

بررسی و مقایسه شاخص‌های نورشناخت هواویزهای جو در دو منطقه شهری در ایران

علیرضا میرزاخانی^۱، سمانه ثابت‌قدم^{۲*}، فرهنگ احمدی‌گیوی^۳

ali.mirzakhani@ut.ac.ir

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

ahmdig@ut.ac.ir

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

چکیده

هواویزها ذرات جامد و مایع معلق در جو هستند که با تغییر خواص فیزیکی و تابشی ابرها بر بودجه تابشی جو تأثیر می‌گذارند. عمق نوری هواویزها (AOD) و نمای آنگستروم (α) از مهم‌ترین ویژگی‌های هواویزها به شمار می‌روند. هدف از مقاله حاضر، مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و نوری هواویزها در دو منطقه شهری تهران و مشهد برای دوره ۴ ساله از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ است. برای رسیدن به این هدف، داده‌های سنجنده OMI برای تعیین و محاسبه نمایه‌های نوری هواویزها به کار رفته است. مقایسه توزیع بسامد فصلی (500 nm) AOD در تهران و مشهد بیانگر این است که در همه فصول مقدار AOD در تهران بیشتر از مشهد بوده و به‌طور کلی غلظت هواویزهای تهران بیشتر از مشهد است. در هر دو شهر، بیشترین مقدار AOD در فصل بهار و تابستان رخ می‌دهد. همچنین کمترین مقدار AOD برای تهران و مشهد مربوط به فصل زمستان است. بررسی تغییرات روزانه α نیز نشان می‌دهد که مد غالب هواویزهای تهران مخلوطی از ذرات ریز و درشت و مد غالب هواویزهای مشهد از نوع ذرات ریز است. مقایسه توزیع بسامد فصلی α در تهران و مشهد حاکی از آن است که در هر فصل هواویزهای مشهد دارای ابعاد کمتر از هواویزهای غالب در تهران است.

کلیدواژه

هواویزهای جو، نمای آنگستروم، عمق نوری هواویزها، ماهواره OMI.

۱. سرآغاز

هواویزهای طبیعی ۴ تا ۵ برابر هواویزهای انسان‌زاد است (Kokhanovsky et al., 2007). انسان‌ها نقش مهمی در تولید هواویزها دارند. غلظت هواویزها به‌طور چشمگیری در اثر فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل افزایش می‌یابد و اضافه شدن غلظت هواویزها به مشکلات سلامت شهرنشینان مانند بیماری‌های ریوی در مناطق صنعتی پرجمعیت می‌انجامد. در برخی مراجع، هواویزها به دو دسته اصلی شامل مد ریز و مد درشت دسته‌بندی می‌شوند (Oneill et al., 2003; Kondratyev et al. 2006).

هواویزها ذرات جامد و مایع معلق در جو هستند که برحسب منشأ تولید، فرایند تشکیل و ابعادشان دسته‌بندی می‌شوند. معمولاً ابعاد هواویزها بین چند نانومتر تا چند ده میکرومتر متغیر است (Seinfeld and Pandis, 2006). هواویزها می‌توانند توسط منابع طبیعی مانند ذرات گرد و خاک، نمک دریایی و ذرات ناشی از فعالیت‌های آتش‌فشانی و انسان‌زاد از قبیل فعالیت‌های صنعتی، حمل‌ونقل و سوخت ایجاد شوند. در مقیاس جهانی، تعداد

این نوع مطالعات در دو منطقه فوق را فراهم کرده است. داده‌های استفاده شده در مقاله حاضر شامل داده‌های اندازه‌گیری شده با سنجنده OMI است که با سامانه پردازش علمی- پژوهشی مرکزی در گرین‌بلت و مریلند تولید و در مرکز خدمات اطلاعات و داده علوم زمینی گودارد ناسا^۴ (GES DISC) بایگانی می‌شوند. داده‌های مورد نیاز این پژوهش را می‌توان از مرکز (GES DISC) با فرمت HDF4 تهیه کرده و پس از تبدیل به فرمت NETCDF به صورت فایل متنی از آن‌ها بهره‌برداری کرد. این داده‌ها مربوط به بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۱۳ هستند. در این مقاله از محصولات سطح ۱۲ استفاده شده است که شامل تمام اندازه‌گیری OMI در قسمت روشن زمین است که تقریباً در طول یک‌بار چرخش دور مدار (حدود هر ۵۳ دقیقه)، ۱۶۵۰ اندازه‌گیری به فاصله دو ثانیه انجام می‌دهد. در حالت اندازه‌گیری جهانی، ۶۰ نقطه به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. در پژوهش حاضر، داده‌های AOD فایل فوق مربوط به طول‌موج‌های ۳۵۴، ۳۸۸ و ۵۰۰ نانومتر به کار رفته است. نمونه‌برداری کامل با عرض نوار برداشت ۲۶۰۰ کیلومتر برای تمام محدوده طول موج‌ها انجام می‌شود. داده‌های تهیه شده نخست برحسب سال و ماه، از ژانویه ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۱۳ مرتب شده‌اند. سپس تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی مقادیر AOD در طول‌موج‌های ۳۵۴، ۳۵۸ و ۵۰۰ نانومتر بررسی و تحلیل شد. همچنین توزیع بسامد داده‌ها در دوره زمانی مورد مطالعه در شهرهای تهران و مشهد تعیین و مقایسه می‌شود. در مرحله بعد، مقادیر نمای آنگستروم (AE) بر اساس طول موج‌های ۳۵۴ و ۵۰۰ نانومتر به دست آمده است. برای محاسبه AE در هر روز، از مقادیر τ_{λ_1} و τ_{λ_2} مربوط به عمق نوری طول‌موج‌های ۳۵۴ و ۵۰۰ نانومتر و هم‌چنین طول‌موج‌های مربوط به آن در رابطه زیر استفاده شده است:

$$AE = - \ln \left(\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} \right) / \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱) هواویزهای بسیار درشت مانند ذرات گرد و خاک و نمک دریا، AE کوچک (کمتر از ۱) دارند و

(Kokhanovsky, 2008; Chin et al., 2009) ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون، ذرات ریز به شمار می‌روند و عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند. ذرات با قطر بزرگ‌تر از ۲/۵ میکرون ذرات درشت نامیده می‌شوند و این ذرات اغلب از منابع طبیعی انتشار می‌یابند.

با وجود پیشرفت‌های فراوانی که در زمینه شناخت هواویزها و تأثیر آن‌ها بر اقلیم صورت گرفته است، عدم قطعیت ناشی از کمبود اطلاعات درباره چگونگی تغییرات زمانی و مکانی هواویزها و خصوصیات آن‌ها در نقاط مختلف جهان وجود دارد (Forster et al., 2007). یکی از منابع این عدم قطعیت را می‌توان به ضعف داده‌های مشاهداتی هواویزها در مقیاس جهانی و داده‌های اولیه مورد استفاده در مدل‌ها مربوط دانست. از این‌رو مطالعه ویژگی هواویزها در نقاط مختلف دنیا، به‌خصوص در مناطق شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. درک صحیح از آثار هواویزها بر اقلیم، میزان دید و فوتوشیمی جو نیازمند اطلاع از خصوصیات فیزیکی، نوری و توزیع اندازه آن‌ها است (Haywood & Boucher, Waggoner et al., 1981; Alados-Arboledas et al., 2008). هدف از مقاله حاضر، مطالعه و مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و نوری هواویزها در دو منطقه شهری تهران و مشهد برای دوره ۴ ساله از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این دو منطقه، عمق نوری هواویزها (AOD) در طول موج‌های متفاوت و نمای آنگستروم^۲ (α یا AE) برای تعیین اندازه ذرات است. برای رسیدن به هدف یادشده، از مجموعه داده‌های سنجنده OMI^۳ برای تعیین و محاسبه نمایه‌های نوری هواویزها استفاده شده است.

۲. داده‌ها و روش کار

دو کلان‌شهر تهران و مشهد بر اساس آخرین اطلاعات سالنامه آماری کشور در سال ۱۳۹۲، پرجمعیت‌ترین و وسیع‌ترین شهرهای کشور هستند که از نظر کیفیت هوا، وضعیت مناسبی ندارند. در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌ای با کیفیت خوب در سال‌های اخیر امکان انجام

تعداد و مختصات (طول، عرض و ارتفاع) نقاط شروع، زمان اجرای کل مدل، برای حرکت (پیش‌رو یا پس‌رو) و ترازهای بالای مدل تعیین شود. در این مقاله با استفاده از مدل HYSPLIT مسیر توده هوا در بازه‌های زمانی منتخب روی شهرهای تهران و مشهد ردیابی شده است تا اثر نوع توده هوا بر تغییرات شاخص‌های نورشناخت هواویزها تعیین شود.

۳. تحلیل نتایج

۱.۳. تغییرات زمانی

تغییرات روزانه دو ویژگی هواویزها شامل AOD در طول موج ۵۰۰ نانومتر و AE در طول موج‌های ۳۵۴ و ۵۰۰ نانومتر برای شهرهای تهران و مشهد در شکل‌های ۱-الف تا ۱-د نشان داده شده است. متغیر بودن مقادیر بیانگر وجود انواع مختلف ذرات هواویز در هر دو منطقه تهران و مشهد در طول سال است. براساس شکل ۱-الف، در شهر تهران مقادیر AOD از کمترین مقدار حدود ۰/۲ تا بیشترین مقدار حدود ۱/۶ متغیر است. در این شکل مشاهده می‌شود که در حدود ۷۳ درصد موارد، AOD دارای مقادیری کمتر از ۰/۶ است که بیانگر شفافیت جو در این شرایط است. از سوی دیگر، طبق شکل ۱-ب، مقادیر AOD در منطقه مشهد از کمترین مقدار حدود ۰/۱ تا بیشترین مقدار حدود ۰/۹ متغیر است و در بیشتر روزها (حدود ۹۵ درصد موارد) مقدار AOD به کمتر از ۰/۶ می‌رسد. در هر دو منطقه شهری، بیشترین مقدار AOD در ماه‌های مربوط به بهار و تابستان و کمترین مقدار AOD در فصل زمستان رخ می‌دهد. با توجه به مقادیر میانگین AOD در دوره مورد مطالعه، به‌طور کلی تهران در همه فصل‌ها تیره‌تر از مشهد است؛ یعنی غلظت هواویزها در تهران بیشتر از مشهد است. همچنین، تغییرات بین فصلی AOD در مشهد در سال‌های مورد مطالعه از تهران بیشتر بوده که حاکی از آن است که در تهران غلظت عددی هواویزها بیش از مشهد است.

شکل ۱-ج تغییرات روزانه AE را برای شهر تهران

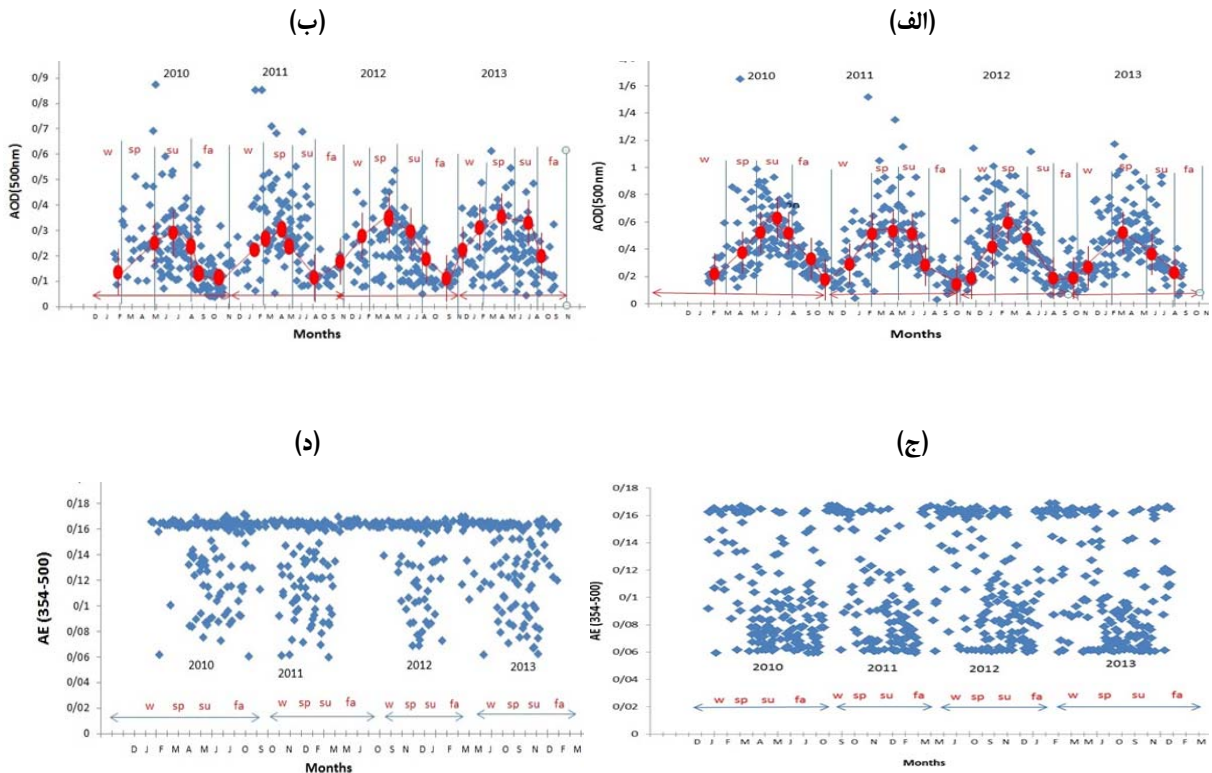
هواویزهای بسیار کوچک، برای نمونه دود تازه و هواویزهای مناطق شهری دارای AE بزرگ (بیش از ۱) هستند (Kaskaoutis & Kambezidis, 2006).

داده‌های هواشناسی استفاده شده در این پژوهش، دیدبانی‌های روزانه در ایستگاه‌های همدیدی تهران-مهرآباد و مشهد است. این دیدبانی‌ها که به فواصل زمانی سه ساعت گزارش می‌شود، شامل کمیت‌های بارش، سرعت و سمت باد است. برای شبیه‌سازی مسیر حرکت بسته هوا از مدل HYSPLIT^۵ استفاده شده است. مدل HYSPLIT که مربوط به اداره ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) است، مدلی با قابلیت ردیابی پس‌سوی ذرات در ترازهای مختلف جو است (Draxler & Rolph, 2011). این مدل شامل دو نسخه تحت وب و تحت رایانه است. در نسخه تحت وب، مدل در سایت NOAA قابل اجرا است، ولی به علت جلوگیری از اشباع سرور محدودیت‌هایی وجود دارد. نسخه تحت رایانه، نسخه کامل‌تری بوده و برای اجرای آن لازم است داده‌های هواشناسی بارگذاری شوند که ورودی اولیه مدل هستند. این مدل قابلیت اجرای هم‌زمان ردیابی چندگانه دارد. علاوه بر آن، کاربر می‌تواند از سه تراز ارتفاعی برای اجرای مدل استفاده کند که این ترازها معمولاً ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر هستند. هم‌چنین محاسبات می‌تواند به صورت پیش‌رو و پس‌رو انجام شود. از جمله کاربردهای مدل می‌توان به انجام تحلیل‌های هواشناسی و مؤلفه‌های باد، تعیین مسیر حرکت بسته هوا و مدل‌سازی گردوخاک اشاره کرد. مدل HYSPLIT از داده‌های هواشناسی شبکه‌بندی شده به‌عنوان ورودی اولیه استفاده می‌کند که این داده‌ها حاصل از مدل‌های هواشناسی مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی محیطی^۷ یا داده‌های تحلیل نهایی شده از سامانه گوارد داده‌های جهانی^۸ هستند. داده‌های مورد نیاز مدل شامل مؤلفه‌های سرعت باد، ارتفاع لایه مرزی، دما و فشار سطحی، میزان رطوبت، شار گرمای سطحی و میزان بارش است. برای اجرای مدل لازم است اطلاعات دیگر از جمله زمان شروع، مدت زمان شبیه‌سازی،

است. با مقایسه دو شکل ۱-ج و ۱-د می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو شهر تهران و مشهد، دو مد هواویز حاکم است؛ با این تفاوت که مد غالب هواویزهای تهران مخلوطی از ذرات ریز و درشت و مد غالب هواویزهای مشهد از نوع ذرات ریز است.

بررسی تغییرات طیفی AOD مربوط به شهر تهران در هر فصل نشان می‌دهد که مقادیر زیاد AOD در طول موج‌های کوتاه و مقادیر کم آن در طول موج‌های بلند وجود دارند (شکل ۲-الف). وجود شیب در نمودار تغییرات طیفی AOD معرف غالب بودن ذرات ریز و عدم وجود تغییرات براساس طول موج نشانگر حضور ذرات درشت است که با تقریب نظریه پراکندگی مای توجیه می‌شود (Kaufman et al., 2003؛ Kaskaoutis et al., 2013).

نشان می‌دهد که بازه تغییرات آن از ۰/۰۶ تا ۰/۱۶ است. با توجه به تعریف AE، متغیر بودن مقادیر بیانگر توزیع اندازه مختلف ذرات و منابع انتشار چندگانه هواویزها در هر منطقه است. به‌طور کلی، مقادیر زیاد AE حاکی از وجود ذرات ریزی است که توسط منابع انتشار مختلف شامل سوخت زیست‌توده، سوخت‌های فسیلی، و سایل نقلیه، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی تولید می‌شوند. مقادیر غالب نسبتاً کوچک AE در طول دوره مورد مطالعه، نشان‌دهنده حضور ذرات درشت گرد و خاکی است که احتمالاً از طریق فرارفت از مناطق خشک و نیمه‌خشک منتقل شده‌اند (Tiwari et al., 2013؛ Lodhi et al., 2013؛ Singh et al., 2004؛ Soni et al., 2011؛ Tiwari et al., 2015a). با توجه به شکل ۱-د، تغییرات زمانی AE در شهر مشهد نیز بیانگر گستره توزیع اندازه ذرات و منابع انتشار چندگانه هواویزها

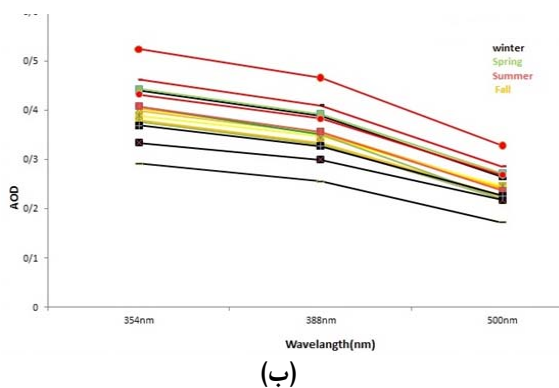


شکل ۱. تغییرات روزانه و میانگین فصلی AOD (500 nm) و AE (354-500 nm) در شهرهای تهران (الف و ج) و مشهد (ب و د). نمادهای w، sp، su و fa در شکل‌ها به ترتیب بیانگر فصل‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز هستند. نقاط قرمز میانگین فصلی و خطوط قرمز انحراف از مقدار استاندارد را نشان می‌دهند.

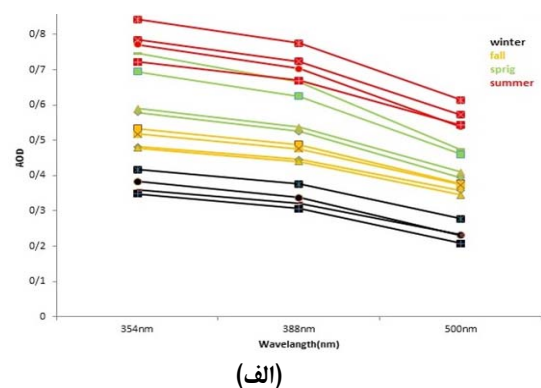
آن در فصل زمستان دیده می‌شود. به عبارتی دیگر، در دوره مورد مطالعه، در فصل تابستان تیره‌ترین جو و در زمستان شفاف‌ترین جو در شهرهای تهران و مشهد حاکم است. هم‌چنین نتیجه می‌شود، مد غالب هواویزهای تهران مخلوطی از ذرات ریز و درشت و مد غالب هواویزهای مشهد از نوع ذرات ریز است.

برای تعیین نوع هواویزهای هر منطقه، لازم است طبقه‌بندی آن‌ها با جزئیات بیشتر انجام شود. روش‌های متفاوت از جمله وابستگی طول‌موج ضریب پراکنش منفرد (Tiwari et al., 2015b)، همبستگی بین ضریب جذب و نمای آنگستروم (Eck et al., 1999؛ Bergstrom et al., 2007؛ Russell et al., 2010) و پراکنش بین AOD و AE (Kaskaoutis et al., 2009؛ Kaskaoutis et al., 2007؛ Giles et al., 2011) برای تمایز میان انواع مختلف هواویزها به کار می‌رود. در این پژوهش برای تفکیک هواویزها از روش منحنی پراکنش بین AOD و AE استفاده شده است. با توجه به منحنی پراکنش بین AOD و AE در شکل ۳ مشاهده می‌شود که انواع مختلف هواویز در هر دو منطقه تهران و مشهد وجود دارد. تغییرات فصلی توده هوا به دلیل شرایط جوی و تغییر منابع انتشار ذرات، باعث پدید آمدن ناهمگنی در غلظت و انواع ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذرات شده است.

با تعمیم نتایج مطالعات اخیر و توجه به اینکه مستقل بودن عمق نوری هواویزها نسبت به طول موج اندازه‌گیری شده از مشخصات ذرات درشت است، می‌توان گفت که تغییرات نسبی کوچک‌تر AOD ناشی از غالب بودن ذرات درشت در فصل‌های تابستان و پاییز است؛ در حالی که تغییرات طیفی بزرگ‌تر AOD در دو فصل بهار و زمستان به دلیل انتشار ذرات با ابعاد کوچک‌تر است. در طول موج‌های بلند، مقدار AOD برای همه فصل‌ها متفاوت است و در فصل زمستان دارای کمترین مقدار بوده و در فصل تابستان به بیشترین مقدار می‌رسد. در شکل ۲-ب مربوط به شهر مشهد، تغییرات طیفی کوچک‌تر AOD ناشی از حضور ذرات درشت در فصل پاییز و تغییرات طیفی بزرگ‌تر آن در بقیه فصول به دلیل انتشار ذرات ریز است. در طول موج‌های بلند، مقدار AOD برای همه فصل‌ها متفاوت است و در فصل زمستان دارای کمترین مقدار و در فصل تابستان دارای بیشترین مقدار است. با مقایسه تغییرات فصلی طیفی AOD در تهران و مشهد مشاهده می‌شود که در هر دو شهر، مقادیر بسیار AOD در طول موج‌های کوتاه و مقادیر کوچک آن در طول موج‌های بلند وجود دارند که دلیل وقوع آن، پراکندگی بیشتر نور در طول موج‌های کوتاه در اثر تغییر حالت ذرات ریز است (Kaskaoutis et al., 2013). در طول موج‌های کوتاه و بلند برای دو شهر تهران و مشهد، بیشترین مقدار AOD در فصل تابستان و کمترین

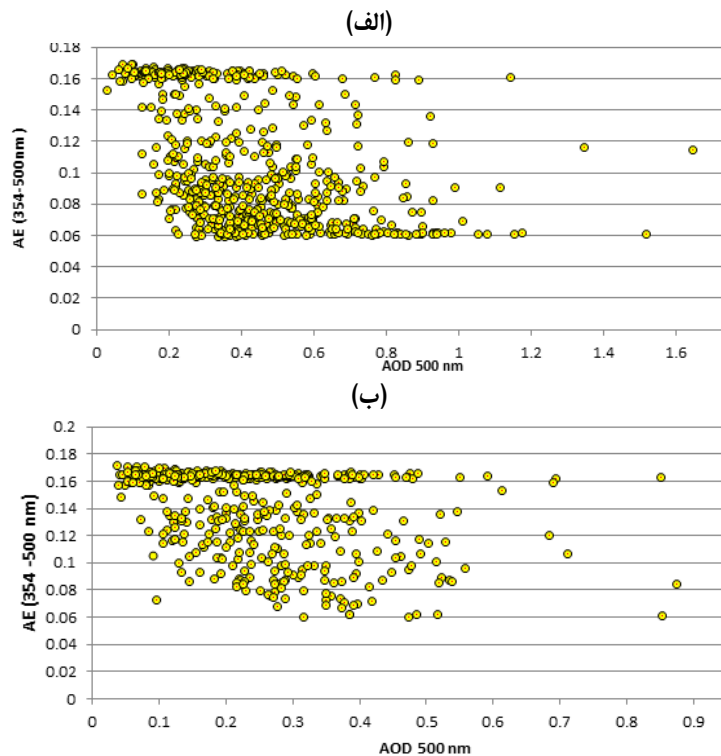


(ب)



(الف)

شکل ۲. تغییرات فصلی طیف AOD در دوره مورد مطالعه برای (الف) تهران و (ب) مشهد.

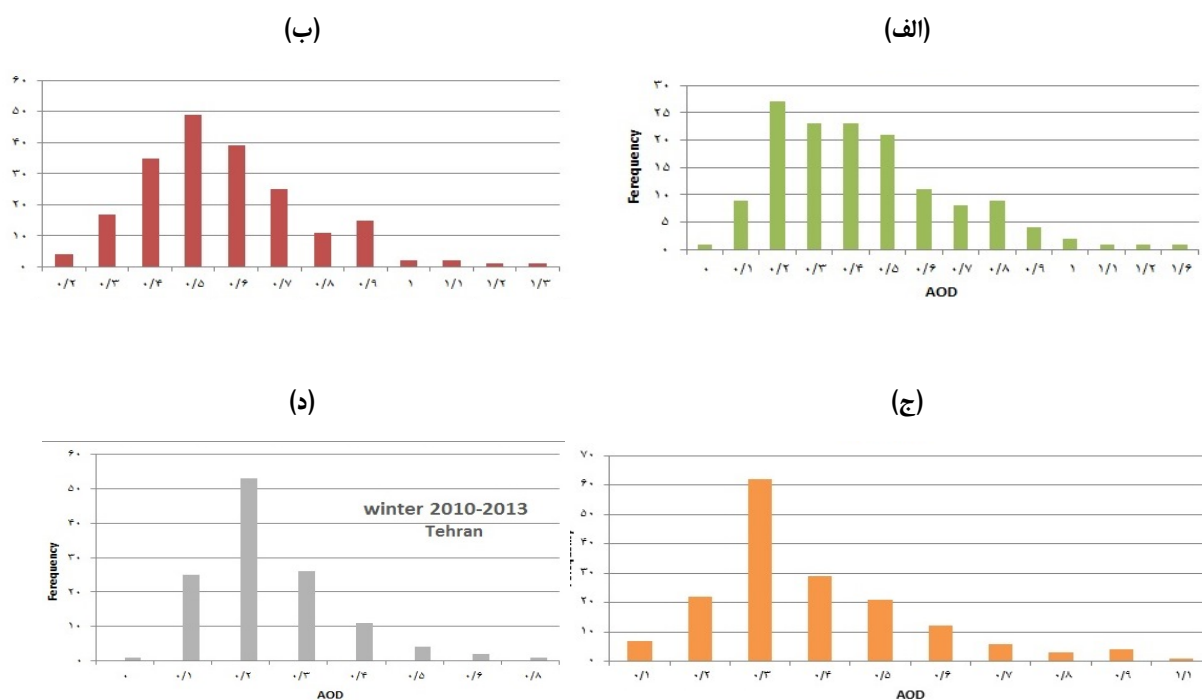


شکل ۳. منحنی پراکنش بین AOD (500 nm) و AE (354-500 nm) به منظور تفکیک انواع مختلف هواویزها برای (الف) تهران و (ب) مشهد.

بوده و بیشترین تغییرات AOD، در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ قرار دارد. در تابستان میانگین AOD به میزان ۰/۵۶ است و در تعداد کمی از روزهای این فصل مقدار آن به بیش از ۰/۸ می‌رسد (شکل ۴-ب). در این فصل بیشترین تغییرات AOD مربوط به محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ است. در فصل‌های پاییز و زمستان مقدار میانگین AOD به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۲۴ است (شکل‌های ۴-ج و ۴-د). در دوره مورد مطالعه، کمترین مقدار میانگین فصلی AOD در زمستان دیده می‌شود که این فصل از جو شفاف‌تری نسبت به دیگر فصول برخوردار است. براساس تحلیل توزیع فراوانی فصلی مقادیر AOD در تهران و در نظر داشتن این که درصد فراوانی مقادیر AOD بیش از ۰/۸ معرف جو تیره است، میانگین چهار ساله AOD در فصل بهار ۹ درصد، در تابستان ۱۸ درصد، در پاییز ۴ درصد و در زمستان ۵ درصد است. این مقادیر بیانگر تنوع کم هواویزها با منابع انتشار مختلف است؛ نتیجه‌ای که در برخی از مطالعات دیگر در مناطق گوناگون دنیا با اقلیم مشابه به دست آمده است.

منحنی پراکنش نشان می‌دهد که هواویز غالب در شهر تهران مخلوطی از ذرات ریز و درشت و در شهر مشهد ذرات ریز است. در تهران بیشتر هواویزها دارای AOD زیاد و AE با مقادیر کم و زیاد هستند؛ یعنی هواویزهای ریز و درشتی در جو تهران موجود است که باعث تیرگی بالا می‌شوند. از سوی دیگر، در مشهد بیشتر هواویزها دارای AOD کم و AE زیاد هستند؛ یعنی هواویزهای ریزی در جو مشهد وجود دارد که سبب تیرگی کم می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جو تهران تیره‌تر و همراه با مخلوطی از هواویزهای ریز و درشت بوده و هواویز غالب جو مشهد دارای ابعاد کوچک است.

تغییرات فصلی AOD و ناهمگنی آن برای منطقه تهران در شکل ۴ ارائه شده است. اختلاف زیاد در توزیع فراوانی AOD در هر فصل، نشانگر ناهمگنی است و وجود این ناهمگنی به دلیل شرایط متفاوت آب و هوایی و منابع مختلف انتشار هواویزها است. در فصل بهار (شکل ۴-الف)، کمترین مقدار میانگین چهار ساله AOD، برابر ۰/۴۳

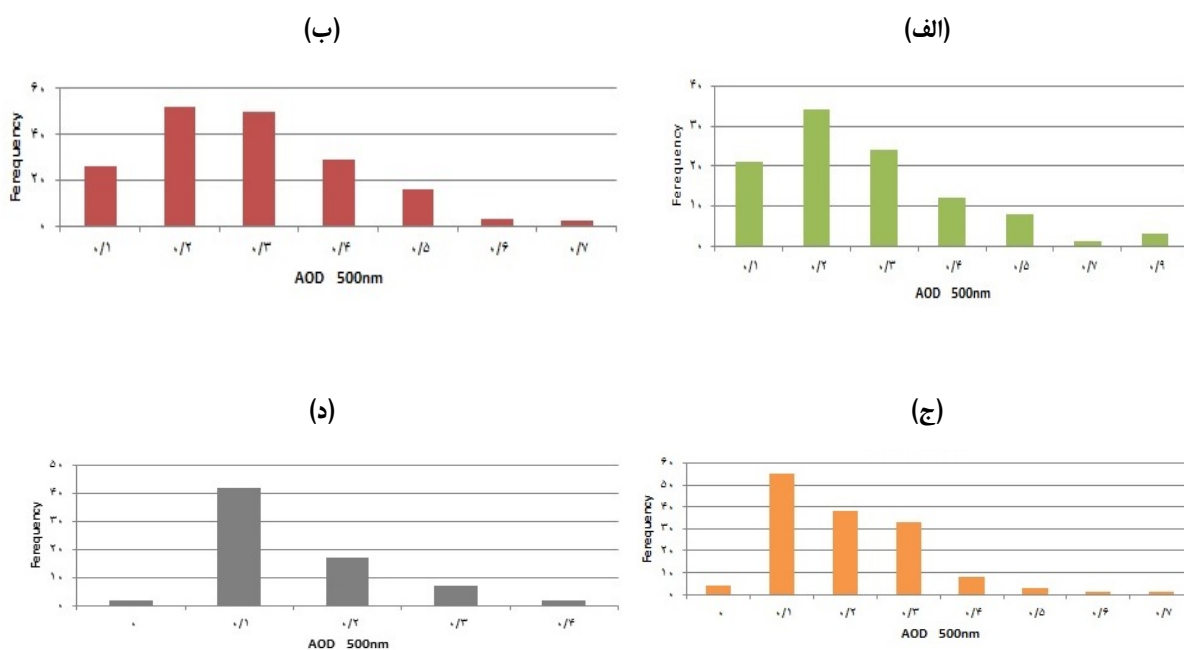


شکل ۴. توزیع فراوانی AOD (500 nm) برای الف. بهار؛ ب. تابستان؛ ج. پاییز و د. زمستان در تهران.

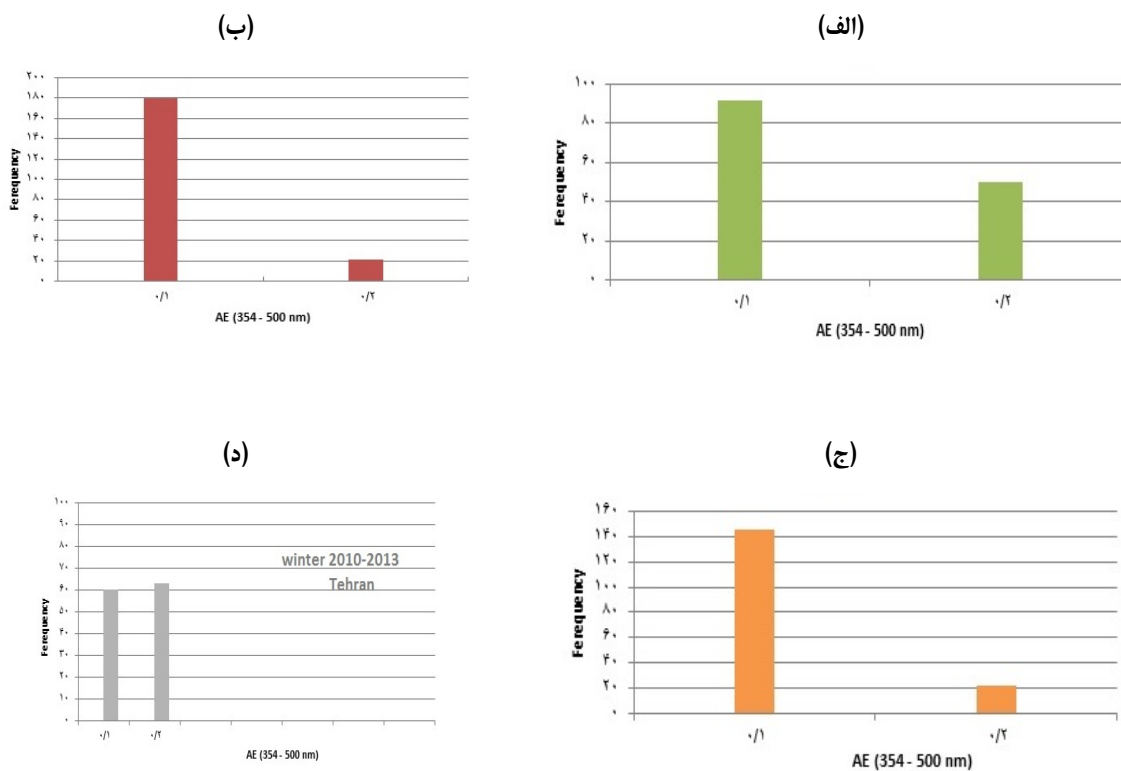
توزیع فراوانی فصلی مقادیر AOD (500 nm) در دو منطقه تهران و مشهد حاکی از آن است که در همه فصول مقدار AOD در تهران بیش از مشهد بوده و در نتیجه جو تهران تیره‌تر از مشهد است. این مسئله احتمالاً به دلیل وجود هواویزهای انسان‌زاد، به‌ویژه ناشی از حمل‌ونقل و همچنین رخدادهای بیشتر گردو خاک در تهران است. در فصل زمستان، توزیع فراوانی فصلی AOD در دو شهر تقریباً مقادیر مشابهی دارد که می‌تواند بیانگر وجود هواویزهایی با تنوع کم باشد. جزئیات درباره منابع انتشار هواویزها و مسیرهای عبوریشان در بخش بعد توضیح داده می‌شود.

تغییرات فصلی AE و توزیع اندازه هواویزها در شهر تهران نشانگر آن است که ناهمگنی در توزیع اندازه هواویزها در فصل‌های تابستان و پاییز تک‌مدی و در بهار و زمستان چندمدی است (شکل ۶). در فصل بهار، مقدار میانگین AE برابر ۰/۱۱ بوده و محدوده تغییرات آن بین ۰/۱ تا ۰/۲ است که حاکی از غلبه ذرات درشت در منطقه است.

شکل ۵ (الف تا د) تغییرات فصلی AOD و ناهمگنی آن در شهر مشهد را نشان می‌دهد. در فصل بهار، کمترین مقدار میانگین AOD برابر ۰/۲۵ است و بیشترین تغییرات آن در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارد. در فصل تابستان میانگین AOD دارای مقدار ۰/۲۶ است (شکل ۵-ب) که تقریباً مشابه با مقادیر میانگین فصل بهار است. نتایج بررسی توزیع فراوانی فصلی مقادیر AOD نشان می‌دهد که در روزهای کمی، AOD دارای مقادیر بیش از ۰/۸ است. بیشترین تغییرات مقدار AOD در منطقه مشهد در بازه ۰/۱ تا ۰/۳ است. در فصل‌های پاییز و زمستان مقدار میانگین AOD به ترتیب به مقادیر ۰/۲۴ و ۰/۲۱ می‌رسد. کمترین مقدار میانگین در فصل زمستان (شکل ۵-د) نشانگر آن است که این فصل از جو شفاف‌تری نسبت به دیگر فصول برخوردار است. تحلیل توزیع فراوانی فصلی مقادیر AOD در مشهد، با در نظر گرفتن مقدار آستانه AOD برابر ۰/۸ نشان می‌دهد که به جز فصل بهار (با فراوانی ۴ درصد)، در بقیه فصول مقادیر AOD بیش از ۰/۸ رخ نمی‌دهد. مقایسه



شکل ۵. توزیع فراوانی AOD (500 nm) برای الف. بهار؛ ب. تابستان؛ ج. پاییز و د. زمستان در مشهد

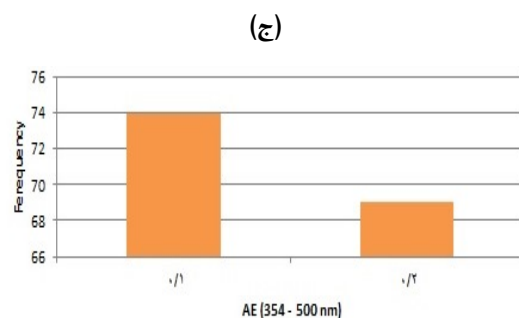
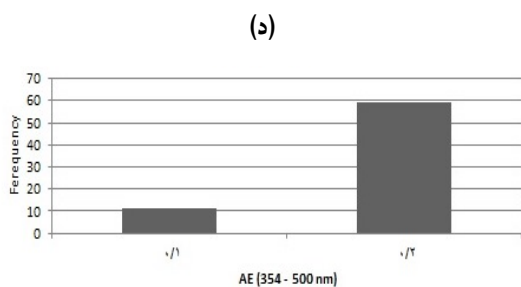
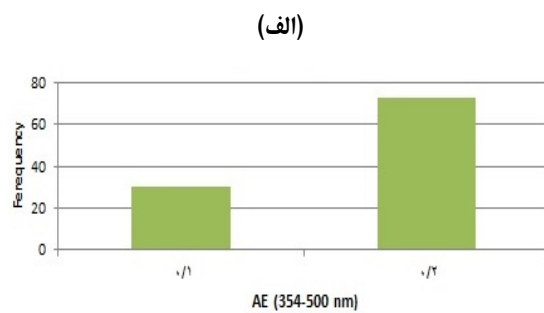
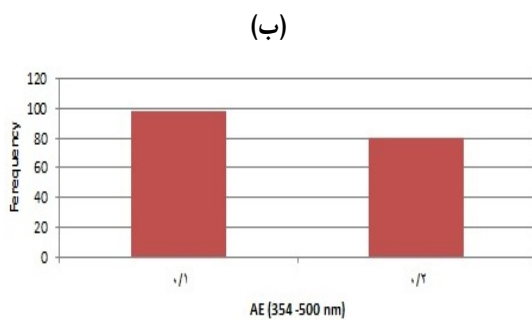


شکل ۶. توزیع فراوانی فصلی AE (354-500 nm) برای الف. بهار؛ ب. تابستان؛ ج. پاییز و د. زمستان در تهران.

گردوخاک نسبت به دیگر هواویزها بوده و وجود ذرات ریز در مشهد ناشی از بیشتر بودن هواویزهای انسان‌زاد نسبت به دیگر هواویزها است. در تمام فصول، میانگین نمای آنگستروم مشهد از تهران بیشتر است و از این رو ابعاد هواویزها در مشهد کوچک‌تر از تهران است.

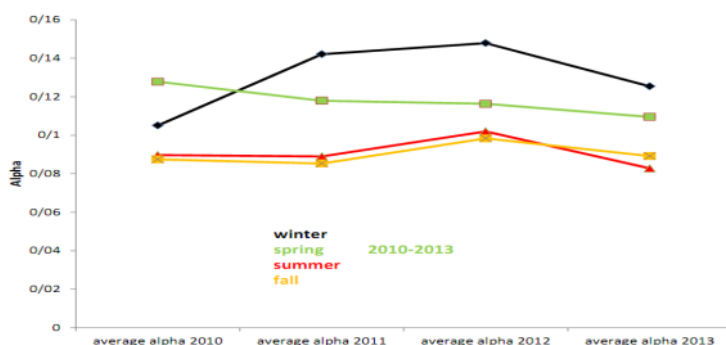
تغییرات میانگین فصلی AE تنوع هواویزها در دوره مورد مطالعه برای دو شهر تهران و مشهد در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در شهر تهران هواویزها در فصل زمستان نسبت به دیگر فصول از تنوع بیشتری برخوردار هستند. به بیان دیگر، تغییر توزیع اندازه هواویزها در فصل زمستان حاکی از وجود هواویزهای مختلف با اندازه‌های متفاوت بوده، در حالی که در دیگر فصل‌ها توزیع اندازه هواویزها تقریباً ثابت و بیانگر وجود یک نوع هواویز است.

در فصل‌های تابستان و پاییز میانگین AE برابر ۰/۰۹ و در فصل زمستان مقدار آن ۰/۱۳ است. مقدار وزنی توزیع تک‌مدی هواویزها ۰/۱ است که نشان‌دهنده وجود هواویزهای درشت در جو است. تغییرات فصلی AE و توزیع اندازه هواویزها در شهر مشهد بیانگر تک‌مدی بودن توزیع اندازه هواویزها در فصل زمستان و چندمدی بودن آن در دیگر فصول است (شکل ۷). در فصل بهار، مقدار میانگین AE برابر ۰/۱۵ و در فصل تابستان میانگین آن برابر ۰/۱۴ است. در فصل‌های پاییز و زمستان، مقدار AE به ترتیب به ۰/۱۳ و ۰/۱۴ می‌رسد. مقدار وزنی توزیع تک‌مدی هواویزها ۰/۲ بوده که نشانگر غلبه هواویزهای ریز است. مقایسه توزیع فراوانی فصلی AE (354-500 nm) در شهرهای تهران و مشهد بیانگر آن است که در شهر تهران ذرات درشت و در شهر مشهد ذرات ریز حاکم هستند. وجود ذرات درشت در تهران ناشی از تسلط ذرات

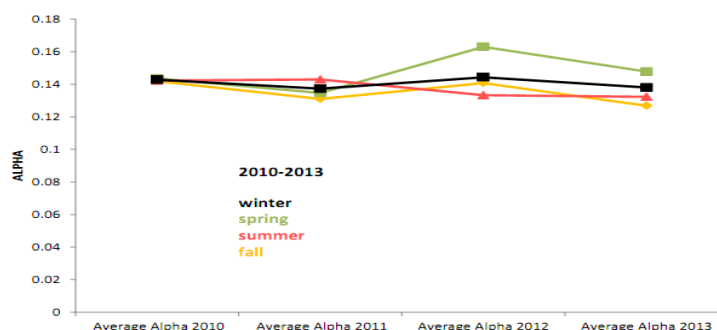


شکل ۷. توزیع فراوانی فصلی AE (354-500 nm) برای الف. بهار؛ ب. تابستان؛ ج. پاییز و د. زمستان در مشهد.

(الف)



(ب)



شکل ۸. میانگین AE تنوع هواویزها در فصل‌های مختلف در طول دوره مورد مطالعه برای (الف) تهران و (ب) مشهد.

شکل‌های ۹-الف تا ۹-و نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد ذرات هوا پس از عبور از کشور عراق و بیابان‌های اطراف آن، جو شهر تهران و در برخی موارد جو شهر مشهد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مطالعه موردی روز ۱ اکتبر ۲۰۱۱ به عنوان یک روز غبارآلود با جو تیره، دیده می‌شود که ذرات هوا از غرب کشور عراق و بیابان‌های اطراف آن عبور کرده و جو شهرهای تهران و مشهد را متأثر ساخته است (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب). در نمونه دیگر در روز ۶ ژوئن ۲۰۱۱ (شکل‌های ۹-ج و ۹-د)، مجدداً منبع ذرات هوای مستقر در تهران ناشی از بیابان‌های عراق است؛ در حالی که منبع ذرات هوا در مشهد مربوط به کشور ترکمنستان بوده که ذرات پس از عبور از فراز این کشور و بیابان‌های اطراف آن، باعث آلودگی جو مشهد شده است. در سومین نمونه از روزهای غبارآلود در روز ۲۹ آوریل ۲۰۱۳ (شکل‌های ۹-ه و ۹-و)، مشاهده می‌شود که ذرات هوای واقع بر تهران و

در شهر مشهد و در فصل بهار، هواویزها تنوع بیشتری نسبت به فصل‌های زمستان، تابستان و پاییز دارند. مقایسه نتایج مربوط به AE در دو شهر نشان می‌دهد که در فصل زمستان شهر تهران، تغییرات AE نسبت به دیگر فصول بیشتر بوده که بیانگر حضور انواع مختلف هواویزها در جو است. همچنین در شهر مشهد، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر AE وجود ندارد که حاکی از تسلط یک نوع هواویز است. در فصل بهار شهر مشهد، تنوع هواویزها مشهودتر است؛ در حالی که در فصل بهار شهر تهران هواویزهای درشت غالب هستند.

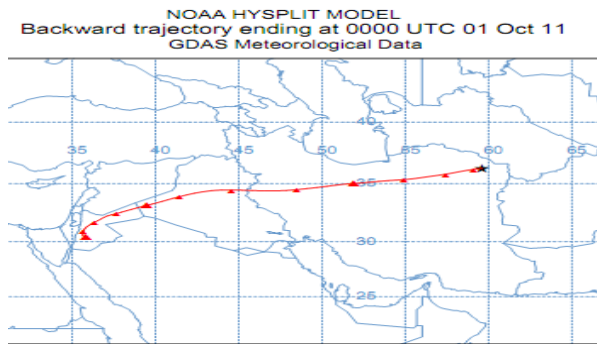
۲.۳. ردیابی مسیر ذرات در چند مطالعه موردی

برای بررسی منبع هواویزهای موجود در دو منطقه تهران و مشهد، سه روز با مقادیر زیاد AOD (جو تیره) و سه روز با مقادیر کم AOD (جو شفاف)، با کاربست مدل HYSPLIT مطالعه شده است. نمونه‌ای از مسیریاری توده هوا در روزهای با مقادیر زیاد AOD (روزهای غبارآلود) در

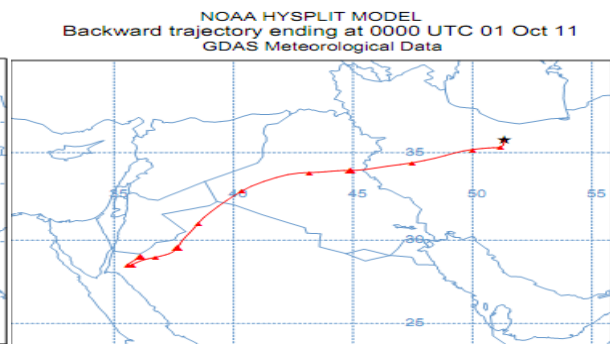
به دلیل هواویزهای انسانی ناشی از آلاینده‌ها، کارخانه‌ها و وسایل حمل و نقل باشد.

مشهد از فراز دریای خزر عبور کرده و به این دو شهر رسیده است. بنابراین، انتظار می‌رود که افزایش تیرگی جو

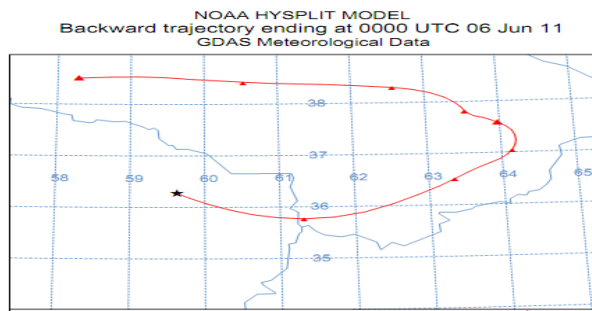
(ب)



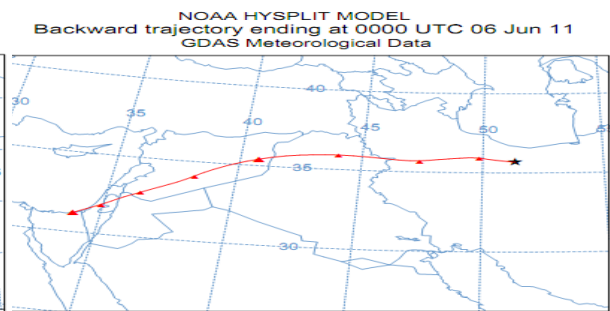
(الف)



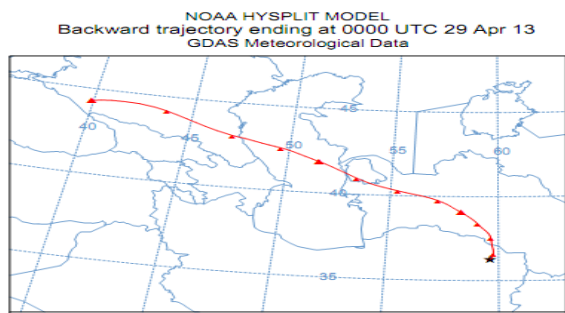
(د)



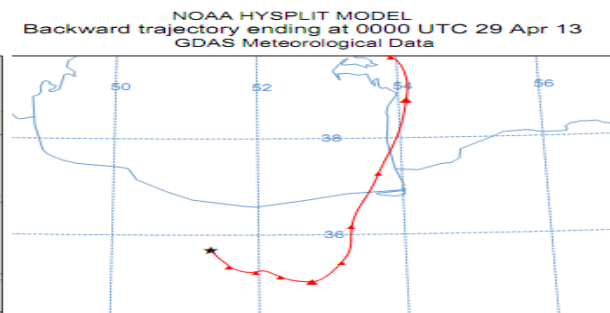
(ج)



(و)



(ه)

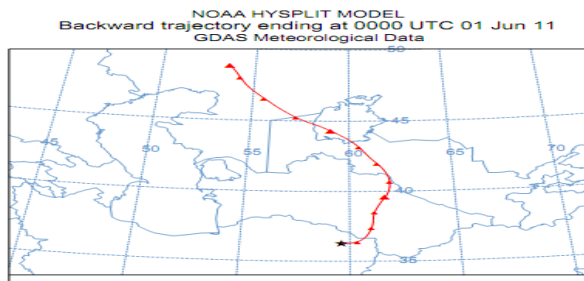


شکل ۹. مسیریابی پس‌روی ذرات هوا مربوط به دو شهر تهران و مشهد برای روزهای غبارآلود: ۱ اکتبر ۲۰۱۱ (الف-ب)، ۶ ژوئن ۲۰۱۱ (ج-د) و ۲۹ آوریل ۲۰۱۳ (ه-و).

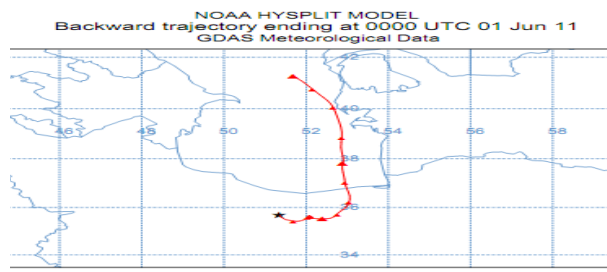
۲۰۱۲ (شکل های ۱۰-ج و ۱۰-د)، دیده می شود که منبع ذرات هوا در تهران از ترکیه و نواحی کوهستانی است و ذرات هوای واقع بر مشهد نیز پس از عبور از فراز دریای خزر، جو مشهد را متأثر ساخته است. در مطالعه موردی سوم در ۸ اوت ۲۰۱۳ (شکل های ۱۰-ه و ۱۰-و)، مشاهده می شود که ذرات هوا از فراز دریای خزر عبور کرده و جو شهرهای تهران و مشهد را تحت تأثیر قرار داده است.

مسیر ذرات هوا برای روزهای با مقادیر کم AOD که بیانگر شفافیت جو است، در شکل های ۱۰-الف تا ۱۰-و شبیه سازی شده است. در مطالعه موردی نمونه نخست از روزهای پاک مربوط به ۱ ژوئن ۲۰۱۱ (شکل های ۱۰-الف و ۱۰-ب)، مشاهده می شود که ذرات هوای منبع به ترتیب از فراز دریای خزر و دریاچه آرال عبور کرده و جو شهرهای تهران و مشهد را تحت تأثیر قرار داده است. در مطالعه ای دیگر از روز با جو شفاف مربوط به ۲۹ آوریل

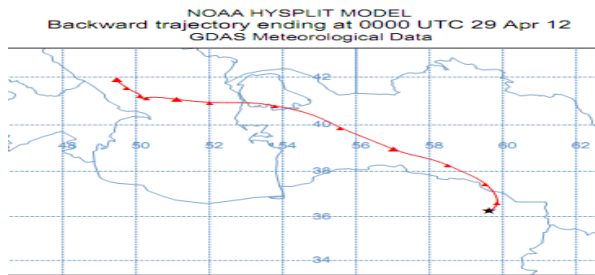
(ب)



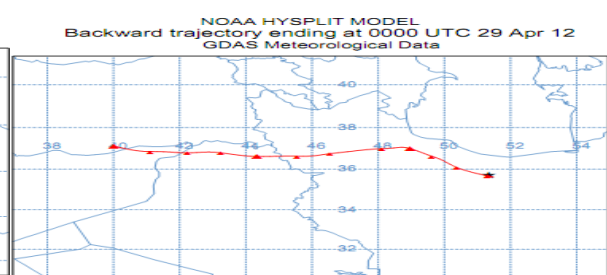
(الف)



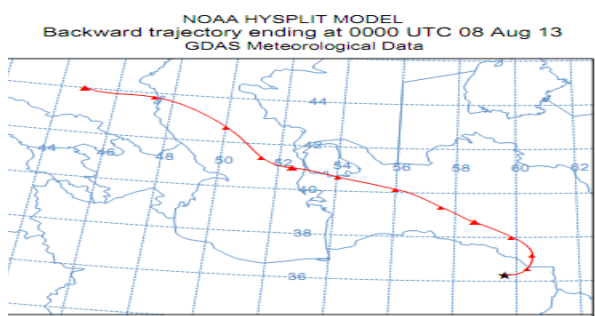
(د)



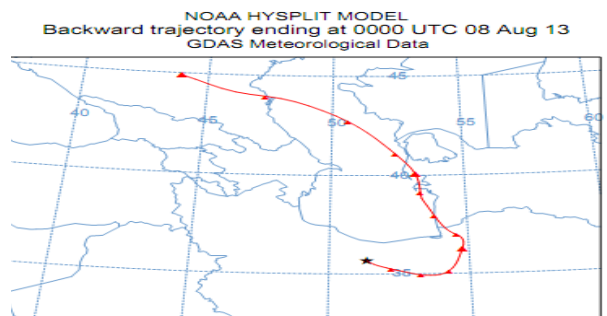
(ج)



(و)



(ه)



شکل ۱۰. مسیریابی پس روی ذرات هوا مربوط به دو شهر تهران و مشهد برای روزهای پاک: ۱ ژوئن ۲۰۱۱ (الف-ب)، ۲۹ آوریل ۲۰۱۲ (ج-د) و ۸ اوت ۲۰۱۳ (ه-و).

از میانگین زیاد AE، به دلیل حاکمیت ذرات ریز ناشی از فعالیت‌های انسانی است. هم‌چنین AOD بزرگ‌تر و AE کوچک‌تر همراه با انحراف از میانگین کمتر AE، به تسلط ذرات درشت مربوط می‌شود. مقایسه توزیع فراوانی فصلی AOD (500 nm) تهران و مشهد نشان می‌دهد که در همه فصول، مقدار AOD (500 nm) در تهران بیش از مشهد است؛ یعنی غلظت هواویزها در تهران از مشهد بیشتر است. به عبارت دیگر، جو تهران تیره‌تر از مشهد است که احتمالاً به دلیل وجود هواویزهای انسان‌زاد، به ویژه ناشی از حمل‌ونقل و هم‌چنین رخداد بیشتر گرد و خاک در تهران است. برای هر دو شهر، بیشترین مقدار AOD در فصل‌های بهار و تابستان و کمترین مقدار آن در فصل زمستان رخ می‌دهد. انحنای موجود در تغییرات طیفی AOD در طول دوره مورد مطالعه، وجود انواع مختلف هواویزها در هر دو منطقه را نشان می‌دهد که به دلیل منابع انتشار گوناگون و انتقال از مسیرهای مختلف به مکان مورد مطالعه است.

بررسی تغییرات زمانی AE (354-500 nm) نشانگر آن است که مد غالب هواویزهای تهران مخلوطی از ذرات ریز و درشت و مد غالب هواویزهای مشهد از نوع ذرات ریز است. تغییرات فصلی طیف AE تهران و مشهد متفاوت بوده و حاکی از وجود انواع مختلف هواویز در هر فصل است، به طوری که تغییرات شدید فصلی AE برای تهران در فصل زمستان و برای مشهد در فصل بهار دیده می‌شود. در فصل‌های تابستان و پاییز هر دو شهر نیز تغییرات وجود دارد. مقایسه توزیع فراوانی فصلی AE تهران و مشهد بیانگر آن است که در هر فصل، هواویزهای مشهد دارای ابعاد کمتر از هواویزهای غالب در تهران است. از منحنی پراکنش بین AOD (500 nm) و AE (354-500 nm) می‌توان نتیجه گرفت که هواویزهای موجود در تهران دارای AOD زیاد (جو تیره) و AE کم و زیاد هستند؛ یعنی هواویزهای ریز و درشتی در جو تهران وجود دارد که باعث تیرگی زیاد جو تهران می‌شوند. از سوی دیگر، در مشهد بیشتر هواویزها دارای AOD کم (جو شفاف) و AE زیاد

بنابراین براساس نتایج بررسی منبع هواویزها در روزهای غبارآلود و پاک شهر تهران با استفاده از مدل HYSPLIT می‌توان نتیجه گرفت که منبع آلودگی می‌تواند هم ناشی از ذرات گرد و خاکی باشد که از بیابان‌های عراق و اطراف آن وارد جو این شهر می‌شوند و هم ناشی از آلودگی‌های ناشی از کارخانه‌ها و وسایل حمل‌ونقل باشد. از این رو ترکیبی از هواویزهای ریز و درشت باعث تیرگی جو تهران می‌شود. در شهر مشهد، گاهی ذرات گردوخاک از بیابان‌های عراق و گاهی از بیابان‌های ترکمنستان وارد این شهر می‌شوند و به نظر می‌رسد که در مقایسه با آلودگی‌های ناشی از کارخانه‌ها و وسایل حمل‌ونقل کمتر باعث افزایش AOD (تیرگی جو) می‌شوند. در نتیجه هواویزهای با ابعاد کوچک‌تر غالب هستند. در روزهای با جو شفاف، منشأ توده‌های هوا بیشتر ناشی از عرض‌های جغرافیایی بالا، نواحی دریای خزر، دریای مدیترانه و ارتفاعات ترکیه بوده که در شفافیت جو دو شهر تهران و مشهد مؤثر هستند.

۴. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، برخی از ویژگی‌های نوری جو مانند عمق نوری هواویزها و نمای آنگستروم که تحت تأثیر خصوصیات فیزیکی و تمرکز ذرات تغییر می‌کنند، برای دوره چهار ساله در بازه سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ در دو منطقه آلوده شهری تهران و مشهد بررسی شده است. بدین منظور مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره OMI برای تعیین و محاسبه نمایه‌های نوری هواویزها به کار رفته است. از این مجموعه، از داده‌های AOD مربوط به طول‌موج‌های ۳۵۴، ۳۸۸ و ۵۰۰ نانومتر برای مقاله حاضر استفاده شده است. نمای آنگستروم نیز در طول‌موج‌های (354-500 nm) و با استفاده از رابطه ریاضی محاسبه شده است.

براساس نتایج، مشاهده می‌شود که AOD و AE، تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی فراوانی دارند. نتایج حاکی از آن است که مقادیر بالای AOD و AE همراه با انحراف

یادداشت‌ها

1. Aerosol Optical Depth (AOD)
2. Angestrum Exponent (AE)
3. Ozone Monitoring Instrument (OMI)
4. GES DISC: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)
5. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HYSPLIT)
6. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
7. National center for environmental prediction
8. Global data assimilation system

هستند؛ یعنی هواویزهای ریز در جو مشهد غالب بوده و سبب تیرگی کمتر جو مشهد می‌شوند.

نتایج اجرای مدل HYSPLIT نشان می‌دهد که منشأ تیرگی جو تهران، به طور هم‌زمان می‌تواند ناشی از هواویزهای انسان‌زاد و محلی و همچنین انتقال از مناطق دور به این شهر باشد. هواویزهای مشهد بیشتر محلی بوده و توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شوند و روزهای کمی وجود دارد که هواویزها از مناطق دور به این شهر انتقال می‌یابند.

منابع

- Alados-Arboledas, L., Alcántara, A., Olmo, F.J., Martínez-Lozano, J. A., Estellés, V., Cachorro, V., Silva, A. M., Horvath, H., Gangl, M., Díaz, A. and Pujadas, M. 2008. Aerosol columnar properties retrieved from CIMEL radiometers during VELETA 2002. *Atmos. Environ.*, 42(11): 2654-2667.
- Bergstrom, R.W., Pilewskie, P., Russell, P.B., Redemann, J., Bond, T.C., Quinn, P. K. and Sierau, B. 2007. Spectral absorption properties of atmospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 5937–5943.
- Chin, M., Kahn, R.A. and Schwartz, S.E. 2009. Atmospheric aerosol properties and climate impacts. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research.
- Draxler, R.R. and Rolph, G.D. 2011. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. National Oceanic and Atmospheric Administration, Air Resources Laboratory READY Web site. ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php.
- 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. *J. Geophys. Res.*, 104: 31333–31349.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G. and Nganga, J. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2 in climate change, *The Physical Science Basis*, 129-234.
- Giles, D.M., Holben, B.N., Tripathi, S.N., Eck, T.F., Newcomb, W.W., Slutsker, I., Dickerson, R.R., Thompson, A.M., Mattoo, S., Wang, S.H. and Singh, R.P. 2011. Aerosol properties over the Indo-Gangetic Plain: A mesoscale perspective from the TIGERZ experiment. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 116: D18.
- Haywood, J. and Boucher, O. 2000: Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geoph.*, 38(4): 513-543.
- Kaskaoutis, D.G. and Kambezidis, H.D. 2006. Investigation into the wavelength dependence of the aerosol optical depth in the Athens area. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 132(620): 2217-2234.
- Kaskaoutis, D.G., Kambezidis, H.D., Hatzianastassiou, N., Kosmopoulos, P.G. and Badarinath, K.V.S. 2007. Aerosol climatology: dependence of the Ångström exponent on wavelength over four AERONET sites. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7: 7347–7397.
- Kaskaoutis, D.G., Badarinath, K.V.S., Kharol, S.K., Sharma, A.R. and Kambezidis, H.D. 2009. Variations in the aerosol optical properties and types over the tropical urban site of Hyderabad. *J. Geophys. Res.* 114:D22204.doi:10.1029/2009JD012423.
- Kaskaoutis, D.G., Sinha, P.R., Vinoj, V., Kosmopoulos, P.G., Tripathi, S.N., Misra, A., Sharma, M. and Singh, R.P. 2013. Aerosol properties and radiative forcing over Kanpur during severe aerosol loading conditions. *Atmos. Environ.*, 79: 7–19.
- Kaufman, Y.J., Haywood, J.M., Hobbs, P.V., Hart, W., Kleidman, R. and Schmid, B. 2003. Remote sensing of vertical distributions of smoke aerosol off the coast of Africa. *Geophysical Research Letters*, 30 (16): 1831.
- Kokhanovsky, A.A., Breon, F.M., Cacciari, A., Carboni, E., Diner, D., Di Nicolantonio, W., Grainger, R. G., Grey, W.M.F., Höller, R., Lee, K. H. and Li, Z. 2007. Aerosol remote sensing over land: A comparison of satellite retrievals using different

- algorithms and instruments. *Atmospheric Research*, 85(3): 372-394.
- Kokhanovsky, A. A. 2008. *Aerosol optics: Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*. Springer-Praxis.
- Kondratyev, K.Y., Ivlev, L.S., Krapivin, V.F. and Varotsos, C.A. 2006. *Atmospheric aerosol properties: Formation, processes and impacts*. Springer-Praxis.
- Lodhi, N.K., Beegum, S.N., Singh, S. and Kumar, K. 2013. Aerosol climatology at Delhi in the western Indo-Gangetic plain: microphysics, longterm trends, and source strengths. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(3):1361-1375.
- Oneill, N.T., Eck, T.F., Smirnov, A., Holben, B.N. and Thulasiraman, S., 2003. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth. *Journal of Geophysical Research*, 108(17):1-15.
- Russell, P.B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A. D., De-Carlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J. M., Redemann, J., Dubovik, O. and Strawa, A. 2010. Absorption angstrom exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmos. Chem. Phys.* 10: 1155-1169.
- Seinfeld, H. and Pandis, N., 2006: *Atmospheric chemistry and physics—from air pollution to climate change*. Second Edition, John Wiley & Sons, 1203pp.
- Singh, R.P., Dey, S., Tripathi, S.N., Tare, V. and Holben, B. 2004. Variability of aerosol parameters over Kanpur, northern India. *J. Geophys. Res.* 109:D23206. doi:10.1029/2004JD004966.
- Soni, K., Singh, S., Tanwar, R.S. and Nath, S., 2011: Wavelength dependence of the aerosol Ångström exponent and its implications over Delhi, India. *Aerosol Sci. Technol.* 45: 1488-1498.
- Tiwari, S., Srivastava, A.K. and Singh, A.K. 2013. Heterogeneity in pre-monsoon aerosol characteristics over the Indo-Gangetic Basin. *Atmos. Environ.* 77: 738-747.
- Tiwari, S., Srivastava, A.K., Singh, A.K. and Singh, S. 2015a: Identification of aerosol types over Indo-Gangetic Basin: implications to optical properties and associated radiative forcing. *Environ. Sci. Pollut. Res.* doi:10.1007/s11356-015-4495-6.
- Tiwari, S., Hopke, P.K., Pipal, A.S., Srivastava, A.K., Bisht, D.S., Shani, T., Singh, A.K., Soni, V.K. and Attri, S.D. 2015b: Intra-urban variability of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India. *Atmos. Res.*, 166: 223-232.
- Waggoner, A.P., Weiss, R.E., Ahlquist, N.C., Covert, D.S., Will, S. and Charlson, R. J. 1981. Optical characteristics of atmospheric aerosols. *Atmos. Environ.* 1967, 15(10): 1891-1909.