

امکان سنجی برآورد و پایش تغییرات مکانی هواویزهای با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون

نوید پورمحمد، روزبه شاد

دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران

استادیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران

Email: mahno70@yahoo.com

چکیده

هواویزهای جوی، نقش مهمی در تعادل تابشی ایفا می کنند و از فاکتورهای مهم عدم قطعیت برای تولید پارامترهای مورد استفاده در مدل های اقلیمی هستند. مقدار حجم ذرات معلق موجود در جو، از مهم ترین شاخص های آلودگی هوا، محسوب شده و به همین علت، بیشترین توجه را نسبت به سایر آلاینده های جوی در سازمان های حفاظت محیط زیست، برخوردار هستند. اندازه گیری های ایستگاه های زمینی آلودگی سنج، دارای دقت بالایی هستند، اما این اندازه گیری ها تنها محدوده های اطراف ایستگاه اندازه گیری را، پوشش می دهند. در این مطالعه امکان سنجی به کارگیری اطلاعات ماهواره ای در تعیین غلظت هواویزها مورد بررسی قرار می گیرد.

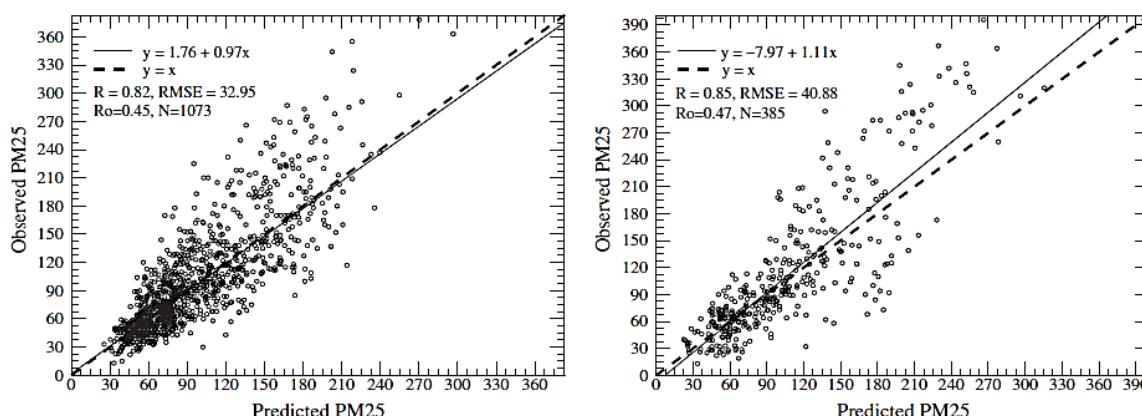
کلمات کلیدی: آلودگی هوا، ذرات معلق، مودیس، هواویزها.

۱. مقدمه

توسعه صنعتی و پیشرفت تکنولوژی، دستاوردهای متنوعی را برای زندگی انسان به همراه داشته است. اما متأسفانه گاهی در روند پیشرفت و اجرای برنامه های توسعه صنعتی، پس مانده هایی به شکل ترکیباتی ناخواسته و اغلب زیان آور در محیط رها می شوند. به گونه ای که اثرات منفی بسیاری بر محیط زیست می گذارند. پدیده آلودگی هوا نیز یکی از ره آوردهای توسعه صنعتی است که با افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و مصرف بی رویه سوخت های فسیلی، روز به روز بر شدت آن افزوده می شود. با توجه به خطراتی که این آلودگی برای سلامت افراد ساکن در مناطق آلوده دارد، لازم است که با آگاهی و شناخت از این مساله، در راستای جلوگیری از تولید و یا کاهش خطرات آن اقدام نمود. بهره گیری سنجش دور ماهواره ای هواویزها از پوشش مکانی و زمانی وسیع، توانایی مذکور را به وجود آورده تا اطلاعات ارزشمندی را برای مطالعات اپیدمیولوژی، کمک به طراحی شبکه اندازه گیری و برآورد آلودگی هوا فراهم کند [11]. به بیان دیگر اطلاعات فراوان با هزینه اندک از مزایای این روش می باشد. مودیس (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) سنجنده ای است که توسط NASA در سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ به وسیله دو ماهواره EOS در فضا قرار گرفت [13]. استفاده از باندهای ۱، ۳ و ۷ مودیس در بازیابی اطلاعات از هواویزها عمومیت فراوانی دارد [14]. اساس بازیابی اطلاعات از هواویز بر اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی دریافتی توسط سنجنده استوار است [10]. این اختلاف، اساس محاسبه عمق نوری هواویز را نیز تشکیل می دهد. به طور کلی در مطالعات سنجش ازدوری که هدف آن - ها برآورد و پیش بینی غلظت ذرات معلق است؛ اطلاعات مورد نیاز آن ها شامل AOD، وضعیت هواشناسی و اقلیم منطقه می باشد. در تحقیق های انجام شده، معمولاً از عمق نوری هواویز مستخرج از تصاویر سنجنده

مودیس، استفاده شده است [19,2]. گوپتا و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۷، بر روی میزان ذرات معلق حاصل از آتش سوزی جنگل‌ها که تا مسافت‌های زیادی گسترش می‌یابند، نشان دادند که ضخامت نوری ارائه شده توسط سنجنده مودیس دارای دامنه تغییراتی از ۰/۱ برای قبل از آتش سوزی تا ۱ برای بعد از آتش سوزی می باشد. البته کریوسولیکس و همکاران، در سال ۲۰۰۳، گزارش نمودند که مقدار ضریب همبستگی R در خط رگرسیون محاسبه شده بین داده‌های حاصل از مودیس با داده‌های ایستگاه های زمینی (بسته به عرض جغرافیایی و شرایط هر منطقه) بسیار متغیر است [6]. یو و همکاران در سال ۲۰۱۴، با استفاده از یک مدل غیرخطی تجربی و به کارگیری پارامترهای هواشناسی به عنوان متغیر کمکی، مقادیر غلظت ذرات معلق را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و MISR برآورد کردند. نتایج حاصل نشان دادند که داده‌های AOD سنجنده MISR در همه‌ی فصول، از دقت بالاتری برخوردار بودند. به طوری که میانگین ضریب تبیین آن ۰/۸۴ محاسبه گردید. در سنجنده مودیس نیز ضریب تبیین ۰/۸۳ به عنوان بهترین برآورد در فصل زمستان شناخته شد. همچنین، مشخص گردید که استفاده از یک مدل رگرسیون چندگانه غیرخطی در مقایسه با یک مدل رگرسیون ساده خطی، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. شکل (۱)، نتایج حاصل از دو سنجنده مذکور را نمایش می‌دهد [16].

تحقیقات پیشین حاکی از مفید بودن نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق است. اما مشکلاتی مانند قدرت تفکیک‌های نامناسب AOD استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط‌های شهری و وابسته بودن مدل‌های موجود به شرایط منطقه‌ای، از محدودیت‌های این روش‌ها است [18].



شکل ۱: مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده غلظت ذرات معلق (PM2.5) با استفاده از مدل های MODIS (چپ) و MISR (راست).

۲. عمق نوری هواویزها (AOD: Aerosol Optical Depth)

عمق نوری آئروسول (AOD) یکی از پارامترهای مهم در مطالعه‌ی ذرات معلق هوا و گرد و غبارها می‌باشد. عمق اُپتیکی آئروسول به توزیع آئروسول‌های گرد و غبار موجود در جو اشاره می‌کند. این کمیت به طول موج وابسته بوده و به صورت کاهش نور در واحد طول (بر روی یک مسیر مشخص) تعریف می‌شود. مسیر اُپتیکی عمودی، فاصله عمودی از سطح زمین در قسمت فوقانی جو می‌باشد. مقدار عمق اُپتیکی با تراکم تعداد هواویزها (آئروسول‌ها) و ویژگی‌های آن ذرات متفاوت است. دامنه‌ی تغییرات عمق اُپتیکی از ۰/۱ تا ۰/۲ میکرومتر برای شرایط هوای قاره‌ای صاف و از ۰/۱ تا ۰/۵ میکرومتر برای هوای بحری صاف پیشنهاد می‌گردد. بیشتر شدن مقادیر AOD از بازه‌های مذکور نشان دهنده‌ی تراکم هواویزها در امتداد ستون عمودی هوا بوده و به عبارتی میزان دید را در امتداد آن ستون کاهش می‌دهد. میانگین عمق اُپتیکی جهانی در شرایط عادی به علت وجود

غبارات نمک و ذرات ناشی از کانیها حدود $0.23/\mu\text{m}$ میکرومتر برآورد شده است. در صورتی که گرد و غبارهای عمده جهانی دارای عمق اپتیکی در محدوده بین 0.3 تا 2.5 میکرومتر می باشند. این موضوع بیانگر نقش مهم گرد و غبارها در کاهش نور دریافتی است. معمولاً عمق اپتیکی آئروسول ها با افزایش طول موج کاهش می یابد. بنابراین مقدار آن در تابش ها با طول موج بلند بسیار کمتر از تابش ها با طول موج کوتاه خواهد بود. به کمک عمق اپتیکی هواویزه محصولات سنجنده مودیس، مشخص می شود که چه مقدار از حجم نور عبوری (پس از عبور از درون ستونی از هوا در جو زمین) توسط ذرات گرد و غبار موجود در هوا مهار می شود. ذرات آئروسول به جذب یا انعکاس تابش خورشیدی وارده تمایل داشته و میزان قابلیت دید را کاهش می دهند. همچنین ذرات آئروسول قادرند که عمق اپتیکی را افزایش دهند. عمق اپتیکی کمتر از 0.1 میکرومتر نشان دهنده هوای صاف می باشد. همچنین عمق اپتیکی بیشتر از 4 میکرومتر حضور حجم متراکمی از هواویزه ها که مانع از رسیدن نور خورشید حتی در میانه ی روز به سطح زمین می شوند، را نشان می دهند. علاوه بر این، AOD کمیتی بی بعد بوده و عبارتست از، میزان جلوگیری از گذر پرتو نور در جو به دلایلی مانند جذب و پراکنش ناشی از وجود هواویزه ها در مسیر عبور نور. به بیانی دیگر AOD به عنوان ضریب خاموشی کاهش تشعشع در واحد طول بر روی یک ستون قائم تعریف می شود [8]. تحقیقات گذشته حاکی از موفقیت نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق می باشند. اما مشکلاتی همچون قدرت تفکیک نامناسب AOD مستخرج از تصاویر ماهواره ای در محیط های شهری و وابستگی مدل های موجود به شرایط منطقه ای، از جمله محدودیت های این روش می باشد.

۳. اندازه گیری و برآورد AOD

مقادیر AOD را می توان به کمک دو روش به دست آورد. در روش اول، مقادیر AOD با استفاده از دستگاه نورسنج خورشیدی در سطح زمین، اندازه گیری می شود. در روش دوم نیز مقادیر متغیر مذکور با استفاده از تصاویر ماهواره ای و کاربرد روش های سنجش از دور، تخمین زده می شوند. در ادامه هر یک از روش های مذکور تشریح می گردند.

۳-۱. مقادیر عمق نوری هواویزه ها از سنجنده مودیس

محصول ذرات معلق جوی سطح ۲ مودیس (MOD04L2) با پوشش جهانی از خصوصیات ذرات معلق با استفاده از دو الگوریتم دیپ بلو (DB) و هدف تیره (DT: Dark Target) می باشد. الگوریتم DT برای اقیانوس ها و مناطق خشکی تیره (مانند مناطق دارای پوشش گیاهی) به کار رفته است؛ در حالی که الگوریتم DB در مجموعه ۶ (C6: Collection 6) کل خشکی ها را که شامل هر دو گروه مناطق با سطوح روشن و تیره می شود. در مجموعه ۵ این محصول، الگوریتم DB تنها برای مناطق خشکی دارای سطوح روشن به کار می رفت. این فایل با فرمت EOS-HDF موجود می باشد [8].

داده های مذکور شامل اطلاعات مفید در خصوص هواویزه ها و ذرات معلق هوا است که برای مطالعه هواویزه ها، منابع و محل فرونشست آن ها، انواع هواویزه ها (مانند سولفات ها و هواویزه های حاصل از سوخت توده زنده) و برهمکنش هواویزه ها با ابرها و تصحیحات جوی و غیره، به کار می روند [15]. این محصولات به صورت ماتریس های دوبعدی با ابعاد 203×203 (برای هر صحنه ۱۳ تصویر که در مدت 5×135 دقیقه کسب می شوند). از آنجا که ابعاد هریک از سلول های این ماتریس ها ۱۰ کیلومتر می باشد، مساحتی به ابعاد 2030 کیلومتر مربع توسط هر ماتریس پوشش 1350×1350 داده می شود، که تقریباً $1/5$ برابر مساحت ایران است [1]. ضخامت نوری

هوایزها از انتگرال ضریب تضعیف هواویز از سطح زمین تا بالای جو برای یک طول موج معین λ ، به صورت زیر به دست آید [9].

$$\tau(\lambda) = \int_0^\infty \beta_{\text{ext}}(\lambda, z) dz = \int_0^\infty P(z) \sigma_{\text{ext}}(\lambda, z) dz \quad (1)$$

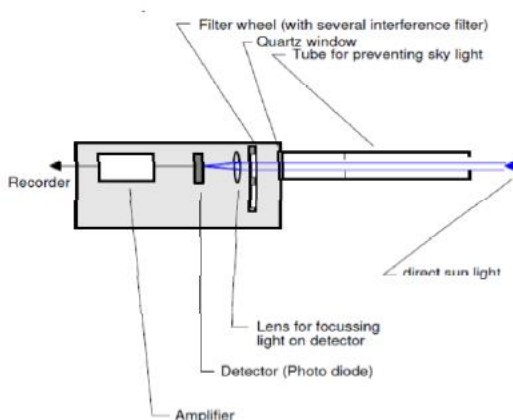
که در آن $\beta_{\text{ext}}(\lambda, z)$ ضریب تضعیف $(m-1)$ ، $P(z)$ غلظت هواویز (Mg/m^3) در ارتفاع z و $\sigma_{\text{ext}}(\lambda, z)$ سطح مقطع تضعیف هواویز (m^2/mg) است. صحت و دقت در محاسبه AOD سنجنده MODIS در حدود 0.05 ± 0.15 گزارش شده است. این نتیجه با مقایسه τ بازیابی شده از مشاهدات MODIS با اندازه گیری زمینی توسط دستگاه AERONET به دست آمده است [6]. این دقت معمولاً قابل انتظار است، مگر در حالتی که الف) تصویر آلوده باشد، ب) منطقه ساحلی باشد و ج) مناطق پوشیده از برف یا یخ باشد [7]. متأسفانه به دلیل عدم وجود ایستگاه های شبکه AERONET در ایران، امکان دقت سنجی AOD مستخرج از MODIS در منطقه مشهد وجود ندارد [3].

۳-۲. مقادیر عمق نوری هواویزهای حاصل از نورسنج خورشیدی

نورسنج خورشیدی دستگاهی است که پرتو باریک خورشید را در طول موج ها و زاویه های سراسوی خورشیدی متفاوت دریافت نموده و قابلیت عبوردهی جو را تعیین می نماید [5]. این دستگاه قابلیت اندازه گیری مستقیم نور خورشید را دارد. میزان شدت نور خورشید در بام جو، به علت جذب و پراکنش نور خورشید در مسیر عبور از جو با شدت نوری که به سطح زمین می رسد، متفاوت است. از آن جا که نور دریافتی توسط نورسنج خورشیدی به ولتاژ تبدیل می شود، اختلاف ولتاژ به دست آمده از دستگاه با پراکندگی هواویزها در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیس مرتبط می باشد. 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:

$$I = I_0 \exp(\tau_\lambda / \cos Z) \quad (2)$$

که در آن، I_0 و I به ترتیب شدت نور رسیده به بام جو و سطح زمین، Z زاویه سراسوی خورشید و τ_λ عمق نوری جو است که با استفاده از آن می توان عمق نوری هواویزها را به دست آورد [9]. شکل (۲) تصویری از یک دستگاه نورسنج خورشیدی را نشان می دهد.



شکل ۲: تصویری از یک دستگاه نورسنج خورشیدی به همراه بخش های اصلی آن؛ عکس سمت راست، دستگاه را در وضعیت اندازه گیری نشان می دهد.

مهم ترین منبع خطا در اندازه گیری ها، تاثیر ابر (به ویژه ابرهای پُرسا (سیروس)) است. برای جلوگیری از خطای ناشی از ابر، لازم است که در روزهای بدون ابر اندازه گیری ها انجام شوند [4].

۴. بازتابندگی ذرات معلق

مدل هواویزه بر اساس معادله ۳-۴ نوشته می شود.

$$ACR_1 = \rho_1 - \rho_1^* - m_\lambda \quad (3)$$

ρ_1 و m_λ به ترتیب بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر، بازتابندگی ظاهری در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر و پراکنده سازی و جذب مولکولهای هوا می باشد. لازم به ذکر است که این رابطه در حالت جو پایدار صادق است. [22]. یک رگرسیون خطی بین هواویزه و غلظت ذرات معلق به صورت زیر خواهد بود.

$$ACR = K \times PM + b = \rho_1 - \rho_1^* - m_\lambda \quad (4)$$

در این رابطه تمامی پارامترها به جزء m_λ در دسترس هستند. بنابراین رابطه به صورت زیر تبدیل می شود.

$$\rho_1 - \rho_1^* = K \times PM + (b + m_\lambda) \quad (5)$$

۵. مقادیر عمق نوری هواویزه از سنجنده مودیس

سنجنده مودیس، مجموع درخشندگی خورشیدی پراکنده شده در جو و نور بازتاب شده از سطح و تضعیف شده در اثر عبور از جو را اندازه گیری می کند. شدت بازتاب از سطح بستگی به زاویه سرسو، محل ماهواره و خصوصیات بازتابندگی پوشش سطحی دارد. الگوریتمی که AOD را محاسبه می کند، از دقت مکانی ۲۵۰ متر (نوار ۶۶۰ نانومتر) و ۵۰۰ متر (نوارهای ۴۷۰ و ۵۵۰ نانومتر) سنجنده مودیس استفاده و محصول آماری با دقت ۱۰×۱۰ کیلومتر را ایجاد می کند [12]. الگوریتمی که با استفاده از آن هواویزهای جوئی آشکارسازی می شوند، موسوم به MOD04 است که اساس آن بر تحلیل بازتاب های سطحی در هفت طول موج (۰/۴۷ تا ۲/۱۳ میکرومتر) روی اقیانوس و دو طول موج (۰/۴۷ تا ۰/۶۷ میکرومتر) روی خشکی است [4].

برای به دست آوردن AOD با استفاده از سنجنده ی مودیس، از سه الگوریتم استفاده می شود: یکی بر روی اقیانوس [7, 17] و دو مورد دیگر بر روی خشکی هستند که موسوم به الگوریتم پیکسل تیره (Dark pixel) و دیپ بلو (Deep blue) هستند. اساس الگوریتم دیپ بلو، استفاده از طول موج های آبی و داده های بازتابش سطوح مختلف است. مراحل الگوریتم دیپ بلو عبارتند از:

تصحیح عوارض ناخواسته بر روی تصویر شامل پیکسل های ابر، آب، یخ، برف و پوشش گیاهی
برآورد میزان بازتابش سطح با در نظر گرفتن تغییرات فصلی از بانک داده های بازتابی

استفاده از روش بیشینه ی 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
محاسبه ی عمق نوری هواویزه ها و دیگر پارامترهای نوری.

لازم به ذکر است مقادیر AOD مستخرج از ماهواره پیش از استفاده باید از نظر وجود پیکسل های ابری مورد بررسی قرار گیرند. این کار با استفاده از محصول MOD35 مودیس که از مطرح ترین الگوریتم های تست ابر بر روی تصاویر MODIS می باشد و از روش آستانه گذاری دمایی اقدام به تشخیص حضور ابر در تصاویر می کند، انجام می شود.

۵-۱. برآورد غلظت ذرات معلق جو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

برای بررسی هواویزها و آلاینده‌های جو، به خصوص ذرات معلق موجود در جو (با منشأ طبیعی و انسان ساز)، روش‌های مختلفی وجود دارد.

یکی از معمول‌ترین پارامترها که برای این منظور استفاده می‌شود، عمق نوری هواویزها AOD می‌باشد. تحقیقات گذشته حکایت از موفقیت نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق دارد. با وجود موفقیت‌های استفاده از این روش، اما مشکلاتی هم همچون قدرت تفکیک‌های نامناسب AOD های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط‌های شهری و وابسته بودن مدل‌های موجود به شرایط منطقه‌ای، از محدودیت‌های استفاده از این روش‌ها در محیط‌های شهری می‌باشد.

از روش‌های دیگر برآورد غلظت ذرات معلق، محاسبه بازتابندگی ذرات معلق هواویز می‌باشد. در مدل هواویز به صورت مستقیم بین مقدار بازتابندگی ذرات معلق و غلظت آن در جو ارتباط برقرار می‌گردد. از مزایای این روش می‌توان به قابل استخراج بودن هواویز در قدرت تفکیک‌های مناسب برای محیط‌های شهری اشاره کرد. با استفاده از این روش به ضریب همبستگی ۰/۵۶ بین هواویز و حجم ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM10) در شهر پکن دست یافته است.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

هر مقاله اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی آلودگی سنج، دارای دقت بالایی هستند، اما این اندازه‌گیری‌ها تنها محدوده‌های اطراف ایستگاه اندازه‌گیری را، پوشش می‌دهند و تنها با اتکا به اندازه‌گیری‌های زمینی، پردازش مدل‌های پیچیده‌ی آلودگی هوا که با در نظر گرفتن منبع، مسیر حرکت و خصوصیات شیمیایی انواع آلودگی‌ها، اقدام به برآورد حجم آلودگی در مناطق مختلف می‌کنند، با مشکل مواجه می‌شوند. از طرفی تأسیس و نگهداری این ایستگاه‌ها هزینه‌های زیادی را می‌طلبد. بنابراین تعداد این ایستگاه‌ها به ویژه در مناطق غیرشهری که بخش اعظم هر کشور را تشکیل می‌دهند، کم است. علاوه بر این، ذرات گردوغبار ممکن است با صعود به طبقات فوقانی تر جو، از دسترس پایش توسط ایستگاه‌های نام برده خارج شوند. شکل دیگر در این زمینه نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌های زمینی است، بنابراین داده‌های ایستگاه زمینی قابلیت لازم برای تهیه نقشه غلظت ذرات در مقیاس ناحیه‌ای و جهانی را ندارند. اما در مقابل داده‌های ماهواره‌ای قابلیت شگفت‌انگیزی در پهنه‌بندی خصوصیات ذرات معلق جو ی دارند. بنابراین مشاهده‌های ماهواره‌ای با توجه به تفکیک زمانی و مکانی قابل قبول، می‌توانند این محدودیت‌ها را برطرف نموده و به عنوان مکمل ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند. در سال‌های اخیر با پیشرفت فن آوری سنجش از دور، پژوهش‌های زیادی در سطح بین‌المللی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای همچون MODIS، GOES و MISR و داشتن اطلاعات مکان‌دار (قابل استفاده در GIS) از اطلاعاتی مانند فاصله راه‌های اصلی، تراکم جمعیت و متغیرهای هواشناسی، می‌توان میزان میانگین ماهانه ذرات معلق را برآورد نمود. در دسترس بودن این داده‌ها در بهینه سازی مدل‌های هواشناسی و مطالعات مربوط به آلودگی هوا نقش بسیار مؤثری دارد.

براساس تحقیقات انجام شده، سنجنده مودیس یکی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین سنجنده‌ها برای پایش آلودگی هوا و پایش بینی غلظت ذرات معلق می‌باشد. برای بررسی هواویزها و آلاینده‌های جو، به خصوص ذرات معلق موجود در جو (با منشأ طبیعی و انسان ساز)، با استفاده از ابزار سنجش از دور، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از معمول‌ترین پارامترها که برای این منظور استفاده می‌شود، عمق نوری هواویزها AOD می‌باشد. تحقیقات گذشته حکایت از موفقیت نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق دارد.

براساس تحقیقات انجام شده، سنجنده مودیس یکی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین سنجنده‌ها برای پایش آلودگی هوا و پایش بینی غلظت ذرات معلق می‌باشد. برای بررسی هواویزها و آلاینده‌های جو، به خصوص ذرات معلق موجود در جو (با منشأ طبیعی و انسان ساز)، با استفاده از ابزار سنجش از دور، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از معمول‌ترین پارامترها که برای این منظور استفاده می‌شود، عمق نوری هواویزها AOD می‌باشد. تحقیقات گذشته حکایت از موفقیت نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق دارد.

۸. مراجع

- [۱]- قربانی، رضا و سالخورد، محمد و مباشری، محمدرضا، رحیم زادگان. (۱۳۸۹). " روشی سریع در برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از سنجنده مودیس: یک مطالعه موردی در تهران ". مجله پژوهشی حکیم.
- [۲]- حجازی، علی و مباشری، محمدرضا و امیر، احمدیان مرج، (۱۳۹۱). تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق با قطر کمتر از دو نیم میکرومتر در هوای شهر تهران با استفاده از داده های سنجنده مودیس. مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۲ (۲۶): ۱۶۱-۱۷۸.
- [۳]- حجازی، علی و مباشری، محمدرضا و احمدیان، امیر. (۱۳۹۳). " بهینه سازی یک مدل شبیه تجربی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور برآورد غلظت ذرات معلق سطحی در شهر تهران با استفاده از داده های ماهواره ای و داده های هواشناسی. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. شماره ۲. تابستان ۱۳۹۳.
- [۴]- خوش سیما، محمد و علی اکبری، احمد. (۱۳۹۲). " تعیین عمق نوری هواپرها با استفاده از داده های دید افقی و سنجنش از دور در دو منطقه شهری در ایران " مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹، شماره ۱، ۱۳۹۲. ص ۱۶۳-۱۷۴.
- [5] Deirmendjian, D (1980), A survey of lightscattering techniques used in remote monitoring of atmospheric aerosols, Rev Geoph. Space Phys., 18, 341-360.
- [6] Gupta, P. Christopher, S.A. Box, M.A. and Box, G.P (2007), "Multiyear satellite remote sensing of particulate matter air quality over Sydney, Australia", International Journal of Remote Sensing. 20: 4483-4498.
- [7] Gupta, P. Christopher, S.A. Wang, J, Gehing, R. Lee, Y. and Kumar, N (2006), "Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities", Atmospheric Environment. 40: 5880-5892.
- [8] http://modaps.nascom.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD04_L2.html. Accessed Jul 11, 2015.
- [9] Iqbal, M., (1983), An introduction to solar radiation, Academic Press, pp.390
- [10] Kaufman.] Y.J. & D. Tanre, (1998) Remote sensing of tropospheric aerosols from EOS MODIS overland. Geophys Res, 102: 17051-17067.
- [11] Kaufman, Y.J., (1997). Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. Journal of Geophysical Research, 102, 16815-16830.
- [12] Kaufman, Y. J.C. Ichoku, L. Giglio, S. Korontzi, D. A. Chu., W. M. Hao, R.-R. Li. 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.
- [13] NASA, (2009). http://MODIS.gsfc.nasa.gov/sci_team/meetings/200610/atmos Agenda. Pdf
- [14] Remer, A & J. Kaufman, (2015) ALGORITHM FOR REMOTE SENSING OF TROPOSPHERIC AEROSOL FROM MODIS: Collection 5 Product ID: MOD04/MYD04, NASA/GSFC.
- [15] Savtchenko, A.D. Ouzounov, S. Ahmad, J. Acker, G. Leptoukh, J. Koziana, D. Nickless, Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC Advances in Space Research (34), 710 - 714.
- [16] Tao, J.H. M.G. Zhang, L.F. Chen, Z.F. Wang, L. Su, C. Ge, X. Han, M.M. Zou. (2013). A method to estimate concentrations of surface-level particulate matter using satellite-based aerosol optical thickness, Science China Earth Sciences, 56(8): 1422-1433.

- [17] Tanre., D. Et al., (1997). "Remote Sensing of Aerosol Properties Over Oceans Using the MODIS/ EOS Spectral Radiances", J. Geophys. Res.. (102). 16971- 16988
- [18] Tian, J. and D. Chen, (2010) A semi-empirical model for predicting hourly round-level fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114, 221–229.
- [19] J. Tian and D. Chen, (2010). A semi-empirical model for predicting hourly round-level fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 114: 221–229.