




Identification of the maximum thickness of the dust layer based on CALIPSO satellite observations Case study: Khuzestan province

Fallahzade, F.¹  | Mahmoudian, A. R.²  | Dadizadeh, M.³ 

1. Department of natural geography, Faculty of Earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Department of Remote Sensing & GIS, Faculty of Earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: a.mahmoudian@ut.ac.ir

(Received: 4 Dec 2022, Revised: 3 May 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

The main goal of this study is to identify the maximum thickness of the dust layer by using the vertical half-pipe method using CALIOP lidar data. In order to implement this method, Khuzestan province was considered as the target area. In this regard, 6 study samples that the CALIPSO satellite orbit had passed over Khuzestan province during October 2016 and 2017 were used.

Based on the results of this research, the maximum thickness of the dust layer in the study samples in the completely flat and plain land in the west of the province is more than in the east. In addition, in the east of the province, the values of the maximum thickness of the dust layer mainly correspond to the lower latitudes of the region, where the ground level is lower. In general, the findings of the research show that the maximum thickness of the dust layer can be extracted from the lidar data using the airborne vertical half-track method, although the output of this method is more accurate when the dust layer has uniform and dense horizontal and vertical coverage. In addition to extracting the thickness of the dust layer, the size and density of the particles were also studied using the color ratio index. The values of this index in each of the study samples confirmed the presence of fine dust particles in the region. This index was also calculated after applying the horizontal averaging method of 5 km on the redistribution data of lidar waves. The 5 km horizontal averaging method has the ability to effectively reduce the noise of space lidar data and increase the accuracy of cloud detection from aeriels, which reveals the border between clean and polluted air and also the knowledge of the density of aeriels. Based on this, the spatial distribution of the dust layer and changes in its thickness can be seen. The results of this research can be used to predict the concentration, extent, and maximum height of the dust layer.

According to the findings of the research, the proposed method has the ability to extract the maximum thickness of the dust layer using spatial lidar data, although the output of this method is more accurate when the dust layer has uniform and dense horizontal and vertical coverage. In this research, in addition to extracting the thickness of the dust layer, the size and density of the particles were also studied using the color ratio index. This index was calculated after applying the horizontal averaging method of 5 km on the redistribution data of radar waves. Based on this, the mentioned method clearly showed the density and concentration of dust particles through the distribution of lidar wave rescattering values at different heights, and the presence of dust particles in the atmosphere of the region was confirmed in all study samples. Calculating the particle size index in the atmosphere and its undeniable role in detecting dust particles is another result of this research. The values of this index in each of the studied samples in the height ranges where the thickness of the dust layer was extracted confirmed the presence of fine dust particles in the region.

Keywords: Calipso, Dust layer, Iran.

Cite this article: Fallahzade, F., Mahmoudian, A. R., & Dadizadeh, M. (2024). Identification of the maximum thickness of the dust layer based on CALIPSO satellite observations Case study: Khuzestan province. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 149-164. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351868.1007477>

E-mail: (1) fallahzade.94@gmail.com (3) m.dadizadeh96@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351868.1007477>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

شناسایی حداکثر ضخامت لایه گردو خاک بر مبنای مشاهدات ماهواره CALIPSO،

مطالعه موردی: استان خوزستان

فاطمه فلاح‌زاده^۱ | علیرضا محمودیان^۲ | مرضیه دادی‌زاده^۳

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

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

۳. گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: a.mahmoudian@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۱۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

این مطالعه به شناسایی حداکثر ضخامت لایه گردو خاک با روش نیم‌رخ قائم هواویز با استفاده از داده‌های لایدار کالیپسو می‌پردازد. جهت اجرای این روش، محدوده استان خوزستان به‌عنوان منطقه هدف در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج تحقیق، حداکثر ضخامت لایه گردو خاک در نمونه‌های مطالعاتی در سرزمین کاملاً هموار غرب استان بیش از شرق آن است. علاوه بر این در شرق استان نیز مقادیر حداکثر ضخامت لایه گردو خاک عمدتاً منطبق بر عرض‌های پایین منطقه است که سطح زمین از ارتفاع کمتری برخوردار است. به‌طور کلی، یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که حداکثر ضخامت لایه گردو خاک با روش نیم‌رخ قائم هواویز از داده‌های لایدار قابل استخراج است اگرچه خروجی این روش در شرایطی که لایه گردو خاک از پوشش افقی و قائم یکدست و متراکمی برخوردار باشد، دقیق‌تر است. علاوه بر استخراج ضخامت لایه گردو خاک، اندازه و میزان تراکم ذرات نیز با استفاده از شاخص نسبت رنگی مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر این شاخص در هر یک از نمونه‌های مطالعاتی، وجود ذرات ریز گردو خاک در منطقه را تأیید کرد. این شاخص پس از اعمال روش میانگین‌گیری افقی ۵ کیلومتر بر داده‌های بازپراکنش امواج لایدار محاسبه شد. این روش دارای قابلیت کاهش مؤثر نویز داده و افزایش دقت تشخیص ابر از هواویز است که باعث آشکارسازی مرز بین هوای پاک و آلوده و تشخیص میزان تراکم هواویزها می‌شود. بر این اساس توزیع مکانی لایه گردو خاک و تغییرات ضخامت آن قابل مشاهده می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند برای ارائه پیش‌بینی در مورد غلظت، گستردگی، ارتفاع حداکثری لایه گردو خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: CALIPSO، گردو خاک، حداکثر ضخامت، شاخص اندازه، هواویز، استان خوزستان.

۱. مقدمه

همچنین نیم‌رخ‌های قطبش خطی در طول موج ۵۳۲ نانومتر را ارائه می‌دهد. ارتفاع دقیق ابر و هواویز و بازیابی نیم‌رخ‌های ضریب خاموشی از اندازه‌گیری‌های مجموع بازپراکنش به‌دست می‌آیند (ووقان و همکاران، ۲۰۰۹). اندازه‌گیری‌های قطبش، تمایز بین ابرهای یخی و ابرهای آبی (هو و همکاران، ۲۰۰۹) و شناسایی ذرات هواویز غیرکروی را ممکن می‌سازد (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). اطلاعات اضافی مانند تخمین اندازه ذرات به‌منظور تمایز بین ابرها و ذرات معلق از نسبت سیگنال‌های به‌دست آمده در دو طول موج به‌دست می‌آید (عمر و همکاران، ۲۰۱۰).

لایدار ابزاری قدرتمند برای مطالعه توزیع قائم ذرات معلق در هوا و ابرها در جو است. استقرار ماهواره CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) امکان اندازه‌گیری قائم گردو خاک را فراهم کرده است و بینش قابل توجهی در مورد خواص ذرات معلق گردو خاک ارائه می‌دهد (عمر و همکاران، ۲۰۱۰). CALIOP برای به‌دست آوردن نیم‌رخ‌های قائم بازپراکنش در دو طول موج (۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر) در هر دو فاز روز و شب مدار طراحی شده است. علاوه بر مجموع بازپراکنش در دو طول موج، CALIOP

استناد: فلاح‌زاده، فاطمه؛ محمودیان، علیرضا و دادی‌زاده، مرضیه (۱۴۰۳). شناسایی حداکثر ضخامت لایه گردو خاک بر مبنای مشاهدات ماهواره CALIPSO، مطالعه موردی: استان خوزستان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)، ۱۴۹-۱۶۴. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351868.1007477>

رایانامه: (۱) fallahzade.94@gmail.com (۳) m.dadizadeh96@gmail.com

گرفته بود توسط ماهواره CALIPSO مشاهده و ردیابی شد. طی چند روز بعد لایه‌های گردوخاک به سمت غرب (اقیانوس اطلس و خلیج مکزیک) حرکت کرد. در ۳ روز اول مسیر حرکت بر روی اقیانوس اطلس خواص نوری ذرات نسبتاً بدون تغییر ماند و همچنین تغییر اندکی در توزیع اندازه ذرات گردوخاک مشاهده شد. بعد از سفر ۱۰ روزه به خلیج مکزیک تغییراتی در نسبت‌های لایدار، نسبت رنگی بازپراکنش و نسبت عمق نوری ذرات مشاهده شد. همچنین لیو و همکاران (۲۰۰۹) عملکرد الگوریتم نسخه ۲ داده‌های لایدار ماهواره CALIPSO را مبنی بر تشخیص ابر و هواویز ارزیابی کردند. تشه و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از ۴ مطالعه موردی، نیم‌رخ قائم گردوخاک صحرا را مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل آماری ارتفاع نشان داد که بالای لایه گردوخاک معمولاً به ارتفاع ۴ تا ۶ و گاهی حتی ۷ کیلومتری از تراز دریا می‌رسد. معمولاً، یک ستون گردوخاک قائم ناهمگن با لایه‌های گردوخاک داخلی هنگام صبح قبل از شروع تکامل لایه مرزی مشاهده شد. لایه گردوخاک صحرا در اوایل عصر به خوبی مخلوط شده بود.

عمر و همکاران (۲۰۱۰) لایه‌های گردوخاک صحرا را با استفاده از ۳ روش مطالعه کردند: روش محدودیت عبور برای لایه‌های بالا، روش محدودیت نیم‌رخ خاموشی و روش محاسبات T-Matrix. نتایج تحقیق نشان داد که نسبت خاموشی به بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر کاملاً قوی است. همچنین عمر و همکاران (۲۰۲۲) در کار اخیر خود از مشاهدات ماهواره CALIPSO برای تعیین ویژگی‌های گردوخاک ناشی از انواع منابع مختلف در طول توفان‌های شن و گردوخاک نزدیک شهر کویت استفاده کردند. این مطالعه شامل ۱۷ مورد توفان گردوخاک منحصر به فرد است که در نزدیکی شهر کویت از سه دسته منبع شامل: منبع واحد، منابع ترکیبی و منابع نامشخص مشاهده شده است. شدیدترین توفان‌های گردوخاک در ماه‌های تابستان اتفاق افتاد. لایه‌های گردوخاک به بالاترین حد ارتفاع خود برای موارد

گردوخاک معدنی بر تعادل تابشی و توزیع آن تأثیر می‌گذارد و پیامدهای مهمی در سامانه‌های آب و هوایی گذشته، حال و آینده دارد. گردوخاک به‌طور مستقیم با جذب و پراکندگی تشعشعات و به‌طور غیرمستقیم با عمل به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر و هسته‌های یخی، باعث برقراری تعادل تابشی می‌شود. همچنین نیم‌رخ‌های گرمایش اتمسفر را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که بر توزیع ابر تأثیر می‌گذارد. برای مطالعه مؤثر گردوخاک و تأثیر آن، توزیع جهانی گردوخاک و وضوح عمودی آن موردنیاز است. ابزاری که چنین داده‌هایی را فراهم می‌کند. ابزار CALIOP در ماهواره CALIPSO، یک نیم‌رخ ساز تشخیص نور و برد (Lidar) می‌باشد.

ایوریو و همکاران (۲۰۰۳) خواص هواویز در جزیره Lampedusa در دریای مدیترانه را در ماه می ۱۹۹۹ بررسی کردند. در همین راستا از ۳ نمونه مختلف تحت شرایط آسمان صاف و بدون ابر استفاده کردند. در یکی از نمونه‌ها، توده هوا از آفریقا سرچشمه گرفته و حاوی مقدار زیادی گردوخاک بیابان بود. در دو نمونه دیگر، توده هوا قبل از رسیدن به جزیره از سمت شمال از اروپا عبور کرده بود. نتایج کلی تحقیق نشان داد که خواص میکروفیزیکی هواویز به میزان قابل توجهی به منشأ توده‌های هوا بستگی دارد، به گونه‌ای که شعاع ذرات در نمونه‌ای که از بیابان آفریقا سرچشمه گرفته بود به‌طور متوسط ۲ برابر نمونه‌های دیگر بود. در تحقیق دیگری ایوریو و همکاران (۲۰۰۹) تکامل فصلی نیم‌رخ قائم هواویز و ردسپهری در مدیترانه مرکزی و نقش گردوخاک بیابان را مطالعه کردند. یافته‌ها نشان داد که توزیع قائم هواویز تا حد زیادی تحت تأثیر گردوخاک صحرا قرار می‌گیرد. ارتفاع بالای گردوخاک در اواخر بهار به اوج خود تا ارتفاع ۹ کیلومتری می‌رسد.

لیو و همکاران (۲۰۰۸) خواص نوری لایه‌های گردوخاک صحرا را با استفاده از مشاهدات لایدار ماهواره CALIPSO مطالعه کردند. یک مورد توفان گردوخاک گسترده که در ۱۷ اوت ۲۰۰۶ از شمال آفریقا سرچشمه

ارتفاع ۴۰ کیلومتری اندازه‌گیری می‌کند (اریک و همکاران، ۲۰۲۰؛ کوما، ۲۰۱۰). قدرت تفکیک اصلی نمونه‌برداری این سنجنده در راستای قائم ۳۰ متر و در راستای افقی ۳۳۳ متر است (هاستلر و همکاران، ۲۰۰۶).

پایگاه داده‌های ماهواره CALIPSO در سه سطح پردازشی مختلف با فرمت HDF در مرکز داده‌های علوم جوی ASDC (Atmospheric Science Data Center) ناسا موجود است. داده‌های بازپراکنش لایدار CALIOP در طول موج‌های ۵۳۲ نانومتر (مجموع قطبش قائم و موازی) و ۱۰۶۴ نانومتر ثبت شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق از داده‌های استاندارد سطح 1B لایدار CALIOP نسخه ۱۰-۴ و داده‌های استاندارد سطح ۲ لایدار CALIOP نسخه ۲۰-۴ Vertical (VFM) Feature Mask مشاهدات روز هنگام ماهواره استفاده شده است.

به‌منظور استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک از نیم‌رخ‌های قائم هواویز، نخست گذرهای ماهواره CALIPSO بر روی منطقه مطالعاتی در ماه اکتبر شناسایی شد و داده‌های سطح 1B و سطح ۲ (VFM) سنجنده CALIOP برای تاریخ‌های مورد نظر، از مرکز داده‌های علوم جوی ناسا دریافت شد. در مجموع مدار ماهواره طی ماه اکتبر ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، ۶ بار از مسیرهای A و B بر فراز استان خوزستان عبور کرده است. اطلاعات مربوط به هر گذر ماهواره بر روی منطقه مطالعاتی در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جهت پردازش داده‌ها، نخست مختصات جغرافیایی ابتدا و انتهای هر گذر ماهواره از روی استان خوزستان در تاریخ‌های مورد نظر تعیین و بر اساس آن، بخشی از داده‌های لایدار که منطبق با مختصات فوق بودند، از سایر داده‌ها تفکیک شدند. محدوده‌های مذکور برای استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک و سایر متغیرهای مورد نیاز در نظر گرفته شد. موقعیت گذر ماهواره در نمونه‌های مطالعاتی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

ترکیبی رسید. ارتفاع بالای لایه برای توفان‌های شن و ماسه از منابع واحد و نامشخص تقریباً ۳ کیلومتر بود در حالیکه از منابع ترکیبی به‌طور متوسط به ۴/۱ کیلومتر رسید.

نمونه‌هایی که در بالا عنوان شد، قابلیت داده‌های ماهواره CALIPSO را در برآورد حداکثر ضخامت لایه گردو خاک آشکار ساخت. با در نظر گرفتن اهمیت این داده‌ها و نیز خلأ مطالعاتی موجود در این زمینه، در تحقیق پیش رو سعی شد روش استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک از داده‌های لایدار فضایی بر روی استان خوزستان با دقت مورد بررسی قرار گیرد.

استان خوزستان از جمله مناطقی است که بارها پدیده گردو خاک در آنجا اتفاق افتاده است و باعث کاهش بسیار شدید کیفیت هوا شده است. لذا پایش پیوسته و با دقت حداکثر ضخامت لایه گردو خاک در این شرایط جهت به حداقل رساندن خسارات احتمالی ضرورت دارد. این استان در بین عرض‌های ۲۹/۸ تا ۳۳ درجه شمالی و طول‌های ۴۷/۶ تا ۵۰/۵ درجه شرقی در جنوب غرب ایران واقع شده است (شکل ۱).

۲. مواد و روش

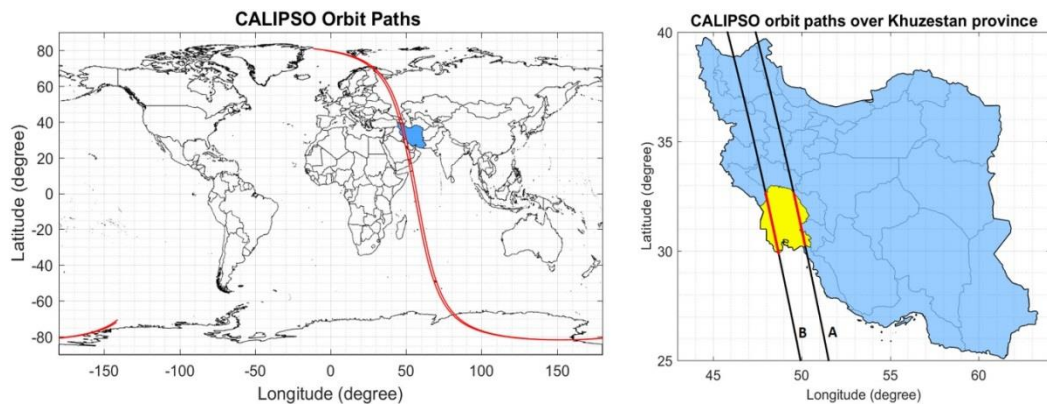
۲-۱. استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک از

داده‌های ماهواره CALIPSO

ماهواره CALIPSO در تاریخ ۲۸ آوریل ۲۰۰۶ با هدف مشاهده توزیع قائم ابرها و هواویزهای جوی به فضا پرتاب شد. این ماهواره بخشی از مجموعه ماهواره‌های A-Train است که در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری، در یک مدار قطبی خورشیدآهنگ، با چرخه ۱۶ روزه حرکت می‌کند. CALIOP نخستین سنجنده ماهواره CALIPSO و مبتنی بر لیزر است که در دو طول موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر عمل می‌کند (وینکر و همکاران، ۲۰۰۷؛ ۲۰۰۹). این سنجنده به‌دلیل طول موج کوتاه آن، ابرهای جامد و هواویزها را با قدرت تفکیک قائم بالا از تراز دریا تا

جدول ۱. اطلاعات مربوط به گذرهای ماهواره از روی منطقه مطالعاتی در تاریخهای منتخب.

ردیف	تاریخ	مسیر گذر ماهواره	مختصات ابتدای مسیر		مختصات انتهای مسیر	
			عرض شمالی	طول شرقی	عرض شمالی	طول شرقی
۱	۲۰۱۶/۱۰/۱۵	B	۲۹/۹۰	۴۸/۷۴	۳۲/۶۷	۴۸
۲	۲۰۱۶/۱۰/۲۴	A	۳۰/۲۳	۵۰/۱۷	۳۲/۷۴	۴۹/۵
۳	۲۰۱۶/۱۰/۳۱	B	۲۹/۸۸	۴۸/۷۱	۳۲/۶۵	۴۷/۹۷
۴	۲۰۱۷/۱۰/۰۲	B	۲۹/۸۹	۴۸/۷۳	۳۲/۶۵	۴۷/۹۹
۵	۲۰۱۷/۱۰/۱۱	A	۳۰/۲۸	۵۰/۲	۳۲/۶۲	۴۹/۵۸
۶	۲۰۱۷/۱۰/۲۷	A	۳۰/۲۷	۵۰/۱۹	۳۲/۶۴	۴۹/۵۶



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و گذرهای ماهواره CALIPSO در نمونه‌های مطالعاتی.

نویز موجود در داده‌های بازپراکنش برداشت شده در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و در داده‌های روزانه بیشتر است. همچنین سیگنال‌هایی که از ارتفاعات پایین به لایدار CALIPSO می‌رسند، به دلیل مسافت طولانی طی شده دارای نویز قابل توجهی هستند. به منظور بهبود بخشیدن نسبت سیگنال به نویز در داده‌های بازپراکنش، روش هموارسازی افقی پیشنهاد شده است. ژنگ و همکاران (۲۰۱۶) برای حذف نویز در بازیابی ارتفاع لایه مرزی، از روش میانگین‌گیری هر ۱۵ نیم‌رخ قائم ماهواره CALIPSO استفاده کردند و نیم‌رخ هموارسازی شده با تفکیک افقی ۵ کیلومتر را به دست آوردند. در مطالعه‌ای دیگر، سو و همکاران (۲۰۱۷) به منظور بازسازی نیم‌رخ‌های با تفکیک افقی ۷ کیلومتر از میانگین‌گیری هر ۲۱ نیم‌رخ قائم، جهت به حداقل رساندن تأثیر داده‌های پرت استفاده کردند. با استفاده از این روش می‌توان نویز داده‌های ماهواره CALIPSO را به طور مؤثری کاهش داد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ووقان و همکاران، ۲۰۰۵).

به منظور استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک، آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی اولیه ضروری است. بنابراین، در گام بعد با استفاده از محدوده‌های مختصاتی، لایه‌های مورد نیاز از داده‌های لایدار آماده‌سازی شد. در ادامه، نحوه استخراج لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز و ویژگی‌های هر یک به ترتیب تشریح شده است:

الف) لایه مجموع تضعیف بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر: تضعیف مجموع بازپراکنش (β_{532})، ترکیب سیگنال‌های بازپراکنش موازی و قائم در طول موج ۵۳۲ نانومتر است که از رابطه (۱) به دست می‌آید (هاستلر و همکاران، ۲۰۰۶).

$$\beta_{532, \text{Total}} = (\beta_{532, \uparrow} + \beta_{532, \downarrow}) T_{532}^2 \quad (1)$$

لایه مربوط به این ویژگی، از متغیر Total Attenuated Backscatter 532 nm داده‌های سطح 1B سنجنده CALIOP برای نمونه‌های مطالعاتی استخراج شد.

ب) لایه میانگین‌گیری افقی (Horizontal Averaging): داده‌های سطح 1B سنجنده CALIOP به طور معمول دارای نویز هستند. بنابر نتایج حاصل از مطالعات پیشین،

جدول ۲. قدرت تفکیک مکانی داده سطح ۱ لایدار سنجنده CALIOP قبل و بعد از میانگین‌گیری افقی.

محدوده ارتفاعی (کیلومتر)	شماره بین	قدرت تفکیک مکانی افقی (کیلومتر) قبل از میانگین‌گیری	قدرت تفکیک مکانی افقی (کیلومتر) بعد از میانگین‌گیری	قدرت تفکیک مکانی قائم (متر) قبل و بعد از میانگین‌گیری
۳۰/۱ - ۴۰	۱ - ۳۳	۵	۶۰	۳۰۰
۲۰/۲ - ۳۰/۱	۳۴ - ۸۸	۱/۶	۲۵	۱۸۰
۸/۳ - ۲۰/۲	۸۹ - ۲۸۸	۱	۱۵	۶۰
-۰/۵ - ۸/۳	۲۸۹ - ۵۷۸	۰/۳۳	۵	۳۰
-۲ - -۰/۵	۵۷۹ - ۵۸۳	۰/۳۳	۵	۳۰۰

(۲) به دست می‌آید (ووقان و همکاران، ۲۰۰۵).

$$\chi = \frac{\beta_{1064}}{\beta_{532}} \quad (۲)$$

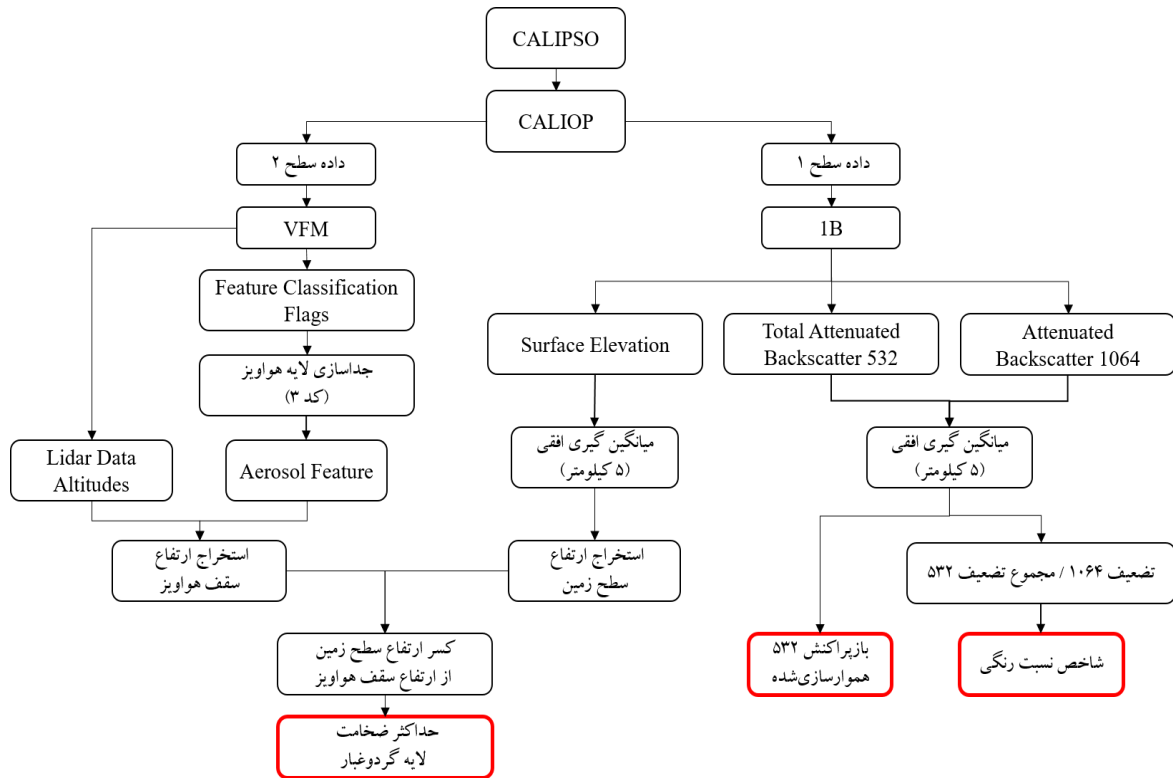
این شاخص، بیان‌کننده اندازه ذرات جو است. یک نسبت رنگی بزرگ نشان‌دهنده اندازه بزرگ ذرات است (لیو و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی، ابرها دارای ضرایب بازپراکنش و نسبت‌های رنگی بزرگ‌تر (تقریباً برابر یک) در مقایسه با هواپیزها هستند. از این ویژگی‌های بازپراکنش برای تمایز ابرها از هواپیزها استفاده می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۰۵). در این پژوهش از شاخص نسبت رنگی در تأیید وجود گردو خاک در منطقه مطالعاتی استفاده شده است.

پس از آماده‌سازی لایه‌ها، جهت استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک، به دو متغیر ارتفاع از سطح زمین و ارتفاع سقف هواپیز نیاز بود. ارتفاع از سطح زمین از داده‌های سطح 1B و ارتفاع سقف هواپیز با استفاده از طبقه هواپیز در لایه ماسک ویژگی قائم استخراج شد. سپس ارتفاع سطح زمین از ارتفاع سقف هواپیز کسر شد و بدین ترتیب حداکثر ارتفاع لایه گردو خاک از سطح زمین و نیز ضخامت آن محاسبه شد. تمامی مراحل پردازشی پژوهش در محیط نرم افزار متلب R2017a انجام گرفته است. شکل ۲ روندنمای مراحل استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک و نسبت رنگی از داده‌های لایدار ماهواره CALIPSO را نشان می‌دهد.

بر این اساس، مطالعه حاضر نیز به منظور افزایش نسبت سیگنال به نویز، از روش هموارسازی افقی استفاده کرده است و میانگین هر ۱۵ نیم‌رخ را مبنای بازسازی نیم‌رخ‌های با تفکیک افقی ۵ کیلومتر قرار داده است. لایه هموارسازی افقی با استفاده از لایه مجموع تضعیف بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر محاسبه شد.

لایه ماسک ویژگی قائم (Vertical Feature Mask): این لایه با استفاده از متغیر Feature_Classification_Flags از داده‌های سطح ۲ (VFM) لایدار CALIOP استخراج شد. داده‌های VFM شامل توزیع قائم ابرها و هواپیزها است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، تشخیص صحیح ابرها و هواپیزها از یکدیگر با استفاده از محصول VFM مورد تأیید قرار گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۱۴). در واقع لایه ماسک ویژگی قائم ترکیبی از چندین طبقه است، هر طبقه ویژگی با کدی منحصر به فرد در داده‌ها ذخیره شده است. برای تفکیک لایه ماسک هواپیز (Aerosol Feature)، طبقه هواپیز از سایر طبقه‌ها تفکیک شد و موقعیت ارتفاع سقف هواپیز، با استفاده از این لایه محاسبه شد. طبقه هواپیز در این داده‌ها دارای کد ۳ می‌باشد.

(د) لایه نسبت رنگی: نسبت رنگی (χ)، نسبت تضعیف بازپراکنش در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به تضعیف مجموع بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر است که از رابطه

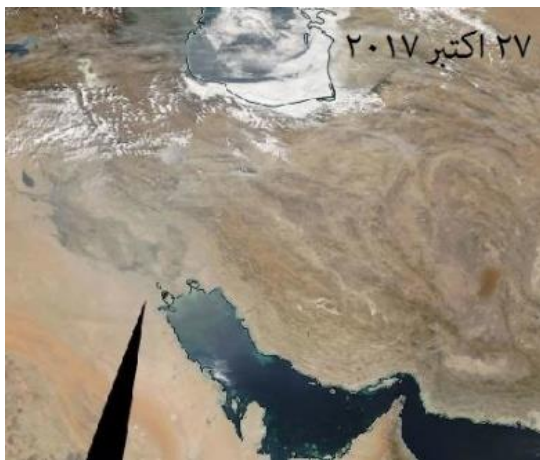


شکل ۲. مراحل انجام پژوهش.

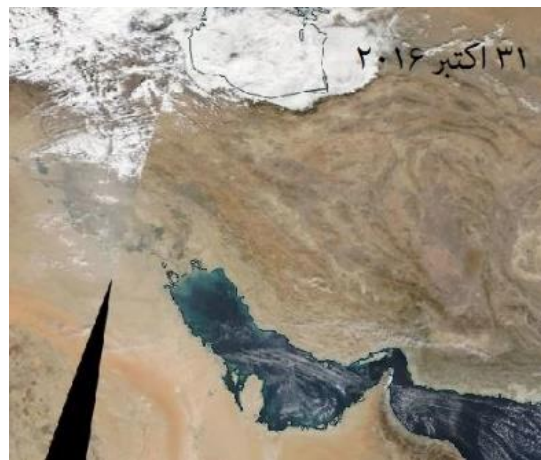
۳. نتایج و بحث

اما تلاش شد که نمونه‌هایی با میزان گردو خاک بیشتر برای مطالعه انتخاب شود. در ادامه، نمونه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS، مربوط به ماه اکتبر که حاوی پوشش افقی گردو خاک بر روی جو منطقه هستند، مشاهده می‌شود (شکل ۳).

همان گونه که اشاره شد، جهت استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک از داده‌های ماهواره CALIPSO بر روی استان خوزستان، ۶ نمونه مطالعاتی در مسیرهای A و B مورد بررسی قرار گرفت. هرچند تمام نمونه‌ها در ماه اکتبر حضور ذرات گردو خاک در جو منطقه را نشان می‌دهد،



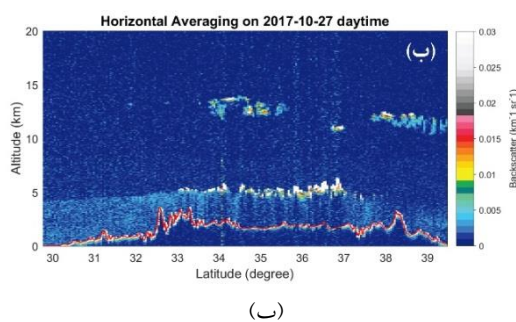
(ب)



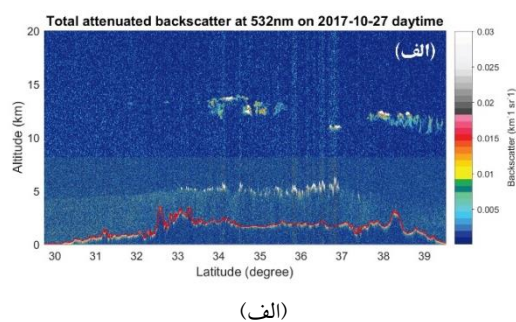
(الف)

شکل ۳. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS بر فراز منطقه مطالعاتی در ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ (الف) و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۷ (ب).

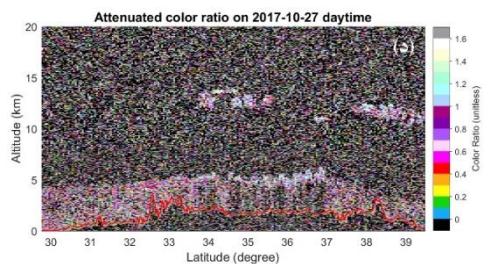
تاریخ‌های ۱۵، ۲۴ و ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ همراه با ثبت پدیده گردوخاک توسط امواج بازپراکنش لایدار بر روی منطقه است. شکل ۵ (الف-ب-ج)، لایه ماسک و ویژگی قائم نمونه‌های مطالعاتی موردنظر را نشان می‌دهد. محور افقی عرض جغرافیایی منطقه و محور قائم ارتفاع از تراز دریا بر حسب کیلومتر است. این لایه به ۷ طبقه شامل: هوای پاک، ابر، هواویز تروپوسفری، هواویز استراتوسفری، سطح، زیرسطح و مجموع تضعیف طبقه‌بندی شده است. رنگ نارنجی در این شکل، طبقه هواویز را نشان می‌دهد. دقت به لایه سطح زمین در این شکل نشان می‌دهد که در تاریخ ۲۴ اکتبر ۲۰۱۶ مدار ماهواره از شرق استان خوزستان (شکل ۱ مسیر A) که سطح زمین دارای پستی و بلندی است عبور کرده است. در حالی که در دو نمونه دیگر در تاریخ‌های ۱۵ و ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ گذر مدار ماهواره از روی منطقه پست و جلگه‌ای غرب خوزستان (شکل ۱ مسیر B) بوده است. در مجموع ماسک و ویژگی قائم نمونه‌های مطالعاتی، لایه گردوخاک را در هر ۳ نمونه نشان می‌دهد. موقعیت حداکثر ضخامت لایه گردوخاک با استفاده از طبقه هواویز موجود در این لایه استخراج شد.



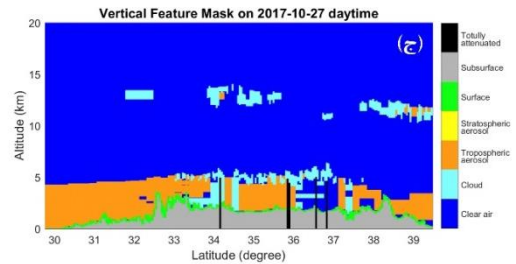
(ب)



(الف)



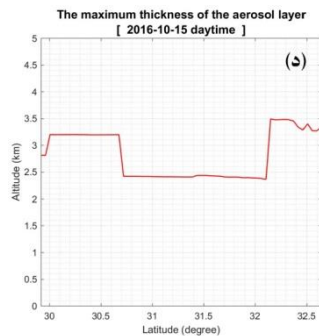
(د)



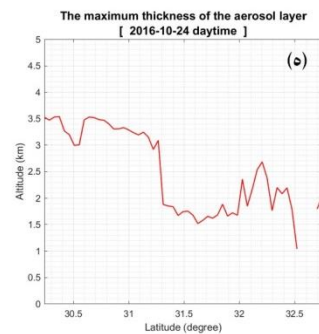
(ج)

شکل ۴. نمونه ویژگی‌های استخراج‌شده از سنجنده CALIOP مربوط به گذر ماهواره از روی ایران در تاریخ ۲۷ اکتبر ۲۰۱۷. لایه مجموع تضعیف بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر (الف)، لایه میانگین‌گیری افقی (ب)، لایه ماسک و ویژگی قائم (ج) و لایه نسبت رنگی (شاخص اندازه ذرات) (د).

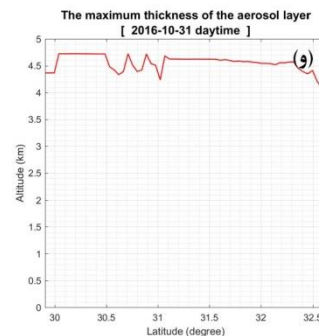
است. حداکثر ضخامت لایه گردو خاک در این روز به ۴/۷ کیلومتر رسیده است و به ندرت ضخامت لایه گردو خاک به کمتر از ۴/۵ کیلومتر می‌رسد. شکل (۵-ه)، ضخامت لایه گردو خاک را در روز ۲۴ اکتبر ۲۰۱۶ در شرق منطقه نشان می‌دهد. در این نمودار لایه گردو خاک در عرض پایین منطقه که سطح زمین از ارتفاع کمتری برخوردار است به لحاظ قائم گسترش بیشتری دارد و بیش از ۳ کیلومتر است. به سمت عرض‌های بالاتر از ضخامت لایه گردو خاک کاسته می‌شود و با مقداری نوسان در عرض ۳۲/۵ درجه به کمترین مقدار حدود یک کیلومتر می‌رسد.



(د)

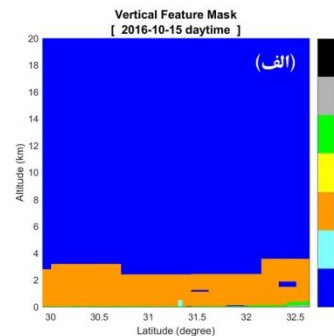


(ه)

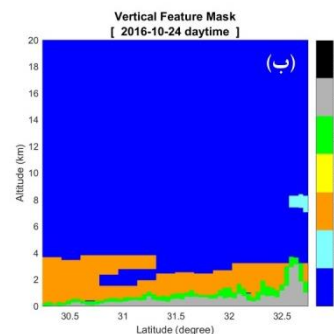


(و)

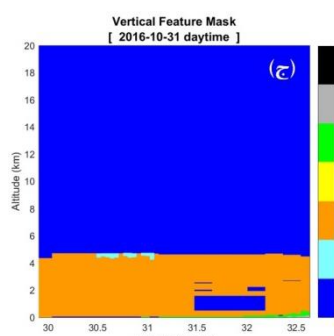
شکل ۵ (د-ه-و)، حداکثر ضخامت لایه گردو خاک نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶ را بر روی منطقه نشان می‌دهد. طبق این نمودارها، در روز ۱۵ اکتبر ۲۰۱۶ (شکل ۵-د) حداقل ضخامت لایه گردو خاک ۲/۴ کیلومتر است که حدود ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی منطقه غرب استان را پوشش می‌دهد. در عرض‌های پایین و بالای منطقه، لایه گردو خاک به لحاظ قائم گسترش بیشتری دارد و حداکثر گسترش آن در عرض بالای منطقه به ۳/۵ کیلومتر از سطح زمین می‌رسد. در همین منطقه، در روز ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ (شکل ۵-و) لایه یکپارچه‌ای از گردو خاک با ضخامت زیاد سرتاسر منطقه را فرا گرفته



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. ماسک ویژگی قائم (الف - ب - ج) و حداکثر ضخامت لایه گردو خاک (د - ه - و) نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶. رنگ نارنجی در تصاویر سمت راست، طبقه هواویز را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه حداکثر ضخامت لایه گردو خاک بر اساس طبقات ارائه شده در داده‌های سطح ۲، میانگین گیری افقی بازپراکنش و شاخص نسبت رنگی از داده‌های سطح 1B به منظور تأیید حضور خاک در منطقه محاسبه شد. شاخص رنگی بازتاب دهنده اندازه هواویزهای جوی است که نحوه محاسبه آنها در بخش روش پژوهش بیان شد.

شکل ۶ (الف-ب-ج)، لایه میانگین گیری افقی در طول موج ۵۳۲ نانومتر را برای نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. کاربرد این روش کاهش مؤثر نویزهای موجود در داده‌های بازپراکنش، افزایش دقت تشخیص ابر از هواویز و به تبع ضخامت لایه گردو خاک است. محور قائم سمت چپ تصویر، ارتفاع تراز دریا بر حسب کیلومتر و نوار رنگی سمت راست تصویر، مقادیر بازپراکنش امواج لایدار بر حسب کیلومتر بر استرادیان را نشان می‌دهد. خط ممتد قرمز پایین تصویر، پستی و بلندی‌های سطح زمین در امتداد مسیر گذر ماهواره از روی منطقه بر حسب کیلومتر است. در این تصویر، شدت رنگ‌ها نشان دهنده توان بازپراکنش امواج لایدار در برخورد با ذرات موجود در جو است. لازم به ذکر است، وجود پیکسل‌های سفید رنگ در مجاورت خط ممتد قرمز، ناشی از نویزهای امواج لایدار در برخورد با سطح زمین است که در تحلیل‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند.

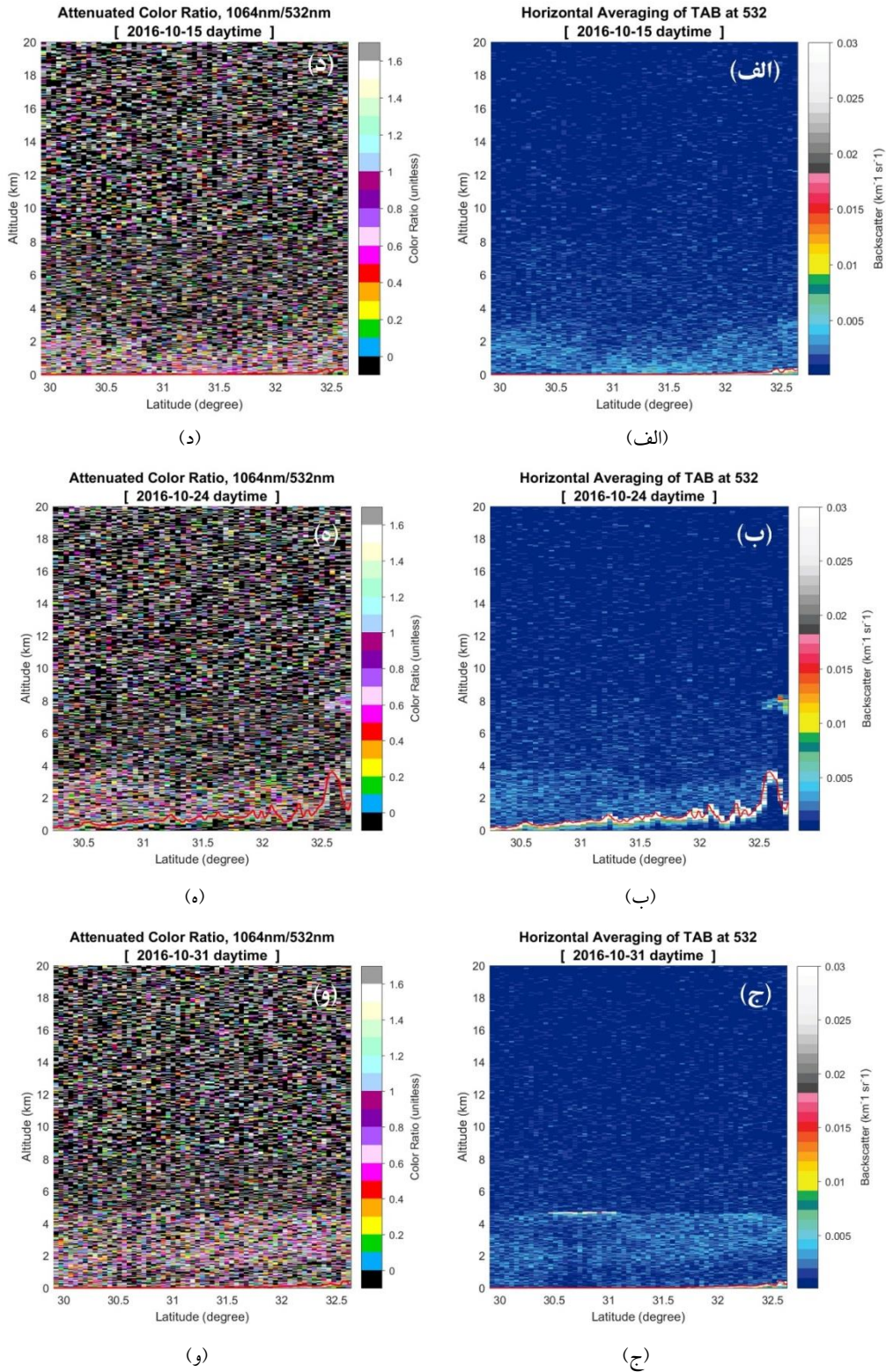
جهت تحلیل لایه میانگین گیری افقی نمونه‌های مطالعاتی لازم است تغییرات ضخامت لایه گردو خاک بر روی منطقه بار دیگر مرور شود. در نمونه اول که مربوط به روز ۱۵ اکتبر ۲۰۱۶ است، روند تغییرات به این صورت است که از عرض ۳۰ تا ۳۰/۷ درجه ضخامت لایه گردو خاک ۳/۲ کیلومتر است. سپس از عرض ۳۰/۷ تا ۳۲/۱ درجه از ضخامت لایه گردو خاک کاسته شده و به ۲/۴ کیلومتر رسیده است و پس از آن در عرض‌های بالاتر از ۳۲/۱ درجه بر گسترش قائم گردو خاک افزوده شده است و ضخامتی حدود ۳/۵ کیلومتر را نشان می‌دهد (شکل ۵-د). دقت به لایه میانگین گیری افقی نمونه مذکور (شکل ۶-الف) دقیقاً روند افزایشی و کاهشی ضخامت لایه گردو خاک در پراکنش مقادیر بازپراکنش لایدار نمایان

می‌شود، به گونه‌ای که از عرض ۳۰ تا ۳۰/۷ درجه متناظر با محدوده ارتفاعی ضخامت لایه گردو خاک، تجمع پیکسل‌هایی با مقادیر حدود ۰/۰۰۵ کیلومتر بر استرادیان که در تصویر به رنگ آبی روشن است، مشاهده می‌شود و سپس از عرض ۳۰/۷ تا ۳۲/۱ درجه تجمع پیکسل‌ها به ارتفاع پایین‌تر محدود می‌شود و در عرض‌های بالاتر از ۳۲/۱ درجه مجدداً تراکم پیکسل‌های مذکور در ارتفاعات بالاتر دیده می‌شود. بنابراین بر اساس لایه میانگین، وجود ذرات گردو خاک در جو منطقه در این روز تأیید می‌شود. در نمونه دوم، روز ۲۴ اکتبر ۲۰۱۶ (شکل ۵-ه) ضخامت لایه گردو خاک تا عرض ۳۱/۳ درجه بیش از ۳ کیلومتر است و سپس از عرض ۳۱/۳ تا ۳۲ درجه به کمتر از ۲ کیلومتر می‌رسد. تحلیل چشمی توان بازپراکنش امواج لایدار در لایه میانگین نمونه مربوطه (شکل ۶-ب) در محدوده‌های ارتفاعی متناظر با ضخامت لایه گردو خاک، گویای حضور ذرات گردو خاک در محدوده منطقه است. سرانجام در نمونه سوم (۳۱ اکتبر ۲۰۱۶) نیز که ضخامت لایه گردو خاک از هر دو نمونه قبلی بیش‌تر است (شکل ۵-و) کاملاً منطبق با توزیع مقادیر بازپراکنش در راستای افقی و قائم است و حضور ذرات گردو خاک جوی را کاملاً تأیید می‌کند.

شاخص دیگری که در این مطالعه برای تأیید گردو خاک جوی مورد استفاده قرار گرفت، شاخص اندازه ذرات است. خروجی شاخص مذکور برای نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶ در شکل ۶ (د-و) نمایش داده شده است. مقدار این شاخص برای ابرها تقریباً برابر با یک و بیش‌تر است، در حالی که هواویزها از نسبت رنگی کوچک‌تر برخوردارند. در این تصاویر مقادیر کمتر از یک با رنگ‌هایی همچون بنفش از تیره تا روشن، صورتی، نارنجی، قرمز، سبز و زرد نمایش داده شده است. به جز ذرات معلق موجود در جو در ارتفاعات مختلف، حضور و تجمع پیکسل‌های به رنگ‌های مذکور حاکی از وجود ذرات ریز گردو خاک هستند. مقایسه لایه میانگین گیری افقی (شکل ۶ الف-ب-ج) با شاخص اندازه ذرات (شکل ۶ د-و) با یکدیگر در هر یک از

رنگی با مقادیر کمتر از یک بیش تر است و این مطلب نیز تأییدی دیگر بر وجود ذرات ریز گردو خاک در هر سه نمونه ماه اکتبر ۲۰۱۶ در منطقه است.

نمونه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد در هر محدوده ارتفاعی در لایه میانگین که مقادیر بازپراکنش قوی‌تر و فشرده‌ترند، عیناً در همان محدوده‌ها تراکم پیکسل‌های



شکل ۶. میانگین‌گیری افقی مجموع تضعیف بازپراکنش (الف-ب-ج) و شاخص نسبت رنگی برای اندازه ذرات (د-ه-و) مربوط به نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶.

۲-۳. دوره گردوخاکی ماه اکتبر ۲۰۱۷

مدار ماهواره CALIPSO در تاریخ های ۲، ۱۱ و ۲۷ ماه اکتبر ۲۰۱۷ از روی منطقه خوزستان عبور کرده است. مقادیر بازپراکنش لایدار در هر یک از این روزها نشان‌دهنده پدیده گردوخاک در منطقه است. شکل ۷ (الف-ب-ج)، لایه ماسک ویژگی قائم نمونه‌های مطالعاتی مورد نظر را نشان می‌دهد. در این دوره گردوخاکی نیز همانند دوره قبلی، مدار ماهواره از دو منطقه متفاوت استان خوزستان به لحاظ ارتفاع از سطح زمین عبور کرده است که از لایه ماسک ویژگی قائم مشاهده می‌شود. در تاریخ ۲ اکتبر ۲۰۱۷ مدار ماهواره از روی سرزمین کاملاً هموار و جلگه‌ای غرب خوزستان (شکل ۱ مسیر B) و در تاریخ های ۱۱ و ۲۷ اکتبر ۲۰۱۷ از شرق استان (شکل ۱ مسیر A) عبور کرده است. بر اساس این تصاویر طبقه هواویز که به رنگ نارنجی است قابل رؤیت است.

شکل ۷ (د-ه-و)، حداکثر ضخامت لایه گردوخاک نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۷ را بر روی منطقه نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها در نمونه اول، روز ۲ اکتبر ۲۰۱۷ (شکل ۷-د) لایه ضخیم و یکپارچه‌ای از گردوخاک آسمان منطقه را پوشانده است. ضخامت لایه گردوخاک در این نمونه زیاد است و در کل منطقه به ۴/۵ تا ۵ کیلومتر می‌رسد. در نمونه دوم، روز ۱۱ اکتبر ۲۰۱۷ (شکل ۷-ه) ضخامت لایه گردوخاک در عرض‌های پایین منطقه که سطح زمین از ارتفاع کمتری نیز برخوردار است، بین ۳/۵ تا ۴ کیلومتر است. سپس از مقدار ضخامت آن کاسته می‌شود، به طوری که از عرض ۳۱/۱ تا ۳۱/۸ درجه به کمتر از ۱/۵ کیلومتر می‌رسد. دوباره به سمت عرض‌های بالاتر بر ضخامت آن افزوده می‌شود. در نمونه سوم، روز ۲۷ اکتبر ۲۰۱۷ (شکل ۷-و) نیز لایه ضخیمی از گردوخاک بر روی منطقه مشاهده می‌شود که ضخامت آن از عرض پایین منطقه تا عرض‌های بالای آن بین ۳/۵ تا ۴ کیلومتر در نوسان است.

برای نمونه‌های گردوخاکی این دوره نیز همانند نمونه‌های

سال ۲۰۱۶ از لایه میانگین‌گیری افقی و نیز شاخص اندازه ذرات جهت تأیید وجود ذرات گردوخاک در منطقه استفاده شد. شکل ۸ (الف-ب-ج)، لایه میانگین‌گیری افقی را برای نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. در اینجا با مراجعه مجدد به نمودار ضخامت لایه گردوخاک نمونه‌های مطالعاتی، ارتباط بین نوسانات ضخامت لایه گردوخاک در منطقه و توزیع مقادیر بازپراکنش لایدار بررسی می‌شود.

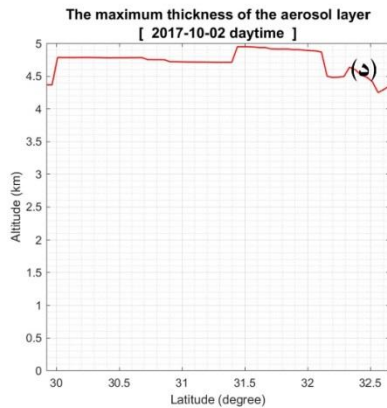
همان‌گونه که از نمودار ضخامت لایه گردوخاک در نمونه اول آشکار شد، ضخامت لایه گردوخاک از عرض ۳۰ تا ۳۱/۴ درجه حدود ۴/۸ کیلومتر است و پس از آن تا عرض ۳۲/۱ درجه حدود ۱۰۰ متری بر ضخامت آن افزوده می‌شود و سپس تا عرض ۳۲/۵ درجه روند کاهشی پیدا می‌کند (شکل ۷-د). روند تغییرات ضخامت لایه گردوخاک دقیقاً در لایه میانگین نمونه مربوطه از طریق پیکسل‌های رنگی محدوده منطقه مطالعاتی که مقادیری حدود ۰/۰۰۵ کیلومتر بر استرادیان را نشان می‌دهد، قابل مشاهده و ارزیابی است. در حدود عرض ۳۰/۵ درجه در محدوده کوچکی تراکمی در پیکسل‌ها دیده می‌شود که حاکی از غلظت بیشتر ذرات گردوخاک در این محدوده است (شکل ۸-الف).

در نمونه دوم (شکل ۷-ه) نوسانات قابل مشاهده در ضخامت لایه گردوخاک منطقه با دقت نظر بر روی لایه میانگین همین نمونه (شکل ۸-ب)، کاملاً با مقادیر بازپراکنش لایدار قابل انطباق است. به‌عنوان مثال روند کاهشی ضخامت لایه گردوخاک در حدود عرض ۳۱ درجه عیناً منطبق بر توزیع مقادیر بازپراکنش لایدار در تصویر لایه میانگین نمونه مذکور است. همچنین از عرض ۳۱/۱ تا ۳۱/۸ درجه که ضخامت لایه گردوخاک تا حدود یک کیلومتری سطح زمین کاهش پیدا می‌کند، در محدوده همین عرض جغرافیایی در لایه میانگین، کاهش ضخامت لایه گردوخاک قابل مشاهده است. سرانجام در نمونه سوم (شکل ۷-و) لایه ضخیمی از گردوخاک که نوسانات آن در کل منطقه چندان زیاد نیست کاملاً با

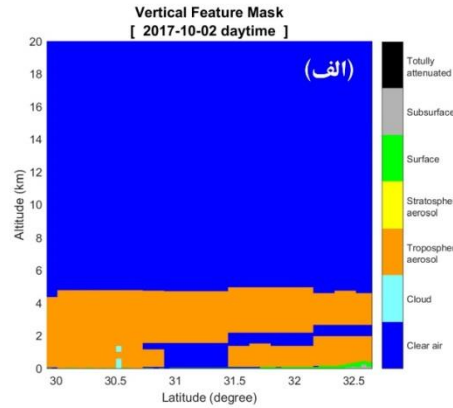
در شکل ۸ (د-ه-و) نمایش داده شده است همانند نمونه‌هایی که برای سال ۲۰۱۶ تحلیل شد، حضور و تراکم پیکسل‌ها به رنگ‌هایی که نمایانگر مقادیر کمتر از ۱ است تأییدکننده وجود ذرات ریز گردو خاک در محدوده منطقه خوزستان است. لذا بر مبنای این شاخص نیز وجود گردو خاک در منطقه در هر سه نمونه تأیید می‌شود.

توزیع مقادیر بازپراکنش امواج لایدار در راستای قائم همخوانی دارد. بنابراین بر اساس لایه میانگین گیری افقی وجود ذرات گردو خاک در جو منطقه در هر سه نمونه مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۷ تأیید می‌شود.

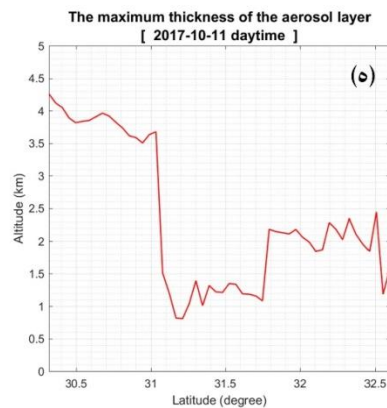
علاوه بر لایه میانگین بازپراکنش، دقت کامل به خروجی شاخص اندازه ذرات در نمونه‌های مطالعاتی این دوره که



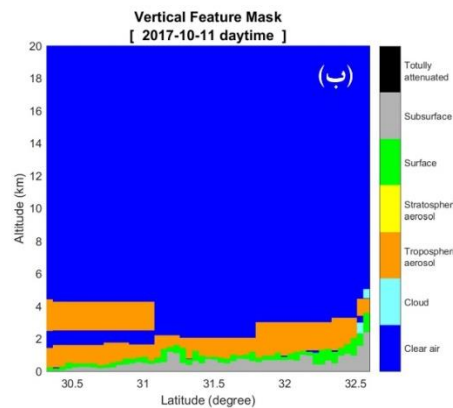
(د)



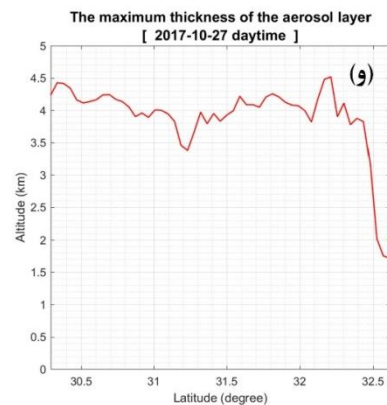
(الف)



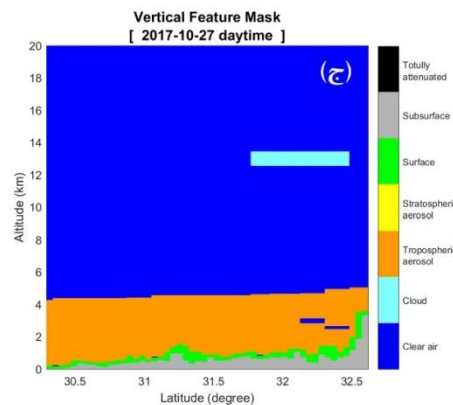
(ه)



(ب)

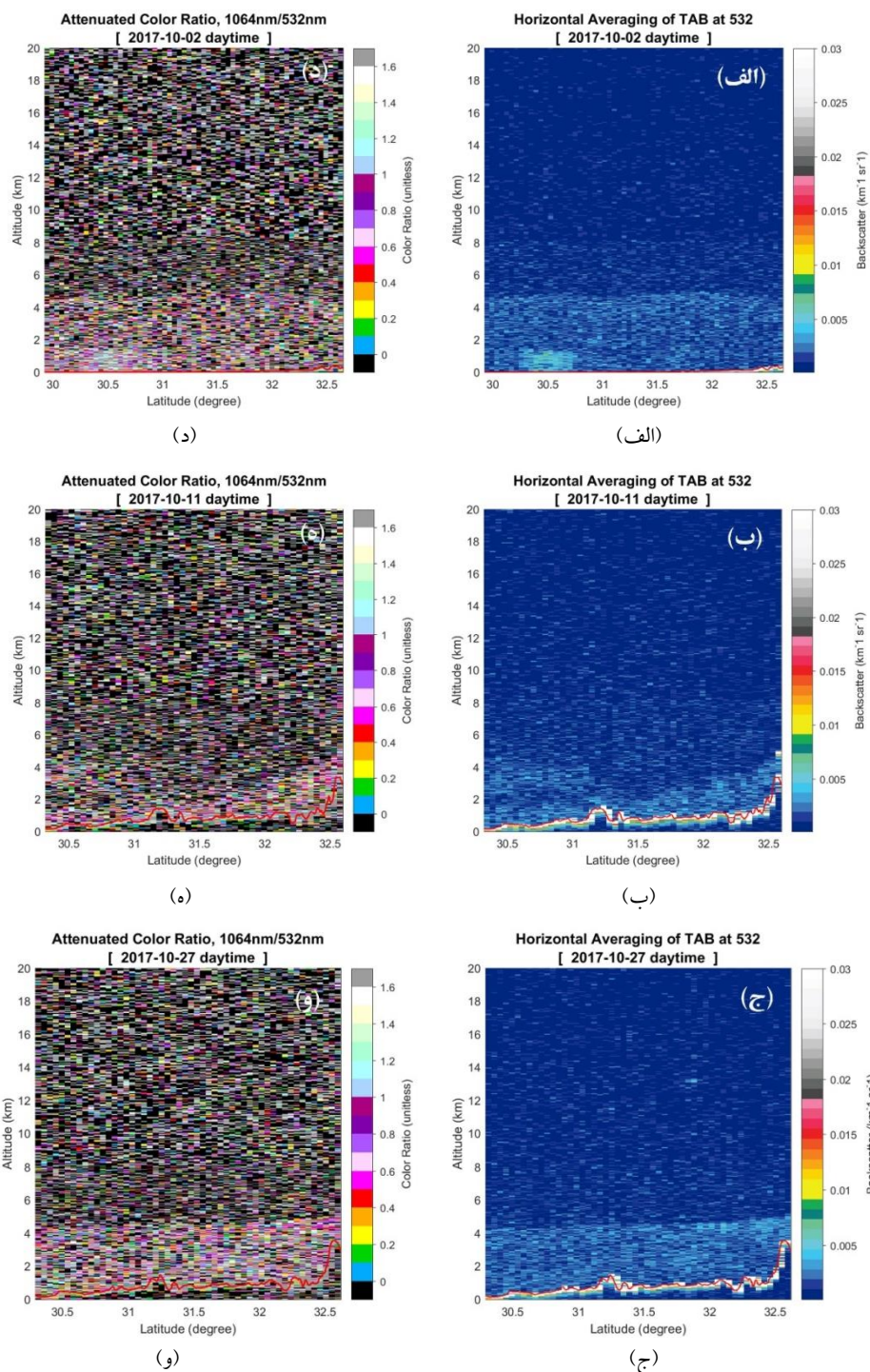


(و)



(ج)

شکل ۷. ماسک ویژگی قائم (الف-ب-ج) و حداکثر ضخامت لایه گردو خاک (د-ه-و) برای نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۷. رنگ نارنجی در تصاویر سمت چپ، طبقه هواویز را نشان می‌دهد.



شکل ۸. میانگین گیری افقی مجموع تضعیف بازپراکنش (الف-ب-ج) و شاخص نسبت رنگی برای اندازه ذرات (د-ه-و) مربوط به نمونه‌های مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۷.

۴. نتیجه گیری

مطالعاتی استان خوزستان به‌عنوان منطقه هدف در نظر گرفته شد. در همین راستا از ۶ نمونه مطالعاتی که مدار ماهواره CALIPSO طی ماه اکتبر ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ از مسیرهای A و B بر فراز استان خوزستان عبور کرده بود، استفاده شد. نمونه‌های مطالعاتی به دو دوره شامل: دوره

هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی حداکثر ضخامت لایه گردو خاک با استفاده از داده‌های لایدار CALIOP است. به‌همین منظور از روش استخراج نیم‌رخ قائم هواویز استفاده شد. جهت اجرای روش مذکور، محدوده

بر اساس یافته‌های تحقیق بکارگیری روش نیم‌رخ قائم هواویز، قابلیت استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک با استفاده از داده‌های لایدار فضایی را دارد هرچند خروجی این روش در شرایطی که لایه گردو خاک از پوشش افقی و قائم یکدست و متراکمی برخوردار باشد دقیق‌تر است. در این تحقیق، علاوه بر استخراج ضخامت لایه گردو خاک، اندازه و میزان تراکم ذرات نیز با استفاده از شاخص نسبت رنگی مورد مطالعه قرار گرفت. این شاخص پس از اعمال روش میانگین‌گیری افقی ۵ کیلومتر بر داده‌های بازپراکنش امواج لایدار محاسبه شد. روش میانگین‌گیری افقی ۵ کیلومتر، دارای قابلیت کاهش مؤثر نویز در لایه تضعیف بازپراکنش و افزایش دقت تشخیص ابر از هواویز است که باعث آشکارسازی مرز بین هوای پاک و آلوده و نیز آگاهی از میزان تراکم هواویزها می‌شود. بر این اساس، روش مذکور میزان تراکم و غلظت ذرات گردو خاک را از طریق توزیع مقادیر بازپراکنش امواج لایدار در ارتفاعات مختلف به وضوح نشان داد و وجود ذرات گردو خاک در جو منطقه در تمام نمونه‌های مطالعاتی مورد تأیید قرار گرفت. محاسبه شاخص اندازه ذرات موجود در جو و نقش غیرقابل انکار آن در تشخیص ذرات گردو خاک از دیگر نتایج این پژوهش است. مقادیر این شاخص در هر یک از نمونه‌های مطالعاتی در محدوده‌های ارتفاعی که ضخامت لایه گردو خاک استخراج شده بود، حضور ذرات ریز گردو خاک در منطقه را تأیید کرد.

مراجع

Eric, E., Wandjie, B. B. S., Lenouo, A., Monkam, D., & Manatsa, D. (2020). African summer monsoon active and break spells cloud properties: Insight from CloudSat-CALIPSO. *Atmospheric Research*, 237(August 2019), 104842.

Hostetler, C. A., Liu, Z., Reagan, J., Vaughan, M., Winker, D., Osborn, M., Hunt, W. H., Powell, K. A., & Trepte, C.

گردو خاکی ماه اکتبر ۲۰۱۶ و دوره گردو خاکی ماه اکتبر ۲۰۱۷ دسته‌بندی شدند. سپس با استفاده از داده‌های لایدار، چهار لایه اطلاعاتی شامل: لایه مجموع تضعیف بازپراکنش در طول موج ۵۳۲ نانومتر، لایه میانگین‌گیری افقی، لایه ماسک و ویژگی قائم و لایه نسبت رنگی (شاخص اندازه ذرات) برای هر ۶ نمونه مطالعاتی در محدوده استان خوزستان آماده‌سازی شد. به منظور استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک، متغیر ارتفاع از سطح زمین از داده سطح 1B و ارتفاع سقف هواویز از لایه ماسک و ویژگی قائم و طبقه هواویز استخراج شد و در نهایت نمودار حداکثر ضخامت لایه گردو خاک محاسبه و ترسیم شد.

از میان ۶ نمونه مطالعاتی ماه اکتبر ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، ۳ نمونه منطبق بر منطقه پست و جلگه‌ای غرب خوزستان است و ۳ نمونه دیگر مربوط به محدوده شرق استان خوزستان است که سرزمین آن از پستی و بلندی برخوردار است. نتایج حاصل از استخراج حداکثر ضخامت لایه گردو خاک با روش نیم‌رخ قائم هواویز نشان داد که در منطقه جلگه‌ای غرب در هر ۳ نمونه حداکثر ضخامت لایه گردو خاک به ترتیب تاریخ وقوع گردو خاک ۳/۵، ۴/۷ و ۴/۹ کیلومتر و حداقل آن ۲/۴، ۴/۳ و ۴/۵ کیلومتر است. حداکثر ضخامت لایه گردو خاک در شرق استان به ترتیب تاریخ وقوع گردو خاک ۳/۵، ۴/۳ و ۴/۳ کیلومتر است و حداقل آن ۱، ۱ و ۲/۵ کیلومتر است. بنابراین ضخامت لایه گردو خاک در نمونه‌های مطالعاتی در سرزمین کاملاً مسطح غرب منطقه بیش از شرق آن است. علاوه بر این در شرق منطقه نیز مقادیر حداکثر ضخامت لایه گردو خاک عمده‌تاً منطبق بر عرض‌های پایین منطقه است که سطح زمین از ارتفاع کمتری برخوردار است.

(2006). CALIOP algorithm theoretical basis document, calibration and level 1 data products. *Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations PC-SCI-201*, April, 1-66.

Hu, Y., Winker, D., Vaughan, M., Lin, B., Omar, A., Trepte, C., Flittner, D., Yang, P., Nasiri, S.L., & Baum, B. (2009). CALIPSO/CALIOP Cloud Phase

- Discrimination Algorithm. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 26, 2293–2309.
- Iorio, T. Di, Sarra, A., Junkermann, W., Cacciani, M., Fiocco, G., & Fua, D. (2003). *Tropospheric aerosols in the Mediterranean: 1. Microphysical and optical properties.* 108, 1–10.
- Iorio, T., Di, Sarra, A., Sferlazzo, D. M., Cacciani, M., Meloni, D., Monteleone, F., & Fua, D. (2009). *Seasonal evolution of the tropospheric aerosol vertical profile in the central Mediterranean and role of desert dust.* 114, 1–9.
- Kuma, P. (2010). *Visualising Data from CloudSat and CALIPSO Satellites.* 1–73.
- Liu, Z., Omar, A., Vaughan, M., Hair, J., Kittaka, C., Hu, Y., Powell, K., Trepte, C., Winker, D., Hostetler, C., Ferrare, R., & Pierce, R. (2008). *CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport.* 113, 1–20.
- Liu, Z.Y., Vaughan, M., Winker, D., Kittaka, C., Getzewich, B., Kuehn, R., Omar, A., Powell, K., Trepte, C., & Hostetler, C. (2009). The CALIPSO Lidar Cloud and Aerosol Discrimination: Version 2 Algorithm and Initial Assessment of Performance. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 26, 1198–1213.
- Liu, B., Ma, Y., Gong, W., & Zhang, M. (2017). Observations of aerosol color ratio and depolarization ratio over Wuhan. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1113–1122.
- Liu, B., Ma, Y., Liu, J., Gong, W., Wang, W., & Zhang, M. (2018). *Graphics algorithm for deriving atmospheric boundary layer heights from CALIPSO data.* 5075–5085.
- Liu, J., Huang, J., Chen, B., Zhou, T., Yan, H., Jin, H., Huang, Z., & Zhang, B. (2014). Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1–11.
- Omar, A., Liu, Z., Vaughan, M., Thornhill, K., Kittaka, C., Ismail, S., Hu, Y., Chen, G., Powell, K., Winker, D., Trepte, C., Winstead, E., & Anderson, B. (2010). *Extinction - to - backscatter ratios of Saharan dust layers derived from in situ measurements and CALIPSO overflights during NAMMA.* 115, 1–21.
- Omar, A. H., Tackett, J., & Al-dousari, A. (2022). *CALIPSO Observations of Sand and Dust Storms and Comparisons of Source Types near Kuwait City.* 1–16.
- Su, T., Li, J., Li, C., Xiang, P., Lau, A. K.-H., Guo, J., Yang, D., & Miao, Y. (2017). An intercomparison of long-term planetary boundary layer heights retrieved from CALIPSO, ground-based lidar, and radiosonde measurements over Hong Kong. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 3929–3943.
- Tesche, M., Ansmann, A., Müller, D., Althausen, D., Heese, B., Freudenthaler, V., Wiegner, M., Pisani, G., Knippertz, P., Tesche, M., Ansmann, A., Müller, D., Althausen, D., Mattis, I., Heese, B., Freudenthaler, V., Wiegner, M., & Esselborn, M. (2009). *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology Vertical profiling of Saharan dust with Raman lidars and airborne HSRL in southern Morocco during SAMUM*
- Vaughan, M. A., Winker, D. M., & Powell, K. A. (2005). CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document Part 2: Feature Detection and Layer Properties Algorithms. *Science, September*, 1–87.
- Vaughan, M.A., Powell, K.A., Kuehn, R.E., Young, S.A., Winker, D.M., Hostetler, C.A., Hunt, W.H., Liu, Z.Y., McGill, M.J., & Getzewich, B.J. (2009). Fully Automated Detection of Cloud and Aerosol Layers in the CALIPSO Lidar Measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 26, 2034–2050.
- Winker, D. M., Hunt, W. H., & McGill, M. J. (2007). Initial performance assessment of CALIOP. *Geophysical Research Letters*, 34(19), 1–5.
- Winker, D. M., Vaughan, M. A., Omar, A., Hu, Y., Powell, K. A., Liu, Z., Hunt, W. H., & Young, S. A. (2009). Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11), 2310–2323.
- Zhang, W., Guo, J., Miao, Y., Liu, H., Zhang, Y., Li, Z., & Zhai, P. (2016). *Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China.* *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 9951–9963.