

بررسی اثر ارتفاع لایه مرزی بر نمایه‌های سنجش از دور جو: ارتباط میزان غلظت ذرات معلق و عمق نوری هواویزها

مسعود خوش‌سیما^{۱*}، سمانه ثابت‌قدم^۲، فرهنگ احمدی‌گیوی^۳، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۴

۱- استادیار پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران

۲- استادیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۳- دانشیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۴- استاد موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

تاریخ وصول مقاله: ۹۴/۰۲/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۶/۰۷

چکیده:

در مقاله حاضر تاثیر تلاطم و ارتفاع لایه مرزی جو شهر زنجان ($17.0m$ ، $48/5 N$ و $36/7 E$) بر میزان ارتباط غلظت ذرات معلق و عمق نوری هواویزها برای روزهای نمونه در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا اکتبر ۲۰۱۰ مطالعه شده است. برای انجام این مطالعه از داده‌های نورشناخت هواویزها توسط دستگاه سان‌فوتومتر مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان، غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر از سازمان محیط زیست و شبیه‌سازی ارتفاع لایه مرزی توسط مدل *WRF* استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد اختلاط لایه مرزی و بیشترین ارتفاع لایه آمیخته از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر ارتباط میان *AOD* و غلظت *PM₁₀* هستند. همچنین نتایج بیان‌گر آن است که زمانی که ارتفاع لایه آمیخته بین ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ متر باشد، همبستگی بهتری نسبت به سایر شرایط در لایه مرزی میان عمق نوری هواویزها و غلظت ذرات معلق وجود دارد. در جو زنجان، بیشترین ارتباط میان غلظت ذرات و عمق نوری هواویزها در هر روز در هنگام بیشینه عمق لایه آمیخته رخ داده است.

واژگان کلیدی: اختلاط لایه آمیخته، عمق نوری هواویزها، غلظت *PM₁₀*، لایه مرزی.

*. Email: khoshsima@alumni.ut.ac.ir

مقدمه

هوایزها ذرات جامد و مایع معلق در جو هستند که غالباً بر حسب چشمه‌های تولید کننده، چگونگی تشکیل و ابعاد آنها دسته بندی می‌شوند (Kokhanovski, 2008; Chin et al., 2009). هوایزها می‌توانند توسط چشمه‌های طبیعی (ذرات گرد و غبار، نمک دریا و ذرات ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی) و چشمه‌های انسان‌ساز (از قبیل فعالیت‌های صنعتی، حمل و نقل و سوخت) ایجاد شوند و گستره قطر آنها از چند نانومتر تا حدود ۱۰۰ میکرومتر (میکرون) متغیر است (Seinfeld and Pandis, 2006).

هوایزهای جوی عمدتاً در لایه مرزی جو تولید، آمیخته و منتشر می‌شوند و از این‌رو غلظت آنها در این لایه از جو بیشینه است (Xia et al., 2004; Boyouk et al., 2010). هوایزها با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت و منابع تولید متنوع، در ارتفاع‌های مختلفی از جو جایگزیده می‌شوند. همرفت و اختلاط تلاطمی نیز از جمله عواملی هستند که موجب تغییر غلظت هوایزها در جو می‌شود (Kaufman et al., 2003).

عمق نوری هوایزها^۱ (AOD) کمیتی بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد. این کمیت بیان‌گر میزان جذب یا پراکنش ناشی از هوایزها در مسیر عبوری نور است (WMO, 1994). عمق نوری هوایزها، با اندازه‌گیری‌های زمینی، هوایی و فضایی (ماهواره‌ای) بدست می‌آید. اندازه‌گیری‌های زمینی با دستگاه‌های نورسنج خورشیدی و لیدار انجام می‌شود. اندازه‌گیری ماهواره‌ای به عنوان یک روش مقرون به صرفه و با پوشش‌دهی زیاد برای پایش هوایزها به‌کار می‌روند.

ارتباط میان عمق نوری هوایزها و غلظت آلاینده‌های جوی وابسته به پارامترهای هواشناختی است و هریک از این پارامترها می‌تواند به نوعی بر این ارتباط موثر باشد (Alfoldy et al., 2007). تاثیر پارامترهای هواشناختی و آلاینده‌های جوی از یک سو و تغییر پذیری زمانی و مکانی هوایزها در هر منطقه از سوی دیگر، انجام مطالعات جداگانه محلی را برای هر منطقه خاص ایجاب می‌کند.

پژوهشگران در مناطق مختلف جهان مطالعات جداگانه‌ای در این زمینه انجام داده و نتایج متفاوتی برای هر منطقه به دست آورده‌اند که وجود اختلاف در نتایج، بر اهمیت دو چندان لزوم مطالعات منطقه‌ای تاکید دارد. مطابق با یافته‌های محققین در مناطق مختلف دنیا، توزیع قائم هوایزها و شرایط لایه مرزی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ارتباط بین ضرایب تیرگی و غلظت ذرت معلق می‌باشد (Gupta et al., 2006; Shiu et al., 2006; Alfoldy et al., 2007). گرین و همکاران (Green et al., 2009)، آلفولدی و همکاران (Alfoldy et al., 2007) و کولمیر و همکاران (Kolemeijer et al., 2006) همبستگی تقریباً مشابهی بین AOD و غلظت ذرات معلق^۲ با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر (PM_{2.5}) و کوچکتر از ۱۰ میکرومتر (PM₁₀) در اروپا یافتند، ولی مطالعات آلفولدی و همکاران (Alfoldy et al., 2007) در بوداپست نشان می‌دهد بین AOD و PM₁₀ عدم همبستگی و AOD با غلظت PM_{2.5} همبستگی قوی وجود دارد. از سوی دیگر، کاکس و همکاران (Cox et al., 2004) در مطالعه خود در منطقه کالیفرنیا بین AOD و غلظت PM_{2.5} ارتباط معناداری پیدا نکردند.

مقاله حاضر با توجه به امکان اندازه‌گیری عمق نوری هوایزها با استفاده از دستگاه سان‌فوتومتر مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان برای این منطقه انجام شده است. شهر زنجان با مختصات جغرافیایی ۴۸/۵ درجه شمالی، ۳۶/۷ درجه شرقی، ارتفاع ۱۷۰۰ متر در شمال غرب ایران واقع شده است. از آنجا که لایه مرزی در طول شبانه روز دچار تغییر می‌شود، از این‌رو در مقاله حاضر، تاثیر اختلاط و عمق لایه مرزی بر غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر و ارتباط آنها با پارامتر عمق نوری هوایزها بررسی شده‌است.

داده‌ها و روش کار

در این پژوهش از دو نوع داده مشاهداتی شامل: پارامترهای نورشناخت هوایزها محاسبه شده از مقادیر به دست آمده از سان‌فوتومتر (در این مقاله از داده عمق نوری هوایزها در طول موج ۴۴۰ نانومتر استفاده شده است) و

از مدل مرکز ECMWF^۱ با تفکیک ۱×۱ درجه به روز رسانی می‌شود (Green et al., 2009).

محاسبه عمق نوری هواویزها

عمق نوری هواویزها با انتگرال‌گیری از ضریب خاموشی در یک ستون جو محاسبه می‌شود. ضریب خاموشی نیز به نوبه خود از مجموع دو اثر پراکنش و جذب تابشی ذرات در جو به دست می‌آید. هواویزهای جوی با دو فرآیند جذب و پراکنش، باعث کاهش شدت نور مستقیم خورشید می‌شوند. پراکنش نور توسط مولکول‌های هوا (پراکنش رایلی)، پراکنش توسط هواویزها و جذب مولکولی مهم‌ترین مولفه‌های خاموشی نوری جو هستند. ضریب خاموشی با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب خاموشی موثر در توزیع اندازه ذرات با شعاع r در واحد طول در یک ستون قائم به شکل زیر بیان می‌شود (Kokhanovski, 2008):

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \int_{\log r} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) \frac{dN(r)}{d\log r} \cdot d\log r \quad (1)$$

بیانگر تعداد هواویزهای با شعاع r در واحد سطح و در واحد لگاریتم بازه شعاعی برای ستون قائم جو است (cm^{-2}). به طوریکه Q_{ext} ضریب خاموشی موثر نامیده می‌شود. عمق نوری هواویزها با انتگرال‌گیری از ضریب خاموشی در یک ستون قائم به ارتفاع Z به صورت زیر محاسبه می‌شود (Kokhanovski, 2008):

$$AOD = \tau_{Aer}(\lambda) = (2)$$

$$\int_z \int_{\log r} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) \left(\frac{dN(r, z)}{d\log r} \right) d\log r \cdot dz$$

در هنگام اندازه‌گیری عمق نوری هواویزها، وجود ابر خصوصاً ابرهای نازک یخی سطوح بالا، باعث بروز خطا می‌شود. بنابراین برای تصحیح داده‌های بدست آمده از دستگاه سان فوتومتر از روش تصحیح ابر اسمیرنوف استفاده شده است (خوش سیما و همکاران، ۲۰۱۴a).

غلظت آلاینده‌های جوی از اداره محیط زیست استفاده شده است. تمامی داده‌ها در هر روز، همزمان و مربوط به بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۹ تا پایان سپتامبر ۲۰۱۰ هستند.

از جمله روش‌های متداول تخمین عمق لایه آمیخته استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی است. در سال ۲۰۰۶ و در همین منطقه، مطالعه گسترده‌ای در زمینه صحت برآورد عمق لایه مرزی توسط پنجمین نسخه مدل عددی میان مقیاس^۱ (MM5) و داده‌های لیدار انجام شده است (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شبیه سازی‌های انجام شده توسط مدل از عمق لایه آمیخته، با اندازه‌گیری‌های مشاهداتی همخوانی دارد. در مقاله حاضر از مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا^۲ (WRF) که نسخه تکامل یافته مدل MM5 است، برای شبیه سازی عمق لایه مرزی استفاده شده است. ساختار مدل شامل هسته‌های دینامیکی، بخش فیزیکی، بخش شیمی و برنامه‌هایی برای آغازگری و گوارد داده‌ها است. علاوه بر هسته دینامیکی، فرآیندهای فیزیکی نیز در مدل در نظر گرفته شده است. یکی از مهم‌ترین اجزاء موجود در مدل WRF، بخش فیزیک مدل است که به پارامتره سازی فرآیندهای فیزیکی جوی در مقیاس شبکه‌ای و زیر شبکه‌ای اختصاص دارد. این بخش شامل فرآیندهای مربوط به میکروفیزیک ابر، همرفت، لایه مرزی، تابش طول موج بلند و طول موج کوتاه جوی است. با توجه به اهداف این مقاله، از نتایج مدل با در نظر گرفتن طرحواره مناسب برای شبیه‌سازی لایه مرزی جو استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از طرحواره یخ ساده کلاس ۳ برای میکروفیزیک ابر، طرحواره‌های Rrtm^۳ و Dudhia به ترتیب برای تابش موج بلند و کوتاه، طرحواره سطح Noah برای شبیه‌سازی فرآیندهای سطح و طرحواره YSU برای شبیه سازی فرآیندهای لایه مرزی استفاده شده است.

برای اجرای مدل، از دو شبکه تو در تو با تفکیک‌های ۳۰ و ۱۰ کیلومتر استفاده شده که کوچکترین شبکه به مرکزیت مکان نورسنج خورشیدی می‌باشد. شرایط اولیه و شرایط مرزی هر سه ساعت یک بار با استفاده از نتایج بدست آمده

1. Mesoscale Meteorological Model, Version 5
3. Rapid Radiative Transfer Model

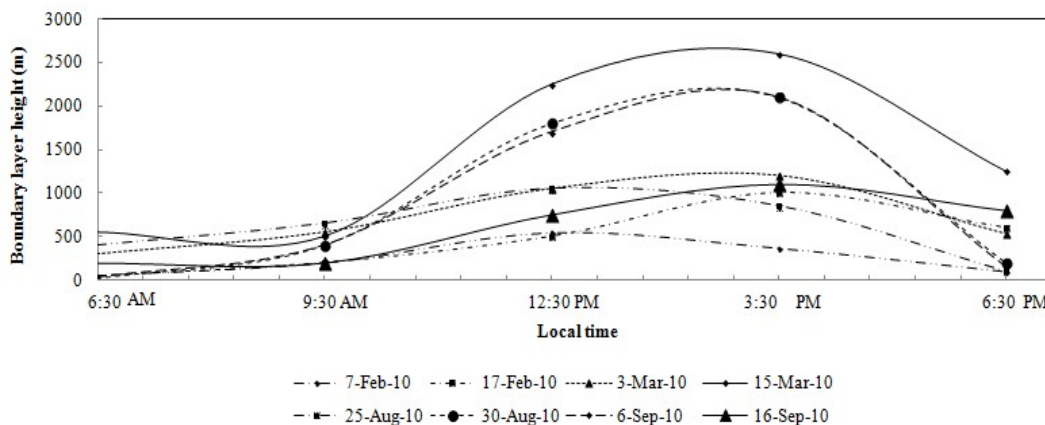
2. Weather Research and Forecasting
4. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

نتایج

تأثیر لایه مرزی بر ارتباط بین پارامترهای نوری جو و غلظت آلاینده‌ها

وجود ذرات معلق در جو به خصوص لایه مرزی باعث تیرگی جو و به دنبال آن افزایش عمق نوری هواویزها در لایه مرزی می‌شود. با استفاده از همین فرضیه می‌توان از این شاخص نورشناخت برای مطالعه آلودگی هوا استفاده کرد، ولی به دلیل اینکه اندازه گیری این پارامتر در لایه مرزی صورت می‌گیرد و از سویی دیگر ارتفاع لایه مرزی با زمان متغیر است (تغییرات ساعتی تا روزانه و بالاتر) بنابراین در بررسی ارتباط بین عمق نوری هواویزها و میزان غلظت ذرات معلق، نقش تغییرات ارتفاع لایه مرزی در کنار سایر پارامترهای هواشناسی باید در نظر گرفته شود.

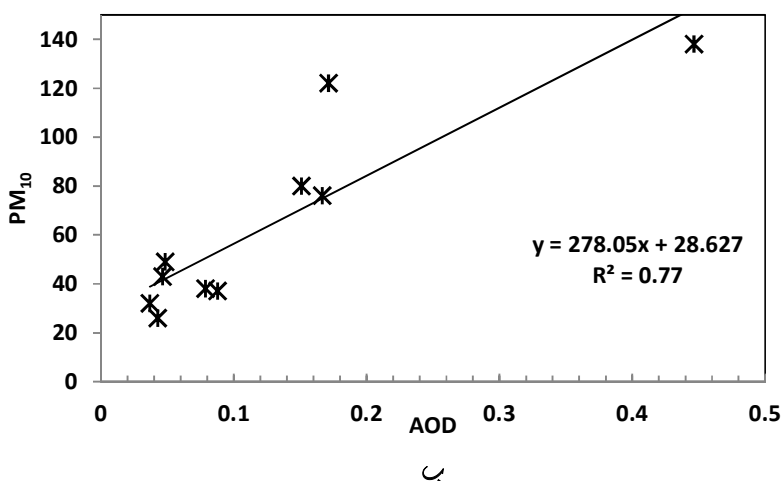
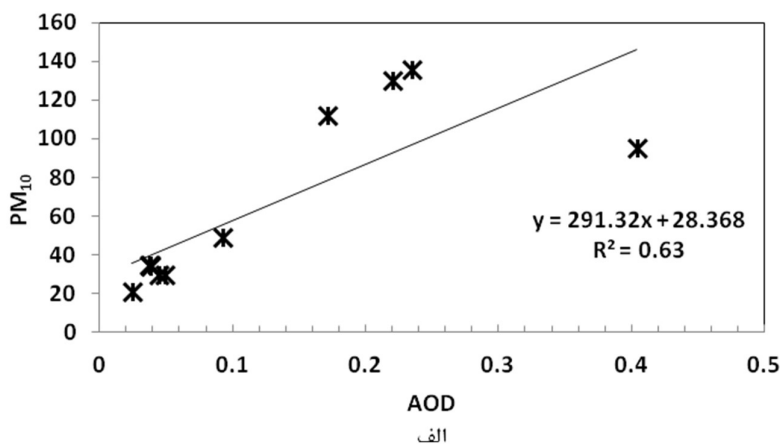
برای بررسی اثر ضخامت لایه مرزی بر چگونگی ارتباط بین غلظت ذرات معلق و آلاینده‌های جوی، هشت روز شامل روزهای هفتم و هفدهم ماه فوریه، سوم و پانزدهم مارچ، بیست و پنجم و سی‌ام آگوست و ششم و شانزدهم سپتامبر ۲۰۱۰ انتخاب شده‌اند. علت انتخاب این روزها به دلیل کامل‌تر بودن داده‌های غلظت آلاینده‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سان‌فوتومتر است. مقادیر شبیه‌سازی شده عمق لایه توسط مدل WRF برای روزهای مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشینه عمق لایه مرزی در حدود ساعت ۱۵ محلی رخ می‌دهد که با نتایج پیشین توسط بیدختی و همکاران (۲۰۰۸) و شاپ و همکاران (Schaap et al., 2008) هم‌خوانی دارد.



شکل ۱- تغییرات شبانه روزی عمق لایه مرزی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF برای روزهای هفتم و هفدهم فوریه، سوم و پانزدهم مارس، بیست و پنجم و سی‌ام اوت، ششم و شانزدهم سپتامبر ۲۰۱۰. نقاط روی منحنی‌ها بیانگر ساعات ۰۶:۳۰، ۰۹:۳۰، ۱۲:۳۰، ۱۵:۳۰ و ۱۸:۳۰ به وقت محلی هستند.

هواویزها با داشتن ارتفاع لایه‌مرزی تعیین می‌شود. بررسی‌های ساعتی نشان می‌دهد در حالتی که ارتفاع لایه آمیخته بین ۲۰۰ تا ۷۵۰ متر است، همبستگی بین PM_{10} و AOD_{440} برابر $R^2 = 0.63$ (در سطح ۰/۰۱) که ارتفاع لایه بین ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ متر باشد، همبستگی به $R^2 = 0.77$ (در سطح ۰/۰۱) افزایش می‌یابد (شکل ۲).

روش‌های متفاوتی برای مطالعه تأثیر ضخامت لایه مرزی بر ارتباط بین AOD_{440} و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10}) وجود دارد. روش استفاده شده در این مقاله بر مبنای روش شاپ و همکاران (Schaap et al., 2008) است. بر اساس این روش با انتخاب زمان‌های صبح، ظهر و بعدازظهر ارتفاع لایه مرزی تخمین می‌شود. سپس در این زمان‌ها ارتباط بین عمق نوری



شکل ۲- همبستگی بین PM₁₀ و AOD₄₄₀ در دو ارتفاع لایه آمیخته (الف) ۷۵۰-۲۰۰ متر و (ب) ۲۲۰۰-۸۰۰ متر.

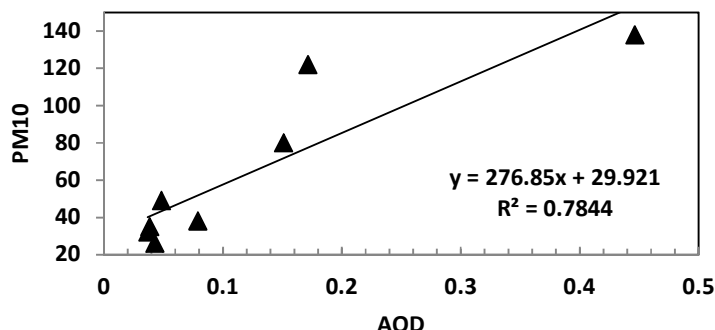
از این رو بر نتایج نشان می‌دهد هرچه به میانه روز نزدیک می‌شویم به دلیل اختلاط بیشتر در لایه مرزی، هواویزها همگن می‌شوند. در طول روز، میزان همبستگی میان عمق نوری هواویزها با غلظت ذرات معلق PM₁₀ افزایش می‌یابد. این حالت در مورد اندازه میانگین ذرات نیز برقرار است، با این تفاوت که برای آنها همبستگی معکوس وجود دارد (خوش سیما و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش ایجاد شده در همبستگی بین PM₁₀ و AOD₄₄₀ در میانه روز احتمالاً به علت اختلاط لایه مرزی و افزایش شدت شارهای سطحی بالاسو در بعد از ظهر است (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸).

مطالعات مشابهی توسط شاپ و همکاران (Schaap et al., 2008) در هلند انجام شده است. آنها دریافتند که با

برای بررسی دقیق‌تر و بیشتر تاثیر لایه مرزی، اثر اختلاط لایه آمیخته نیز بررسی شده است. از این رو سه ساعت از روز مطابق با زمان داده‌های گزارش شده ایستگاه همدیدی زنجان (۹:۳۰، ۱۲:۳۰ و ۱۵:۳۰ به وقت محلی) انتخاب می‌شود. هدف از این کار، مطالعه اثر اختلاط بر ارتباط بین عمق نوری هواویزها (تیرگی) و ذرات معلق است. خلاصه نتایجی که در سطح ۰/۰۱ معنی دار بوده‌اند نشان می‌دهد که در بازه زمستانی در ساعت ۹:۳۰ صبح و ساعت ۱۲:۳۰، ضریب همبستگی بین عمق نوری هواویزها و غلظت PM₁₀ حدود ۰/۷ برآورد شده است. در ساعت ۱۵:۳۰ زمستانی، ضریب همبستگی بین AOD₄₄₀ و PM₁₀ برابر ۰/۷۸ برآورد شده است (شکل ۳).

همبستگی میان تیرگی و غلظت PM₁₀ بین ساعات ۱۲-۱۴ بعد از ظهر محلی رخ داده است.

تشکیل لایه آمیخته، غلظت همه هواویزهای موجود در جو باید همگن شود تا با تیرگی همبستگی داشته باشند. بهترین



شکل ۳- همبستگی بین عمق نوری هواویزها با غلظت هواویزها در حالت بیشینه عمق لایه مرزی.

غلظت ذرات و عمق نوری هواویزها در هر روز در هنگام بیشینه عمق لایه آمیخته رخ داده است. به نظر می‌رسد که در منطقه زنجان به علت پیچیدگی‌های تحول لایه مرزی کوهستانی، بیشینه ارتفاع لایه آمیخته همگنی ذرات معلق را در پی دارد، یعنی لایه کاملاً آمیخته وجود داشته و لایه باقیمانده از بین رفته است. هرچند این نتیجه به علت وجود تفاوت منطقه‌ای با نتایج گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2006) که بیشترین همبستگی میان AOD-PM_{2.5} را در عمق ۱۰۰-۲۰۰ متری لایه آمیخته به دست آوردند، تشابهی ندارد ولی با یافته‌های مطالعات شاپ و همکاران (Schaap et al., 2008) در هلند همخوانی دارد.

از کاربردهای عملیاتی این مقاله می‌توان انجام تصحیحات جوی تصاویر ماهواره‌های سنجش از دور اشاره کرد، چرا که با انتخاب زمان مناسب برای تصویر برداری با رعایت ملاحظاتی که در بالا به آن اشاره شد هم می‌توان تصاویری با خطای کمتر تهیه کرد و هم می‌توان اطلاعات دقیق تری از میزان ذرات معلق موجود در جو (آلودگی هوا) استخراج کرد.

نتیجه‌گیری

افزایش ضریب همبستگی بین AOD₄₄₀ و PM₁₀ با افزایش ساعات روز هم در زمستان و تابستان همراه می‌باشد. افزایش ایجاد شده در ارتباط میان عمق نوری هواویزها و PM₁₀ در میانه روز، احتمالاً به علت اختلاط در لایه مرزی و افزایش شدت شارهای سطحی بالاسو در هنگام بعد از ظهر است. در ابتدای صبح هواویزها با خصوصیات متفاوت در لایه‌های مختلف چینه بندی شده‌اند و ضریب خاموشی هر لایه متفاوت است. از این رو عمق نوری هواویزها که ناشی از ضریب خاموشی هر لایه است، بسیار متغیر است و با ارتفاع تغییر می‌کند. تلاطم ناشی از گرمای تابش خورشید در میانه روز باعث همگنی بیشتر ذرات در لایه مرزی شده و ارتباط AOD₄₄₀ و PM₁₀ افزایش می‌یابد.

نتایج فوق با یافته‌های آفولدی و همکاران (Alfoldy et al., 2007) در مجارستان، شیو و همکاران (Shiu et al., 2006) در چین و بیوک و همکاران (Boyounk et al., 2010) در فرانسه مطابقت دارد. ارتفاع لایه آمیخته، دیگر پارامتر مهم لایه مرزی است که در ارتباط AOD₄₄₀ و PM₁₀ موثر است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که ارتفاع لایه بین ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ متر باشد همبستگی بهتری نسبت به سایر شرایط در لایه مرزی میان عمق نوری هواویزها و غلظت ذرات معلق وجود دارد. در جو زنجان، بیشترین ارتباط میان

منابع:

- Alfoldy, B., Osan, Z., Toth, S., Torok, A., Harbusch, C., 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.
- Bidokhti, A. A., Khoshsima, M. and Sabetghadam, S., 2008: Estimation of Urban Mixed Layer Height in Zanjan Using LIDAR Observations and Numerical Modeling, *Journal of Earth System Science*, 117, 925–933.
- Boyouk, N., Jean-François Le'on, Herve' Delbarre, T. Podvin Deroo, 2010: Impact of the mixing boundary layer on the relationship between PM2.5 and aerosol optical thickness *Atmospheric Environment* 44, 271–277
- Chin, M., Kahn, R. A., and Schwartz, S. E. CCSP 2009: Atmospheric aerosol properties and climate impacts. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. 96, 496-509.
- Cox, J., Holloman, C. H., Coutant, B. W., Hoff, R. M., 2004: Quantitative and Qualitative Evaluation of MODIS Satellite Sensor Data for Regional and Urban-Scale Air Quality; *Atmos. Environ.*, 38, 2495-2509.
- Green, M., Kondragunta, S., Ciren, P. and C. Xu, 2009: Comparison of GOES and MODIS Aerosol Optical Depth (AOD) to Aerosol Robotic Network (AERONET) AOD and IMPROVE PM2.5 Mass at Bondville, Illinois, *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 59, 1082–1091.
- Gupta, P., Sundar A. Christopher, Jun Wang, Robert Gehrig, Yc Lee, Naresh Kumar., 2006: Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmos. Environ.* 40, 5880–5892.
- Kaufman, Y. J., Haywood, J. M., Hobbs, P. V., Hart, W., Kleidman, R., Schmid, B., 2003: Remote sensing of vertical distributions of smoke aerosol off the coast of Africa. *Geophysical Research Letters* 30 (16), 1831–1836.
- Kokhanovsky, A. A., 2008: *Aerosol optics: Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*. Springer-Praxis.
- Koelemeijer, R. B. A., Schaap, M., Timmermans, R. M. A., Homan, C. D., Matthijsen, J., van de Kasstelee, J., and Builtjes, P. J. H. 2006: Mapping aerosol concentrations and optical thickness over Europe PARMA final report, MNP report 555034001.
- Khoshsima, M., Bidokhti, A. A., Ahmadi-Givi, F., 2014a: Variations of aerosol optical depth and Angstrom parameters at a suburban location in Iran during 2009–2010, *Journal of Earth System Science*, 123, 187-199.
- Khoshsima M., F. Ahmadi-Givi, A. A. Bidokhti, S. Sabetghadam, 2014b: Impact of meteorological parameters on relation between aerosol optical indices and air pollution in a sub-urban area, *Journal of Aerosol Science*, Volume 68, February 2014, Pages 46-57
- Schaap, M., Apituley, A., Timmermans, R. M. A., Koelemeijer, R. B. A., de Leeuw, G., 2008: Exploring the relation between aerosol optical depth and PM2.5 at Cabauw, the Netherlands. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 909–925.
- Seinfeld, H. and Pandis, N., 2006. *Atmospheric chemistry and physics-from air pollution to climate change*. Second Edition, John Wiley & Sons, 1203 pp.

15. Shiu, C., Chen, Y., Chen, J., Chen, S., Liu; Po-Hsiung Lin; Ho-Jiunm Lin; Wei-Nai Chen; Shih-Yu Chang; Anupam Hazra; Charles C. K. Chou; Shih-Chun Lung; Shih-Chieh Hsu, 2006: Correlation between aerosol optical depth derived from CIMEL sunphotometer and surface particulate concentration in Northern and Southern Taiwan Proc. SPIE 6299, Remote Sensing of Aerosol and Chemical Gases, Model Simulation /Assimilation, and Applications to Air Quality, 62990T.
16. WMO, 1994: Report of the WMO workshop on the measurements of atmospheric optical depth and turbidity. World Meteorological Organization Report GAW-101,13pp.
17. Xia, X., Chen, H., Wang, P., 2004: Aerosol properties in a chinese semiarid region. Atmospheric enviroment 38, 4571- 4581.