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L., 2007, *The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. IPCC, Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tanré, D., Kaufman, Y. J., Herman, M. and Mattoo, S., 1997, Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances, *J. Geophys. Res.*, **102** (D14), 16971-16988.
- Vermote, E. F., Vibert, S., Kilcoyne, H., Hoyt, D. and Zhao, T., 2002, *Suspended Matter. visible/infrared imager/radiometer suite algorithm theoretical basis document*. SBRS Document # Y2390, Raytheon Systems Company, Information Technology and Scientific Services, Maryland, 270-243.
- Wang, J. and Christopher, S. A., 2003, Inter comparison between satellite derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: implications for air quality studies, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2095-2116.
- World Meteorological Organization, 1995, *Manual on Codes, Suppl. 6(VIII.2007)*, WMO, Geneva, Switzerland.
- optical depth from satellite data, *IEEE T. Geosci. Remote*, **47**(8), 2942-2956.
- Li, C., Lau, A. K.-H., Mao, J. and Chu, D. A., 2005, Retrieval, validation, and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong, *IEEE T. Geosci. Remote*, **43**, 2650-2658.
- Rainwater, M. and Gregory, L., 2005, *CIMEL Sunphotometer, Instruments handbook*, DOE/SC-ARM/TR-056.
- 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., Eck, T. F., Vermote, E. and Holben, B. N., 2005, The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 947-973.
- Remer, L. A., Kleidman, R. G., Levy, R. C., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Martins, J. V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H. and Holben, B. N., 2008, Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors, *J. Geophys. Res.*, **113**, 426-403.
- Remer, L. A., Tanre, D., Kaufman, Y., Levy, R. and Mattoo, S., 2009, Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS, collection 005, Rev. 2, 97, available at: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>.
- Retalis, A. and Michaelides, S., 2009, Synergetic use of TERRA/MODIS imagery and meteorological data for studying aerosol dust events in Cyprus, *Int. J. Environ. Pollut.*, **36**, 139-150.
- Retalis, A., Hadjimitsis, D. G., Michaelides, S., Tymvios, F., Chrysoulakis, N., Clayton, C. R. I. and Themistocleous, K., 2010, Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **10**, 421-428.