

## بررسی توزیع زمانی و ارتفاعی هواویزهای نوع غبار برای جو زنجان

مهسا صالحی · امیر معصومی

ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک، کدپستی ۳۸۷۹۱ - ۴۵۳۷۱:

ایمیل: [a-masoumi@znu.ac.ir](mailto:a-masoumi@znu.ac.ir)

**چکیده.** داده سطح ۲ لیدار فضابرد کالیوپ مستقر بر روی ماهواره کالیپسو برای ۱۴۴ گذر شبانه از نزدیکترین فاصله به شهر زنجان بین سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی مورد تحلیل قرار گرفت. مشاهده شد که عمق اپتیکی هواویزها به عنوان معیاری از غلظت آنها در فصلهای بهار و تابستان روند افزایشی قابل ملاحظه‌ای دارد؛ به گونه‌ای که مقدار میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر از مقدار ۰/۰۶ در ماه دسامبر به ۰/۳۶ در ماه آگوست افزایش یافته است. تحلیل داده‌های نسبت واقطیدگی هواویزها نشان می‌دهد که ذرات غبار، هواویز غالب در تمامی این اندازه‌گیری‌ها بوده است. ارتباط معناداری بین غلظت غبار و سرعت باد سطحی دیده نشد و در همراهی با نتایج مدل هواشناسی HYSPLIT می‌توان نتیجه گرفت که غبار رسیده به جو زنجان منشأ محلی ندارد و اغلب از منطقه بین‌النهرین سرچشمه می‌گیرد. بررسی نمایه ارتفاعی توزیع غبار در جو نشان می‌دهد که کف لایه‌های غباری رسیده به جو زنجان اغلب در محدوده ۲۰۰ متری تا ۵ کیلومتری بالای سطح زمین قرار دارد. همچنین رویدادهای غباری ثبت شده با کاهش شدید نمایانی افقی همراه نیست که در توافق با نتیجه قبلی به معنی عبور لایه غباری از بالای شهر زنجان می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ماهواره کالیپسو، لیدار کالیوپ، هواویز، غبار، نسبت واقطیدگی، عمق اپتیکی هواویزها، لایه‌های غباری، زنجان.

## Studying the temporal and vertical distributions of dust aerosols for the atmosphere of Zanjan

Mahsa Salehi<sup>1</sup> · Amir Masoumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran;

email: [a-masoumi@znu.ac.ir](mailto:a-masoumi@znu.ac.ir)

**Abstract.** Level 2 data of Calipso space-borne lidar is used during 2006-2017 for 144 night overpass of Calipso satellite over Zanjan. It is seen that aerosol optical depth is increased during spring and summer. For example, maximum/minimum monthly-averaged AOD is 0.36/0.06 for August/December. The particulate depolarization ratio of data shows that dust is the dominant aerosol in the atmosphere of Zanjan. There is no relationship between AOD and surface wind speed. Also, based on the results of HYSPLIT backward trajectory model, the Tigris-Euphrates basin is the main dust source of the atmosphere of Zanjan. The parameter of horizontal visibility is not sharply decreased during dust events and it is accompanied by higher altitudes of recorded dust layers and therefore, one can conclude that dust particles have mainly external sources.

**Keywords:** Calipso satellite, Calipso space-borne lidar, aerosol, dust, depolarization ratio, aerosol optical depth, dust layer, Zanjan.

## ۱ مقدمه

هواویزها ذرات ریز جامد یا مایع معلق در جو هستند که به همراه مولکول‌های گازی و ابرها، جو زمین را تشکیل می‌دهند. هواویزها بر اثر عوامل طبیعی و همچنین بر اثر عوامل انسانی وارد جو می‌شوند و می‌توانند به طور مستقیم از طریق جذب و پراکندگی نور خورشید و تابش گرمایی زمین و نیز به طور غیرمستقیم از طریق تغییر ویژگی ابرها، بر نرخ تابشی زمین و درازمدت بر روی اقلیم تأثیر بگذارند. آنها تأثیر به‌سزایی بر روی آب‌وهوا و محیط زندگی بشر داشته و بر کیفیت هوا تأثیر گذاشته و باعث کاهش نمایانی جو می‌شوند [۱، ۲]. هواویزها توزیع زمانی و مکانی ناهمگنی دارند، بنابراین برای درک بهتر تأثیر هواویزها نیاز به مطالعه گسترده و پیوسته آنها است. به طور کلی مطالعه هواویزها به دو طریق اندازه‌گیری در محل و سنجش از دور صورت می‌گیرد [۱، ۲]. فعالیت واحد سینوپتیک ایستگاه‌های هواشناسی نمونه‌ای از روش‌های اندازه‌گیری در محل است و از جمله ابزارهای سنجش از دور زمینی نیز می‌توان به شیدسنج خورشیدی و لیدار اشاره کرد. در سنجش از دور فضاپرد که امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، ابزارهای اندازه‌گیری بر روی ماهواره‌های هواشناسی نصب می‌شوند که با استفاده از آنها می‌توان اجزاء جو را در مقیاس کل زمین مطالعه و بررسی کرد. از جمله این ابزارها می‌توان به تابش‌سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (MODIS) و لیدار ابر هواویز با قطبش متعامد (CALIOP) اشاره کرد [۱].

بر اساس مطالعات انجام شده پیشین که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی است هواویزهای غالب موجود در جو زنجان، شامل دو نوع هواویزهای شهری-صنعتی و غبار است [۳، ۴، ۵]. در این روش هیچ اطلاعاتی راجع به نمایه قائم هواویزها بدست نمی‌آید. از سوی دیگر داده‌های لیدار فضاپرد کالیوپ شامل اطلاعات مفیدی در مورد توزیع قائم ذرات هواویز است. به همین دلیل در این مقاله قصد داریم با تحلیل داده‌های لیدار فضاپرد کالیوپ اطلاعات بیشتری در مورد هواویزهای موجود در جو شهر زنجان بدست آوریم. برای تایید نتایج حاصل از داده‌های لیدار فضاپرد کالیوپ به مقایسه موردی آن با داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در شهر زنجان و نیز داده‌های سنجنده مودیس مستقر بر روی دو ماهواره Terra و Aqua خواهیم پرداخت.

## ۲ روش کار

مشاهدات ماهواره‌ای لیدار ابر-هواویز با مسیر یاب فرورسرخ با به اختصار CALIPSO ماهواره‌ای است که در سال ۲۰۰۶ با همکاری مشترک آژانس ناسا آمریکا و موسسه فضایی فرانسه به فضا پرتاب شد. این ماهواره در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری و در مدار خورشید آهنگ نزدیک مدار قطبی با زاویه میل ۹۸ درجه و سرعت تقریبی ۷/۵ کیلومتر بر ثانیه در حرکت است. هدف اصلی این ماهواره جمع‌آوری داده‌هایی جهت کمک به درک بهتر نقش هواویزها و ابرها در سیستم آب‌وهوایی می‌باشد. این ماهواره شامل ۳ ابزار اندازه‌گیری است که به صورت هم‌خط به طرف زمین جهت‌گیری کرده‌اند و عبارتند از: تابش‌سنج تصویر فرورسرخ، دوربین با زاویه دید بالا و لیدار کالیوپ [۶، ۷، ۸]. کالیوپ یک لیدار پس‌پراکنش کشتان حساس به قطبش نور است که شدت نور پس‌پراکنده شده را در دو طول موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر به صورت تفکیک ارتفاعی توسط آشکارساز ثبت و اندازه‌گیری می‌کند و با اعمال الگوریتم‌های مربوط به برهمکنش نور با ماده می‌توان از روی آن پارامترهایی را در مورد ابرها و هواویزها استخراج کرد [۶، ۷]. در این مقاله از داده‌های سطح ۲ لیدار کالیوپ از جمله عمق اپتیکی هواویزها، نسبت واقطیدگی هواویزها، ضریب خاموشی و کسر حجمی لایه‌های هواویزها استفاده شده است. در ادامه توضیح مختصری از این ویژگی‌ها آورده شده است و تحلیل آنها موضوع اصلی این کار است.

### ۱.۲ ضریب خاموشی

ضریب خاموشی یا Extinction Coefficient بیانگر خاموشی نور در عبور آن از واحد طول است و رابطه مستقیمی با غلظت ذرات جوی دارد [۹].

### ۲.۲ عمق اپتیکی

عمق اپتیکی هواویزها یا Aerosol Optical Depth که به اختصار AOD گفته می‌شود یک پارامتر بدون بعد است و بیانگر میزان خاموشی نور با طول‌موج مورد نظر در عبور قائم از جو زمین توسط هواویزها است. در نتیجه عمق اپتیکی

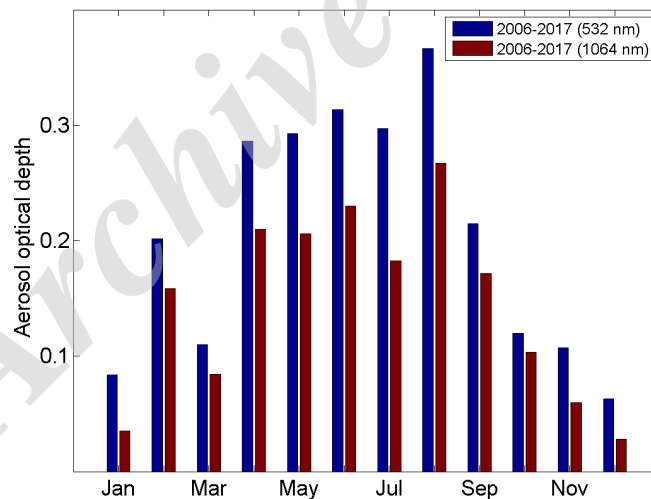
هواویزها معیاری از غلظت هواویزهای جوی خواهد بود [۱، ۱۰].

## ۳.۲ نسبت واقطبیگی

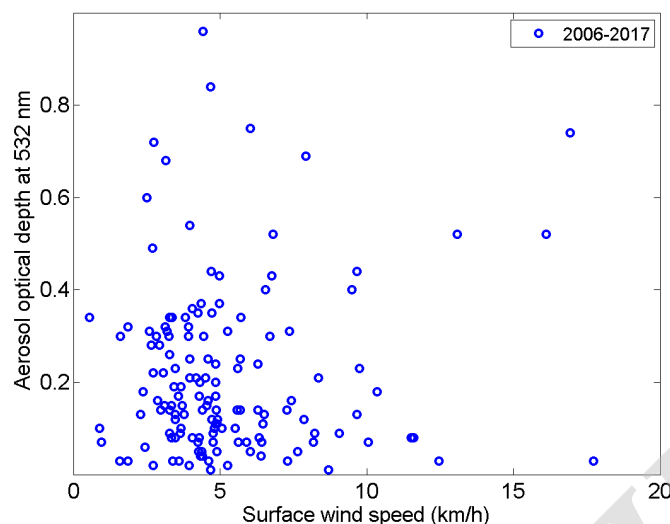
فرض کنید چشمه گسیلنده نور دارای قطبش موازی باشد. پس از برهمکنش نور با ذرات، نور پراکنده شده می‌تواند علاوه بر قطبش موازی، قطبش عمود هم داشته باشد. در چیدمان لیدار اغلب چشمه نور (لیزر) در کنار گیرنده قرار دارد و آشکارساز فقط نور پراکنده شده به سمت عقب یا به اصطلاح نور پس‌پراکنده شده را آشکارسازی می‌کند. با این فرض، نسبت شدت نور پس‌پراکنده شده با قطبش عمود به نور پس‌پراکنده شده با قطبش موازی را نسبت واقطبش یا Depolarization Ratio می‌نامند و این پارامتر با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ از داده‌های کالیوپ استخراج می‌شود [۹]. نسبت واقطبش عددی بین صفر و یک است و مقدار آن برحسب شکل و غلظت ذرات تغییر می‌کند. در محیط‌های چگال همانند داخل ابرها به دلیل پراکندگی چندگانه، این پارامتر عدد نسبتاً بزرگی بوده و از مرتبه ۰/۵ تا ۱ متغیر است. برای هواویزها این پارامتر بیشتر به شکل آنها وابسته است به‌گونه‌ای که برای ذرات کروی نسبت واقطبش در محدوده ۰ تا ۰/۱ خواهد بود و برای ذرات غیر کروی بین ۰/۱ تا ۰/۳ گزارش شده‌اند [۱۱]. هواویزهای شهری-صنعتی قابلیت حل شدن در آب را دارند و در نتیجه کروی شکل بوده و نسبت واقطبش آنها از مرتبه چند صدم است. از سوی دیگر غبار ذره غیر کروی است و نسبت واقطبش در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ را داراست. بنابراین این پارامتر می‌تواند به خوبی ذرات غبار را از سایر هواویزها نظیر آلاینده‌های شهری-صنعتی جدا کند.

## ۴.۲ کسر حجمی لایه‌های هواویز

لیدار کالیوپ در مسیر حرکت خود به دور زمین می‌تواند از هر طول مسیر ۳۳۳ متر و با تفکیک ارتفاعی ۳۰ متر داده‌برداری کرده و اطلاعات مربوط به ذرات جوی را در اختیار ما قرار دهد. در داده‌های سطح ۲ لیدار کالیوپ مرسوم است که برای طول مسیر ۵ کیلومتر و بازه ارتفاعی ۶۰ متر یک عدد به نام کسر حجمی لایه‌های هواویز (Aerosol Layer Fraction) گزارش شود. این بازه شامل ۳۰ داده خواهد بود و بر حسب مقادیر داده‌ها می‌توان تخمین زد که آن داده مربوط به هواویز هست یا ابر. به این ترتیب پارامتر کسر حجمی لایه‌های هواویز با عددی بین صفر تا ۳۰ گزارش می‌شود که عدد ۳۰ به معنی محیط کاملاً هواویزی و عدد صفر به معنی محیط کاملاً ابری است [۸، ۹].



شکل ۱: مقدار میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزهای زنجان در دو طول موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر در طول سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی برای ۱۴۴ گذر ماهواره کالیپسو. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم عمق اپتیکی هواویزها از اواسط بهار شروع به افزایش کرده و سپس از پاییز شروع به کاهش می‌کند که این افزایش و کاهش عمق اپتیکی بر افزایش و کاهش غلظت هواویزها دلالت دارند.



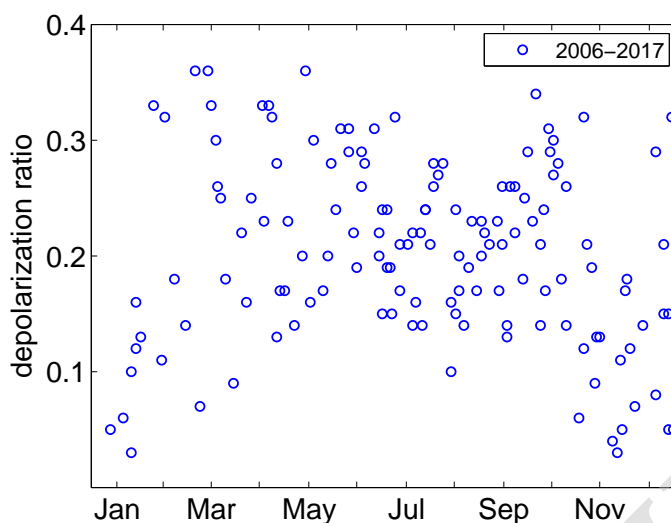
شکل ۲: عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر بر حسب سرعت باد سطحی بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی برای ۱۴۴ گذر ماهواره کالیپسو. سرعت باد سطحی اغلب بین ۰ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت است و AOD بیشتر که متناسب با غلظت‌های هواویزی بیشتر است در سرعت‌های کم نیز دیده می‌شود و شاهد هیچ ارتباط معناداری بین افزایش AOD و افزایش سرعت باد سطحی نیستیم. در نتیجه می‌توان گفت هواویز زنجان چشمه غباری محلی مهمی ندارد.

### ۳ مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها

شهر زنجان دارای شیدسنج خورشیدی است که از سال ۲۰۰۶ شروع به داده‌برداری نموده و از سال ۲۰۰۹ عضو مهم‌ترین شبکه شیدسنج خودکار بررسی هواویزها (AERONET) است [۱]. داده‌های مبتنی بر شیدسنج خورشیدی بر حضور ذرات غبار و هواویزهای شهری-صنعتی در جو زنجان دلالت دارند [۳، ۴، ۵]. بنابراین می‌خواهیم با استفاده از داده‌های کالیپو اولاً تاییدی بر نتایج حاصل از شیدسنج خورشیدی داشته باشیم و ثانیاً در مورد چگونگی توزیع ارتفاعی هواویزها نیز اطلاعاتی کسب کنیم.

دوره تناوب ماهواره کالیپسو ۱۶ روز است و در طی ۱۶ شبانه روز ماهواره از هر منطقه دوبار عبور می‌کند که یکی از این گذرها در روز و دیگری در شب صورت می‌گیرد [۶]. با توجه به اینکه منطقه زنجان دارای شیدسنج خورشیدی است بنابراین گذر شبانه این ماهواره برای ما حائز اهمیت است. برای منطقه زنجان گذر شبانه در حوالی ساعت ۲۲:۵۰ گرینویچ اتفاق می‌افتد. نزدیک‌ترین گذر کالیپسو تقریباً در ۵۰ کیلومتری شمال غربی زنجان صورت می‌گیرد. در این پژوهش داده‌های سطح ۲ لیدار کالیپو برای بازه‌ای به طول ۲۵ کیلومتر از گذر این ماهواره در شمال غربی زنجان و در طول سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی مورد بررسی قرار گرفت. در این بازه زمانی ۱۴۴ گذر شبانه را شاهد بودیم که نتایج حاصل از این ۱۴۴ داده را به صورت آماری تحلیل کرده و در ادامه می‌آوریم.

عمق اپتیکی هواویزها، معیاری از غلظت و میزان هواویزهای جوی است. این پارامتر دارای کمیته مقدار ۰/۰۱ است و دقت اندازه‌گیری آن نیز ۰/۰۱ می‌باشد [۱، ۱۰]. بزرگ یا کوچک بودن این عدد به حضور ذرات بیشتر یا کمتر هواویزها دلالت می‌نماید. در شکل ۱ مقدار میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزها برای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم در ۶ ماهه اکتبر تا مارس، مقدار عمق اپتیکی هواویزها نسبتاً کم است. در این ماه‌ها به دلیل رطوبت موجود در خاک، چشمه‌های غباری در منطقه خیلی فعال نیستند. بنابراین انتظار داریم که هواویزهای کمتری در جو وجود داشته باشند. از طرفی در ماه‌های خشک سال یعنی آوریل تا سپتامبر که شامل فصول بهار و تابستان است شاهد هواویزهای بیشتری در جو زنجان هستیم. در این ۶ ماه منطقه به سمت خشکی رفته و رطوبت کمتر می‌شود و بنابراین چشمه‌های غباری فعال‌تر شده و انتظار داریم که غبار بیشتری وارد جو شود. همانطور که پیشتر گفته شد جو



شکل ۳: نسبت واقطبی‌دگی هواویزهای جو زنجان در طول سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۶ برای ۱۴۴ گذر شبانه کالیپسو. مقادیر نسبت واقطبی‌دگی بر حضور غالب غبار در جو زنجان دلالت دارد.

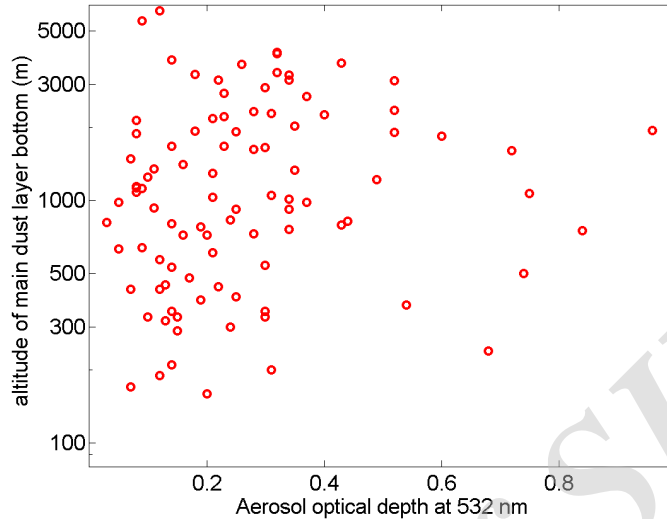
زنجان شاهد حضور هواویزهای شهری-صنعتی و غبار است. چشمه‌های تولیدکننده هواویز شهری-صنعتی در طول سال تقریباً ثابت است. بنابراین افزایش یا کاهش عمق اپتیکی هواویزها به افزایش یا کاهش حضور غبار در شهر زنجان نسبت داده می‌شود [۳، ۴، ۵].

در شکل ۲، عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر را بر حسب سرعت باد سطحی رسم نموده‌ایم. همانطور که مشاهده می‌کنیم سرعت باد سطحی اغلب بین ۰ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت متغیر است. همچنین شاهد غلظت‌های هواویزی بالا در سرعت‌های کم نیز هستیم و هیچ ارتباط معناداری نیز بین افزایش AOD و افزایش سرعت باد سطحی دیده نمی‌شود. اگر غبار دارای چشمه محلی باشد، با افزایش سرعت باد سطحی باید شاهد افزایش عمق اپتیکی هواویزها نیز باشیم. چون در این شکل شاهد چنین ارتباطی نیستیم لذا همانند پژوهش‌های صورت گرفته قبلی، می‌توان نتیجه گرفت که غبار زنجان چشمه محلی مهمی نداشته و غبار موجود در جو زنجان را می‌توان به چشمه‌های خارجی نسبت داد [۱۲].

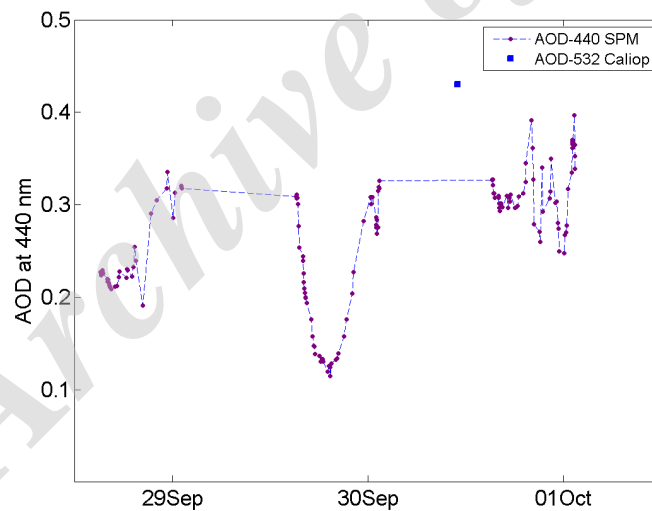
شکل ۳ نشان‌گر نسبت واقطبی‌دگی هواویزها در جو زنجان در طی این سال‌ها است. غبار تنها هواویز غیرکروی موجود در جو است که مقدار نسبت واقطبی‌دگی آن خیلی متفاوت‌تر از مقدار نسبت واقطبی‌دگی سایر هواویزها است. لذا با اطلاع داشتن از مقدار این پارامتر می‌توان هواویز نوع غبار را از سایر هواویزها تشخیص داد. زمانی که مقدار این نسبت از حدود ۰/۱ بیشتر گزارش شود یعنی هواویز غالب منطقه غبار است [۱۱]. هواویزهای نوع شهری-صنعتی و غبار دو نوع اصلی هواویزهای جو زنجان هستند. مقدار نسبت واقطبی‌دگی هواویزهای کروی شکل نوع شهری-صنعتی از مرتبه چند صدم است در حالیکه نسبت واقطبی‌دگی غبار خالص معمولاً از مرتبه ۰/۳ گزارش می‌شود. از آنجایی که این دو نوع ذرات همیشه در جو زنجان وجود دارند بسته به غلظت هر کدام نسبت واقطبی‌دگی بین مقادیر نسبت واقطبی‌دگی این دو ذره متغیر خواهد بود. با توجه به شکل ۳ درمی‌یابیم که مقدار نسبت واقطبی‌دگی در ماه‌های سرد و مرطوب سال کمتر شده است و دلیل آن افزایش سهم هواویزهای نوع شهری-صنعتی در جو می‌باشد. از سوی دیگر در ماه‌های گرم و خشک با افزایش فعالیت چشمه‌های غباری شاهد افزایش سهم غبار در جو هستیم که منجر به افزایش قابل توجه پارامتر نسبت واقطبی‌دگی در این ماه‌ها می‌شود.

با استناد به مقدار نسبت واقطبی‌دگی حاصل از داده‌های کالیپس می‌توان ذرات غبار را از سایر هواویزها به صورت ارتفاعی و با تفکیک ۶۰ متری جدا کرد. بدین ترتیب حضور یا عدم حضور ذرات غبار را به صورت ارتفاعی مشخص می‌کنیم و بر حسب آن کف، سقف و ضخامت لایه‌های غباری را معین می‌کنیم و چگال‌ترین لایه غباری را به عنوان لایه غباری اصلی در نظر می‌گیریم. در شکل ۴ ارتفاع کف لایه غباری اصلی برای تمامی گذرهای شبانه در طی این سال‌ها را بر حسب عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر رسم نموده‌ایم. از شکل ۴ برمی‌آید که کف لایه‌های غباری از

ارتفاع حدود ۲۰۰ متری تا ۵ کیلومتری بالای سطح منطقه مورد مطالعه گسترده شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود که لایه‌های غباری اغلب در ارتفاعات بالا دیده شود. این بدین معنی است که ذرات غبار از چشمه‌های غباری دوردست به جو زنجان منتقل شده‌اند و تاییدی بر بحث‌های پیشین می‌باشد.



شکل ۴: ارتفاع کف لایه غباری اصلی بر حسب عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر.



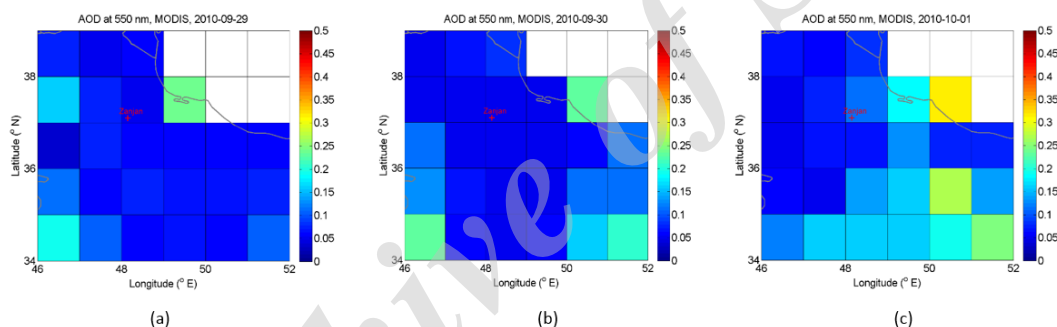
شکل ۵: عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۴۴۰ نانومتر با استفاده از داده‌های شیدسنج خورشیدی (SPM) در طی ۳ روز متوالی از ۲۹ سپتامبر تا ۱ اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی. تک نقطه آبی نیز مربوط به مقدار عمق اپتیکی هواویزها در لحظه داده‌برداری کالیوپ در طول موج ۵۳۲ نانومتر است که در توافق با روند افزایشی عمق اپتیکی هواویزهای حاصل از شیدسنج خورشیدی است.

## ۴ بحث

از میان ۱۴۴ گذر کالیپسو در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷، روز به عنوان رویدادهای غباری برای منطقه زنجان انتخاب شد که دلیل آن دارا بودن مقدار عمق اپتیکی بیشتر از مقدار میانگین و همینطور مقدار نسبت واقطبی‌دگی در محدوده مقدار نسبت واقطبی‌دگی مختص غبار است. این ۱۳ رویداد غباری مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در اغلب آن‌ها غبار از چشمه‌های منطقه بین‌النهرین به جو زنجان منتقل شده‌اند. این رویدادها اغلب از اوایل بهار تا اواخر تابستان گسترده شده‌اند. به عنوان نمونه‌ای از این رویدادهای غباری، روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ میلادی انتخاب شده است و در ادامه با جزئیات مورد بحث قرار می‌گیرد.

در شکل ۵، عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۴۴۰ نانومتر با استفاده از داده‌های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان در طی ۳ روز متوالی از ۲۹ سپتامبر تا ۱ اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی رسم شده است. با توجه به شکل، شاهد تغییرات معناداری در عمق اپتیکی هواویزها از روز ۳۰ سپتامبر تا ۱ اکتبر هستیم و با افزایش عمق اپتیکی هواویزها مواجه هستیم. بدین ترتیب می‌توان ادعا کرد که از اواسط روز ۳۰ سپتامبر تا ۱ اکتبر شاهد رویداد غباری در زنجان هستیم. تک نقطه آبی نیز عمق اپتیکی هواویزها در لحظه داده‌برداری کالیپ در طول موج ۵۳۲ نانومتر را نشان می‌دهد که برابر مقدار ۰/۴۳ است. با توجه به مقدار میانگین عمق اپتیکی هواویزهای ناشی از اندازه‌گیری کالیپ (۰/۲۲)، می‌توان استدلال کرد که در لحظه داده‌برداری شاهد افزایش قابل توجه عمق اپتیکی هواویزها هستیم.

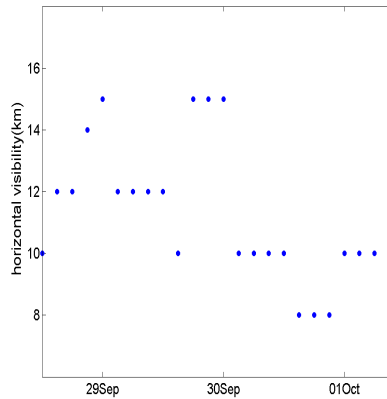
در ادامه برای تأیید نتایج، از داده‌های سنجنده مودیس نصب شده بر روی دو ماهواره Terra و Aqua استفاده نموده‌ایم. شکل ۶ میانگین روزانه داده‌های عمق اپتیکی در طول موج ۵۵۰ نانومتر حاصل از داده‌های سنجنده مودیس را نمایش می‌دهد. تغییرات رنگ بر روی نقشه‌ها نمایشگر تغییرات عمق اپتیکی هواویزها است و همانطور که مشخص است ما شاهد افزایش عمق اپتیکی هواویزها در روز ۱ اکتبر و در منطقه زنجان هستیم که این در توافقی با داده‌های حاصل از شیدسنج خورشیدی است و تأییدگر افزایش غلظت هواویزهای غباری در منطقه است.



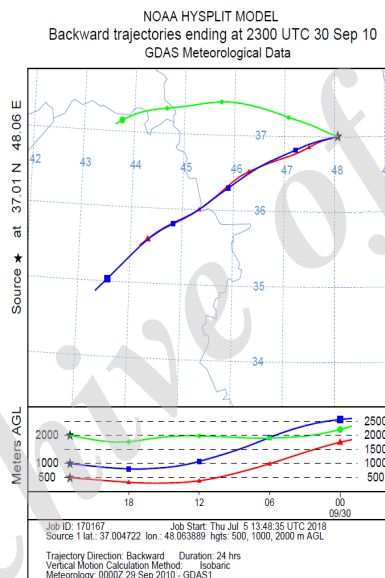
شکل ۶: عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر حاصل از داده‌های سنجنده مودیس برای ۳ روز متوالی (a) ۲۹ سپتامبر، (b) ۳۰ سپتامبر و (c) ۱ اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی. مقادیر عمق اپتیکی برای طول جغرافیایی ۴۶ تا ۵۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ تا ۳۹ درجه شمالی رسم شده است و موقعیت شهر زنجان نیز با علامت + مشخص شده است.

جهت دانستن فرونشست غبار به سطح زمین، داده‌های نمایانی افقی حاصل از داده‌های ایستگاه سینوپتیک برای ۳ روز متوالی فوق‌الذکر در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم شاهد کاهش نمایانی افقی تا حدود ۱۰ کیلومتر در روز ۳۰ سپتامبر هستیم در حالی که نمایانی افقی در روز قبل آن تا ۱۵ کیلومتر نیز گزارش شده است. اما از روز ۳۰ سپتامبر تا ۱ اکتبر شاهد کاهش نمایانی افقی تا ۸ کیلومتر نیز هستیم که این کاهش نمایانی افقی حاکی از افزایش غلظت غبار و فرونشست بخشی از آن می‌باشد.

داده‌های حاصل از لیدار کالیپ در توافقی با داده‌های سنجنده مودیس، شیدسنج خورشیدی و ایستگاه سینوپتیک بیانگر آن است که در لحظه خاص گذر کالیپسو در اواخر شب ۳۰ سپتامبر ۲۰۱۰ میلادی و همچنین در روز بعد از آن با افزایش غبار در جو زنجان روبرو هستیم. اکنون به دنبال این هستیم که در این لحظه خاص چه جریان غباری توانسته غبار را به جو منطقه زنجان بیافزاید. بدین منظور از داده‌های مدل HYSPLIT استفاده نموده‌ایم که با استفاده از این مدل می‌توان مسیر حرکت بسته‌های هوای رسیده به هر منطقه را در زمان‌ها و ارتفاع‌های مختلف ردیابی نمود [۱۳]. شکل ۸ مدل مسیر بازگشتی HYSPLIT در ساعت UTC ۲۳ روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ برای ۳ ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر بالای



شکل ۷: تغییرات نمایانی افقی حاصل از داده‌های ایستگاه سینوپتیک زنجان در طی ۳ روز متوالی از ۲۹ سپتامبر تا ۱ اکتبر سال ۲۰۱۰. همانطور که دیده می‌شود از روز ۳۰ سپتامبر تا ۱ اکتبر شاهد کاهش نمایانی افقی تا ۸ کیلومتر نیز هستیم.

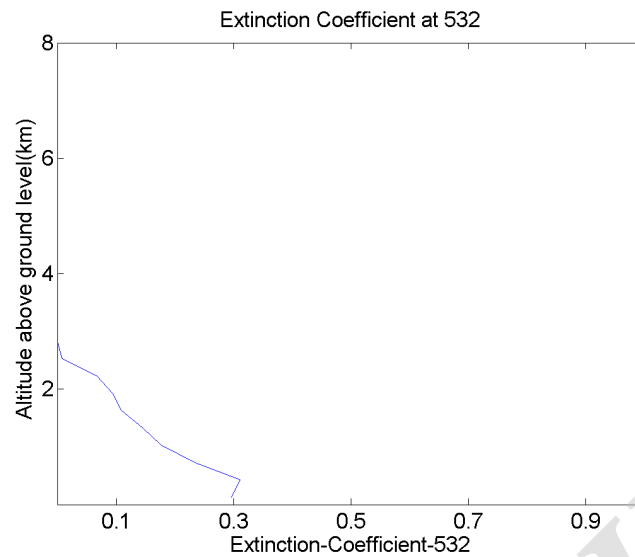


شکل ۸: مدل مسیر بازگشتی HYSPLIT در ساعت ۲۳ UTC روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ برای ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر بالای سطح زمین برای زنجان. با توجه به مدل ارائه شده در شکل، شاهد جریانات هوایی از سمت غرب و از سمت کشور عراق هستیم.

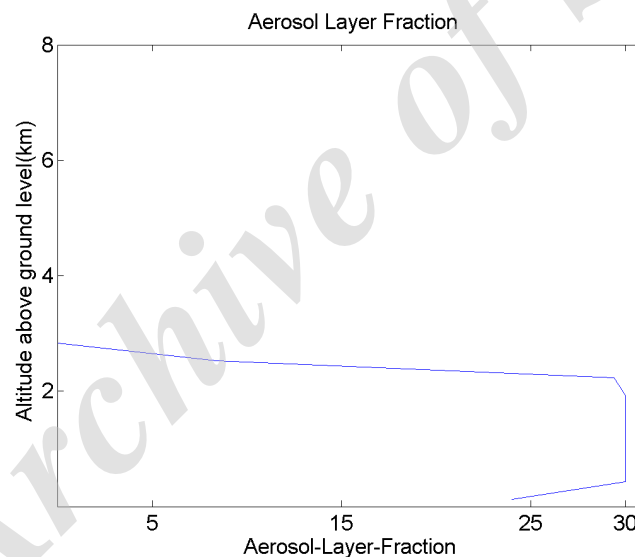
سطح زمین مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ساعت انتخابی ما بسیار نزدیک به ساعت داده‌برداری کالیوپ است، لذا می‌توان ادعا نمود که در آن لحظه خاص با توجه به مدل ارائه شده در شکل ۸، شاهد جریانات هوایی از سمت غرب و از سمت کشور عراق هستیم. پس می‌توان نتیجه گرفت که غبار موجود در جو زنجان در این لحظه از چشمه‌های غباری منطقه بین‌النهرین عراق به جو زنجان اضافه شده است.

اکنون می‌خواهیم با استفاده از داده‌های کالیوپ بفهمیم که غبار در چه ارتفاع‌هایی به جو زنجان افزوده می‌شود. بنابراین نمایه قائم ضریب خاموشی هواویزها، کسر حجمی لایه های هواویز و نسبت واقطیدگی آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۹ تا



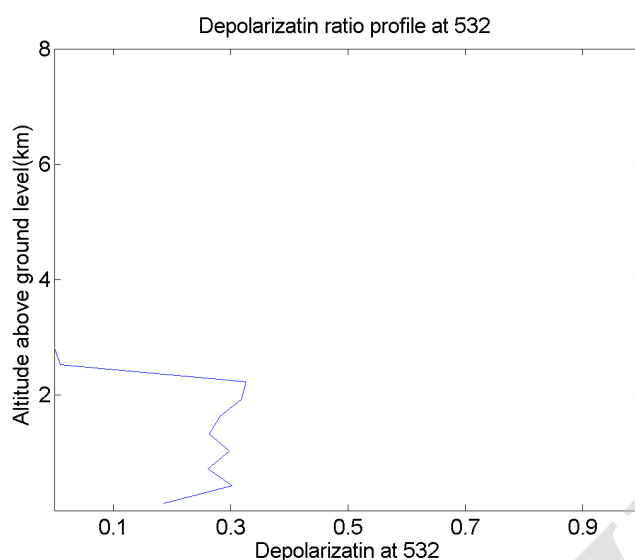


شکل ۹: پروفایل ارتفاعی ضریب خاموشی در طول موج ۵۳۲ نانومتر برای روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ میلادی. در ارتفاع ۰ تا ۳ کیلومتری شاهد ضریب خاموشی قابل ملاحظه و به تبع آن هواویزهای بیشتری در جو هستیم.



شکل ۱۰: پروفایل ارتفاعی کسر حجمی لایه های هواویز در روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ میلادی. در ارتفاعات ۰ تا ۳ کیلومتری مقدار این پارامتر بین ۲۵ تا ۳۰ گزارش شده است که حاکی از حضور زیاد هواویزها در این ارتفاعات است.

۱۱ رسم شده است. شکل ۹ بیانگر پروفایل ارتفاعی ضریب خاموشی هواویزها در طول موج ۵۳۲ نانومتر است. همانطور که مشاهده می‌کنیم از سطح زمین تا حدود ۳ کیلومتری شاهد ضریب خاموشی قابل ملاحظه‌ای هستیم و از این ارتفاع به بعد، مقدار ضریب خاموشی عملاً ناچیز است. بنابراین اکثر هواویزها در ارتفاعات ۰ تا ۳ کیلومتری حضور داشته و در ارتفاعات بالاتر شاهد حضور خیلی کم ذرات هواویز هستیم. برای بررسی بیشتر این ادعا از پروفایل ارتفاعی کسر حجمی لایه‌های هواویز استفاده نموده‌ایم. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنیم برای ارتفاعات ۰ تا ۳ کیلومتری، مقدار پارامتر



شکل ۱۱: پروفایل ارتفاعی نسبت واقطبیبدگی در طول موج ۵۳۲ نانومتر برای روز ۳۰ سپتامبر سال ۲۰۱۰ میلادی. در محدوده ارتفاعی تقریباً ۱۰۰ متری تا ۳ کیلومتری بالاتر از ارتفاع سطح منطقه مورد مطالعه ما، مقدار حدوداً ۰/۳ برای این پارامتر گزارش شده است که بیانگر حضور غالب ذرات غبار در جو است.

کسر حجمی لایه های هواویز بین ۲۵ تا ۳۰ گزارش شده است که این مقادیر، حضور غالب هواویزها در این بازه ارتفاعی را تایید می کنند. برای مشخص شدن نوع هواویزها، پارامتر نسبت واقطبیبدگی آن‌ها در طول موج ۵۳۲ نانومتر به صورت ارتفاعی در شکل ۱۱ آورده شده است. مقادیر حدود ۰/۳ این پارامتر در محدوده ارتفاعی تقریباً ۱۰۰ متری تا ۳ کیلومتری بالاتر از ارتفاع سطح منطقه مورد مطالعه ما، بیانگر این است که غبار هواویز غالب است. بنابراین می توان ادعا کرد که در این روز خاص یک لایه غباری به جو منطقه مورد مطالعه ما افزوده شده است که ارتفاع تقریبی آن از ۳۰۰ متری تا حدود ۳ کیلومتری می باشد و منشأ آن غبار ناحیه بین النهرین است.

## ۵ نتیجه گیری

مطالعات پیشین مبتنی بر نتایج اندازه گیری های شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان نشان می دهد که ذرات غبار در کنار هواویزهای شهری- صنعتی دو نوع اصلی هواویزهای جوی هستند و اطلاعات با ارزشی نیز از ویژگی های هواویزها در اختیار ما می گذرانند. با این حال داده های شیدسنجی هیچ اطلاعاتی از چگونگی توزیع قائم ذرات در اختیار ما قرار نمی دهند. برای رفع این مشکل به سراغ لیدار فضا برد کالیوپ به عنوان تنها ابزار موجود در این زمینه رفتیم. از میان محصولات لیدار کالیوپ، داده های سطح ۲ مربوط به هواویزها برای بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی برای گذر شبانه کالیپسو از نزدیک ترین فاصله ممکن از شهر زنجان استخراج شد و مورد بررسی قرار گرفت. دیده شد که در بازه زمانی اشاره شده تعداد ۱۴۴ گذر ماهواره را داریم. بررسی ویژگی عمق اپتیکی هواویزها نشان می دهد که مقدار این پارامتر در فصول خشک سال افزایش محسوسی دارد. در توافق با مطالعات پیشین می توان آن را به افزوده شدن غبار به جو زنجان نسبت داد. همچنین بهره گیری از داده های ماهواره ها و مدل های هواشناسی نشان داد که غبار افزوده شده به جو، منشأ محلی ندارد و چشمه های غباری منطقه بین النهرین در کشورهای عراق و سوریه مناسب ترین گزینه برای غبار رسیده به آسمان زنجان هستند. اندازه گیری های مبتنی بر نسبت واقطبیبدگی هواویزها دلالت بر این دارند که لایه های غباری اغلب از سطح زمین فاصله دارند. همچنین در طی رویدادهای غباری ثبت شده مشاهده شد که نمایانی افقی کاهش معناداری ندارد که در توافق با نتایج قبلی، نشانگر نقش قابل صرف نظر کردن چشمه های غباری محلی در تولید غبار جوی است.

## تقدیر و تشکر

از ایستگاه شیدسنجی IASBS زنجان و شبکه AERONET برای در اختیار گذاشتن داده‌های شیدسنج خورشیدی زنجان تشکر می‌کنیم. از سازمان هواشناسی کشوری به خاطر استخراج و در اختیار گذاشتن داده‌های نمایانی افقی شهر زنجان قدردانی می‌کنیم. همچنین از متصدیان وبسایت‌های داده‌های ماهواره‌ای مربوط به ماهواره‌های CALIPSO، Aqua، MODIS، Terra-MODIS و مدل هواشناسی HYSPLIT قدردانی می‌کنیم.

## مراجع

- [۱] معصومی، امیر (۱۳۹۱). مطالعه پارامترهای فیزیکی هواویزهای جو زنجان با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی، داده‌های ماهواره‌ای، مدل هواشناسی HYSPLIT و داده‌های هواشناسی NCEP NCAR، رساله دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- [2] 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.
- [3] Masoumi, A., Khalesifard H.R., Bayat. A. (2013). Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran. Atmospheric Research 120–121, 343–355.
- [4] Bayat. A, Khalesifard H.R, Masoumi, A. (2011) Retrieval of atmospheric optical parameters from ground-based sun-photometer measurements for Zanjan, Iran. Atmos. Meas. Tech., 4, 857–863.
- [5] Bayat. A, Khalesifard H.R, Masoumi, A. (2013). Retrieval of aerosol single-scattering albedo and polarized phase function from polarized sun-photometer measurements for Zanjan's atmosphere. Atmos. Meas. Tech., 6, 2659–2669.
- [6] Winker, D. M., Hunt, W. H., and McGill, M. J. (2007). Initial performance assessment of Calio. Geophysical Research Letters, 34.
- [7] Hostetler C. A., and et. al. (2006). Calibration and Level 1 Data Products. NASA Langley Research Center.
- [۸] فضلی، سعید (۱۳۹۴). مطالعه طرزکار سنجش از دور هواویزهای جوی با استفاده از لیدار فضابرد کالیوپ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- [9] [https:// www-calipso.larc.nasa.gov/ resources/ calipso-users-guide/data-summaries/profile-data.php](https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso-users-guide/data-summaries/profile-data.php)
- [10] Toledano, C., Cachorro, V. E., Berjon, A., de Frutos, A. M., Sorribas, M., de la Morenab, B. A., Goloub, P. (2007). Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain). Q. J. R. Meteorol. Soc. 133, 795–807.
- [11] Mishchenko, M.I., Hovenier, J.W., Travis .L.D. (1999). Light Scattering by Nonspherical Particles Theory, Measurements and Applications.
- [۱۲] حاذقی، فرزانه. (۱۳۹۰). بررسی اثر بادهای سطحی بر چگالی اپتیکی زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
- [13] Rolph, G. D. (2012). Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. Website (<http://ready.arl.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.