بررسی الگوریتم­ تمایز ابر و ذرات معلق در هوا (CAD) با استفاده از داده‌های سنجنده CALIPSO

**سینا زاهدی اصل1\*، علیرضا فریدحسینی 2**، **Yong-Sang Choi**3،

1. کارشناس ارشد مهندسی عمران سنجش‌ازدور دانشگاه فردوسی مشهد Sina.Zahedi.Asl@gmail.com
2. دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد [Farid-h@ferdowsi.um.ac.ir](https://mail.google.com/mail/u/0/h/1uqj8e37z05mt/?&cs=wh&v=b&to=farid-h@ferdowsi.um.ac.ir)
3. دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست دانشگاه Ewha، سئول، کره­ی جنوبی ysc@ewha.ac.kr

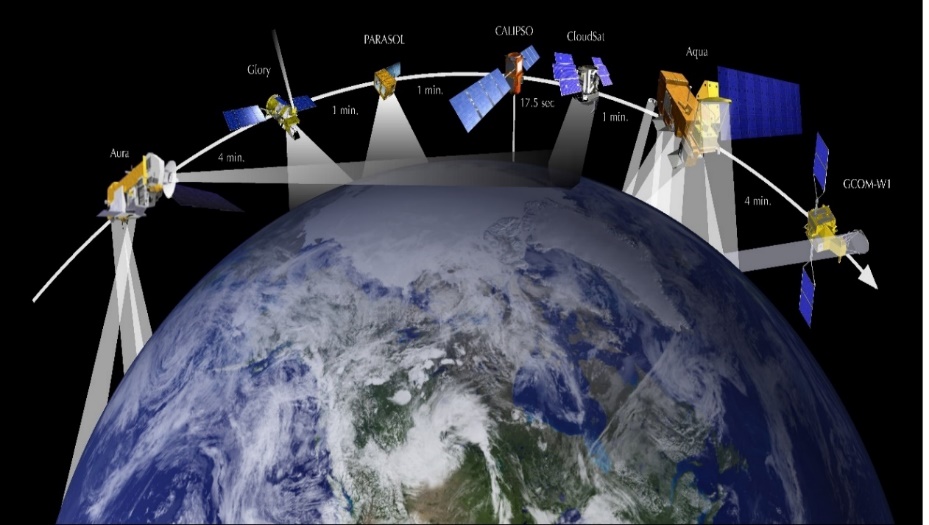
**چكيده**

سنسور CALIOP بر روی سکوی ماهواره­ی CALIPSO در 28 آوریل سال 2006 به منظور تکامل سری ماهواره­های هواشناسی (A-Train ) به فضا پرتاب شد. مهمترین مأموریت سنجنده­ی CALIPSO تهیه و تعین توزیع مکانی ابر­ها و آئروسل‌ها در فضا و همچنین بهبود درک بشر از خواص نوری و فیزیکی ذرات معلق در هوا می­باشد. سنجنده­ی CALIPSO به طور خاص برای اندازه­گیری ابرها ، آئروسل­ها و جزئیات توزیع عمودی آنها در طول‌موج­های 532 و 1064 نانومتر و با قابلیت حساس بودن به قطبش الاستیکی پراکنش بازگشتی طراحی شده است. سنسور CALIOP از ژوئن سال 2006 اقدام به جمع آوری پیوسته­ی مجموعه داده‌های سالانه در سطح جهانی نموده که در نهایت منجر به پیشرفت­های قابل توجهی در تفسیر شرایط آب­وهوایی و مدل­های مربوطه شده است. تفسیر صحیح اندازه­گیری­ها، امری بسیار حیاتی بوده و مبنای این تفسیر براساس الگوریتم تمایز ابر و آئروسل(CAD) می‌باشد. به این صورت که این الگوریتم طی یک تابع 3بعدی با استفاده از داده­های سطح 2 شامل TCR، MAB و ارتفاع (z) اقدام به تمایز ذرات از هم می­نموده است. سپس با اضافه شدن شاخص VDR و عرض جغرافیایی به تابع فوق، طی یک تابع 5بعدی تمایز ذرات مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌هاي كليدي:** CALIPSO، الگوریتم CAD، آئروسل، ابر، TCR، MAB،.VDR

1. **مقدمه**

ماهواره­ی CALIPSO در 28 ام آوریل سال 2006 به عنوان قسمتی از مجموعه ماهواره‌های خورشید آهنگ A-Train با دوره­ تناوب 16 روز در ارتفاع 705 کیلومتر از زاویه 0.3 درجه از نادیر و زاویه‌ی میل98.2 درجه به فضا پرتاب شد ([Winker et al. 2006](#_ENREF_23)). ماهواره­ی CALIPSO طی مأموریت مشترک سازمان­های فضایی NASA (آمریکا) و CNES (فرانسه) به منظور تأمین داده‌های مرتبط با نقش آئروسل‌ها و ابرها در شرایط آب و هوایی و درک بشر از این پدیده‌ها، طراحی و ساخته شده است. این سکو شامل سه سنسور (CALIOP[[1]](#footnote-1) ، [[2]](#footnote-2)WFC و [[3]](#footnote-3)IIR) در ناحیه­ی مادون قرمز می­باشد. CALIOP اصلی‌ترین سنسور موجود روی این سکو است که توسط Ball Aerospace and Technologies Corporation، Fibertekو مرکز تحقیقاتLangley Research Center (LaRC) برای تهیه­ی پروفیل‌های عمودی پراکنش‌های کشسان[[4]](#footnote-4) در دو طول‌موج 532 و 1064 نانومتر طراحی شده است. از آنجائیکه اصلی­ترین هدف مأموریت CALIPSO تهیه­ و اندازه­گیری توزیع مکانی و فضایی ابرها و آئروسل­ها در مقیاس جهانی و بررسی خواص نوری و فیزیکی ذرات (برای درک بهتر بشر از شرایط آب‌وهوایی) می­باشد؛ در دسترس بودن این مجموعه از داده‌ها برای چرخه‌های سالانه ؛ منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در ارائه­ی مدل­های آب­وهوایی و هواشناسی خواهد شد. با توجه به مشکلات اساسی سنسور­های ماهواره­های غیرفعال در بازیابی پروفیل­های عمودی ابرها و آئروسل­ها و در نتیجه بازیابی خواص نوری و فیزیکی ذرات معلق در هوا؛ CALIPSO با استفاده از سنسور CALIOPاقدام به شناسایی لایه­های ابری نازک از ابرهای ضخیم Stratus و حتی از آئروسل­ها می­نماید ([Winker et al. 2010](#_ENREF_24)). سنسورهایCALIPSO به عنوان بخشی از مجموعه ماهواره­های A-Train؛ شامل ماهواره­های Aqua، CloudSat، CALIPSO، Parasol و Aura می­باشد)شکل 1(.



شکل 1- مجموعه ماهواره­های A-Train( برگرفته از سایت [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)).

این ماهواره­ها مطابق شکل 1 به دلیل عبور از استوا در ساعت 1:30 بعدازظهر، به رهبری ماهواره­ی Aqua شروع به چرخش از نوع قطبی نموده (خورشید آهنگ) و چون به‌صورت قطار پشت سرهم چرخش می­نمایند به عنوان مجموعه ماهواره­های بعدازظهر یا قطار بعدازظهر نامیده­ می­شوند. ماهواره­های A-Train دارای شیفت زمانی کوتاه در حدود 1 الی 2 دقیقه نسبت به هم (با پهنای باند متفاوت) می­باشند. این اختلافات زمانی کوتاه نسبت به هم منجر به استفاده و مقایسه داده­های حاصل از سنسور­های مختلف می­گردد. تا به امروز مقالات زیادی با استفاده از داده­های CALIPSO در ارتباط با گردوغبار، به ویژه برای 2 منبع عمده در سطح جهان (بیابان­های Gobi و Taklamakan)، منتشر شده است ([Huang et al. 2008](#_ENREF_8), [Huang et al. 2009](#_ENREF_7), [Liu, Wang, et al. 2008](#_ENREF_12), [Generoso et al. 2008](#_ENREF_4), [Liu, Liu, et al. 2008](#_ENREF_15),  [2009](#_ENREF_17), [Uno et al. 2009](#_ENREF_20), [Chen et al. 2010](#_ENREF_2), [Badarinath et al. 2010](#_ENREF_1)). نتایج حاصل از تحقیقات در این زمینه نشان می­دهد که متوسط ارتفاع لایه­های گردوغبار در طول فصل بهار در بالاترین مقدار خود (در این مناطق) بوده است. لذا پیشنهاد نموده­اند که در خصوص ارتباط بین ارتفاع و انتقال طولانی مدت لایه­های گردوغبار در فصل بهار برای این مناطق تحقیقاتی بیشتری صورت گیرد. اما نکته­ی قابل توجه در این زمینه آن است که همه­ی این محققین از داده­های سطح 2 CALIPSO استفاده نموده­اند که اولین داده­ی منتشر شده بوده و فاقد ارزیابی جامع و اعتبارسنجی می­باشد. مشکلات عمده در این رابطه شامل طبقه­بندی نادرست لایه­های گردوغبار به عنوان ابر و طبقه­بندی اشتباه لایه­های آئروسل می­باشند. میزان این طبقه­بندی اشتباه به عنوان نمونه در تحقیقات Chen و همکاران ([2010](#_ENREF_2)) حتی تا 43% از لایه­های گردوغبار غلیظ را نیز شامل می­شود.در نتیجه در تحقیقات صورت گرفته بایستی یک بازبینی اساسی با استفاده از داده­های سطح 3 انجام شود.

در June سال 2010نسخه­ی جدیدی از داده­های CALIPSO تحت عنوان داده­های سطح 3 که دارای محصولات با کیفیت­تری نسبت به نسخه­های قبلی می­باشد؛ منتشر شد. این نسخه از داده­ها حاوی چندین نوع از محصولات مرتبط با آئروسل ازجمله نسبت­های رنگی و دپلاریزاسیون حجمی می­باشد. با استفاده از داده­های سطح سوم، پیشرفت­های قابل توجهی را در تمایز لایه­های آئروسل در مقایسه با داده­ها­ی قدیمی نشان می­دهد. با این وجود قبل از به کارگیری نسل جدید داده­های CALIPSO، بایستی ارزیابی­های متنوعی در رابطه با اعتبار این داده­ها و محصولات جدید مرتبط با آئروسل­ها (با استفاده از داده­های زمینی) روی عمده مناطق آلوده صورت گیرد. از طرف دیگر لازم است که عمده منابع خطا، خواص نوری و فیزیکی ذرات نیز در این زمینه مورد بررسی قرار گیرد. علی­رغم پیشرفت­های اخیر در زمینه­ی مدل­سازی خواص ذرات، هنوز این موضوع به عنوان مشکل چالش­برانگیزی باقی مانده است. عمده­ی این مشکلات ناشی از طبیعت و ماهیت پیچیده­ی آئروسل­ها است که دارای تنوع وسیعی در ترکیب و ابعاد هستند ([Weinzierl et al. 2009](#_ENREF_22), [Mishchenko et al. 2007](#_ENREF_18), [Lenoble, Remer, and Tanré 2013](#_ENREF_11)).

پیچیدگی دیگر، تنوع بالای خواص گردوغبار بین منابع مختلف آن (به دلیل ماندگاری بالای این ذرات) و تغییرات فیزیکی و شیمیایی ذرات در طول عبور از جو می­باشد. برای کمک به بازیابی و تفسیر داده­های CALIPSO، شبیه­سازهای نوری گسترده­ای به جهت بررسی اینکه تا چه حد تنوع خواص فیزیکی ذرات گردوغبار، مشخصات و ویژگی­های نوری ذرات را در سنجش‌ازدور لیداری تحت تأثیر قرار می­دهد؛ صورت گرفته است. به طور کلی هدف اصلی تحقیقات صورت گرفته، ارتقاء درک بشر از خواص و توزیع مکانی-زمانی آئروسل­ها و همچنین ارزیابی اثرات تابشی در نواحی از منابع گردوغبار(نواحی گرمسیر و مناطق در مسیر باد) با استفاده از نسل جدید داده­های CALIPSO (برای مدیریت بسیاری از موضوعات مرتبط در سطح جهانی) می­باشد. جدول 1 رزولوشن‌های افقی و عمودی مربوط به داده­های این سنجنده را ارائه می­دهد. البته جزئیات بیشتر در رابطه با دستگاه­ها و ابزارهای مورد استفاده در لیدار در تحقیقات Hunt و همکاران ([2009](#_ENREF_9)) ارائه شده است.

جدول 1- رزولوشن‌های افقی و عمودی مربوط به داده­های سنجنده CALIPSO.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Samples Per Profile | Profiles  Per 5 km | Horizontal  Resolution (m) | Vertical Resolution(m) | Altitude Region | |
| Base (km) | Top (km) |
| 33 | 1 | 5000 | 300 | 30.1 | 40.0 |
| 55 | 3 | 1667 | 180 | 20.2 | 30.1 |
| 200 | 5 | 1000 | 60 | 8.2 | 20.2 |
| 290 | 15 | 333 | 30 | -0.5 | 8.2 |
| 5 | 15 | 333 | 300 | -2.0 | -0.5 |

قطر ردپای CALIPSO برابر با 70 متر به فاصله­ی 335 متر از هم می­باشد بنابراین داده­ی سطح 1دارای رزولوشن (قدرت تفکیک) افقی 333 متر و رزولوشن افقی 30 متر برای ارتفاعات بین-0.5 Km الی 8.2 Km می­باشد. داده­ی سطح 2 (Level 2) بازیابی شده از داده­ی سطح1 دارای رزلوشن افقی پایین­تری نسبت به متوسط رزلوشن­های افقی و رزلوشن عمودی آن،60 متر برای ارتفاعات بین -0.5 Km الی 8.2 Km می­باشد. برای پروفیل آئروسل 5 کیلومتری بین ارتفاعات 20 Km تا 30 Km رزلوشن عمودی برابر با 180 متر می­باشد.

1. **تجربیات گذشتگان و روش­های مرتبط**

آنالیز­های انجام شده توسط محققین و پژوهشگران در طول سال­های گذشته با استفاده از نسل اول داده­های CALIOP به‌صورت خلاصه در جدول 2 ارائه شده است. عمده تحقیقات صورت گرفته در این رابطه برای منابع عمده­ی گردوغبار در قاره­های آسیا و آفریقا می­باشد. با توجه به اینکه تمامی این مناطق با استفاده از اولین نسخه از تصحیحات می­باشد، نیاز هست که این مناطق با نسخه­ی جدیدی از داده­های تصحیح شده مورد بازبینی قرار گیرند.

جدول 2- خلاصه­ای از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با ذرات معلق در هوا با استفاده از داده­های CALIPSO.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| مطالعات | منطقه و تاریخ مورد مطالعه | داده­ها و محصولات مورد استفاده |
| **Asian dust** | | |
| ([Eguchi et al. 2009](#_ENREF_3)) | Asian dust **5-15 May 2007** | - Total extinction coefficients - Particulate depolarization ratio - |
| ([Huang et al. 2008](#_ENREF_8)) | Taklimakan dust  **26-31 July 2006** | - MAB ( ) - VDR - Dust AOD - Dust aerosol extinction coefficient - Averaged vertical profiles of the dust extinction coefficient |
| ([Kim et al. 2008](#_ENREF_10)) | Asian dust **14,30 Sep, 24 Oct, 25 Nov 2006, 12 Jan, 21 Feb 2007** | - Apparent scattering ratio at 532 nm - Vertical profiles of aerosolextinction coefficient at 532 nm - Backscatter-to-extinction ratio (lidarratio) |
| ([Liu, Liu, et al. 2008](#_ENREF_15)) | Tibetan dust  **Spring in 2007** | - MAB ( ) - VDR - Backscatter Color Ratio () |
| **African Dust** | | |
| ([Generoso et al. 2008](#_ENREF_4)) | Saharan dust  **30 June-6 July 2006,13-17 February 2007** | - Attenuated backscatter profiles at532 nm - Time series of attenuatedbackscatter profiles at 532nm (From August 2006 to February2007) |
| ([Liu et al. 2010](#_ENREF_13)) | North Africa**(12°-30°N ;30°W-35°E) /June 2006- December 2008** | - Effective Lidar Ratio (ELR) - Multiple scattering factor |

#### تئوری کار پردازش اطلاعات

به طور معمول پردازش داده­های لیدار شامل 2 سطح (سطح 1 و 2) می­باشد ([Winker et al. 2006](#_ENREF_23)). سطح 1 مربوط به کالیبراسیون و زمین مرجع نمودن داده­های پس­پراکنشی لیدار بوده و پروفیل­های ارتفاعی ضرایب پراکنش بازگشتی تضعیف‌شده در نهایت در داده‌های سطح 1(1B )،CALIOP ارائه می­شوند. سپس این داده­ها در پردازش سطح 2 برای بازیابی خواص نوری و فیزیکی ابرها و آئروسل‌ها مورد استفاده قرار می­گیرند ([Powell et al. 2009](#_ENREF_19), [Hostetler et al. 2006](#_ENREF_6)).

پردازش سطح 2 شامل سه ماژول اصلی SIBYL[[5]](#footnote-5) ، [[6]](#footnote-6)SCAو HERA[[7]](#footnote-7) می‌باشد. ابتدا الگوریتم آشکارساز لایه (SIBYL) عوارضی از قبیل ابرها، آئروسل­ها، سطوح، زیرسطوح و لایه‌های اتمسفریک را تجسس نموده و مناطق دارای تغییرات سیگنال بالا در پروفیل­های پس­پراکنشی تضعیف‌شده را با استفاده از داده‌های سطح 1، آشکار می­نماید ([Vaughan et al. 2009](#_ENREF_21)). بعد از تشخیص عوارض شاخص‌های [[8]](#footnote-8)MAB برای طول‌موج­های 532و 1064 نانومتر، نسبت رنگی کلی تضعیف‌شده ([[9]](#footnote-9)TCR) و نسبت دپلاریزاسیون حجمی ([[10]](#footnote-10)VDR) برای هر عارضه­ی جوی آشکارشده، به عنوان لایه­ی مربوط به خواص نوری عوارض محاسبه می­شود. خواص نوری عوارض همراه با خواص فیزیکی عوارض شامل: ارتفاع کف و نوک عارضه، طول و عرض جغرافیایی و غیره در لایه­ سطح 2 ارائه می­شود. سپس هر عارضه براساس خواص نوری و فیزیکی خود با استفاده از ماژول SCA، کلاس­بندی می­شود ([Liu et al. 2005](#_ENREF_14)). وظیفه­ی اصلی ماژول SCA، انتخاب یک نسبت لیدار (نسبت انقراض به پراکنش) برای هر لایه، براساس نتایج کلاس‌بندی می­باشد. نسبت لیدار پارامتر کلیدی مورد استفاده در ماژول HERA، برای بازیابی ضرایب انقراض و پراکنش ذرات (ابر ، آئروسل و غیره) است ([Young and Vaughan 2009](#_ENREF_25)). بازیابی دقیق لایه­ی مربوط به خواص نوری (با استفاده از ماژول HERA)، شدیداً به انتخاب مناسب نسبت لیدار در بخش طبقه­بندی صحنه وابسته است.

هسته­ی اصلی طبقه­بندی ابر و آئروسل، براساس تابع چگالی احتمال چندبعدی ابرها و آئروسل­ها عمل می‌کند ([Liu et al. 2004](#_ENREF_16)). به طور عمده تمایز ابر و آئروسل براساس تفاوت‌های موجود در خواص فیزیکی و نوری این ذرات انجام می­گیرد. رابطه (1) تابع چگالی احتمال مورد استفاده در الگوریتم را نشان می­دهد ([Liu et al. 2004](#_ENREF_16)).

(1)

که و به ترتیب تابع چگالی احتمال ابر و آئروسل، برای ابعاد می­باشد. k فاکتور مقیاس مربوط به لایه‌های آئروسل و ابر است که در طول اندازه­گیری داده تعیین می­شود. این پارامتر بسته به موقعیت، ارتفاع، زمان و حتی فصل اندازه­گیری مقادیر متفاوتی می­تواند داشته باشد. ابعاد شامل اندازه­گیری­های لیدار از جمله: شدت پراکنش، نسبت دپلاریزاسیون و یا پارامترهای اضافی (نظیر: دما، فشار ،موقعیت و غیره) می­باشد (خواص نوری و فیزیکی). تابع احتمال دیفرانسیلی نرمالیزه­ شده با مقداری بین 1- و 1+ می­باشد که در الگوریتم سطح 2 و 3 CALIOP، به‌صورت مقادیر درصدی صحیح بین 100- تا 100+ (به عنوان امتیازات ویژه ­CAD) برای هر عارضه ارائه می­شود. شناسایی هریک از عوارض ابری و آئروسلی براساس امتیاز اختصاصی برای هر عارضه، با توجه به شرایط زیر انجام می­شود.

الف- ؛ تابع احتمال ابر بزرگتر از تابع احتمال آئروسل بوده و عارضه به عنوان ابر کلاس­بندی می­شود. ب- ؛ تابع احتمال ابر کوچکتر از تابع احتمال آئروسل بوده و عارضه به عنوان آئروسل کلاس­بندی می­شود. ج- ؛ احتمال ابر و آئروسل بودن عارضه یکسان بوده و بنابراین نوع عارضه، نامشخص می­باشد.

البته مقادیر مربوط به امتیازات عوارض نمایانگر میزان اطمینان از کلاس­بندی آنها می­باشد. به طوری که مقادیر بالاتر نشان از صحیح بودن کلاس­بندی می­دهند.از لحاظ تئوری مقدار مطلق 100 نشان دهنده­ی اطمینان کامل و مقادیر مطلق کوچتر از 100 مربوط به نواحی مبهم ابری و آئروسلی ناشی از هم­پوشانی آنها است که در واقع به نوعی بهترین حدس برای عارضه می­باشد.

عملکرد طبقه­بندی، لزوماً محدود به درجه­ی هم­پوشانی توابع چگالی احتمال ابر و آئروسل می­باشد؛ به طوریکه با کوچکتر شدن ناحیه­ هم­پوشانی تمایز این ذرات کامل­تر و در نتیجه عمکرد کلاس­بندی بهتر خواهد شد. به همین جهت به منظور کاهش هم­پوشانی، از توابع PDF با ابعاد بیشتر، برای تمایز ذرات استفاده می­شود ([Liu et al. 2004](#_ENREF_16),  [2010](#_ENREF_13)). در اصل به منظور دست­یابی به بهترین عملکرد در کلاس­بندی، بایستی تا حد امکان از تعداد پارامترهای مشاهداتی زیاد و البته مستقل استفاده نمود.البته به منظور بهبود عملکرد کلاس­بندی بایستی برخی از مسائل از قبیل: زمان محاسبه و هزینه­ی استفاده از داده­های کمکی نیز در نظر گرفته شود.به هنگام انتخاب ابعاد مورد استفاده در تمایز ذرات از هم، بایستی یک اولویت بسیار قوی برای خواص ذاتی عارضه­ها اختصاص یابد که تنها وابسته­ با ترکیبات خود عارضه بوده و مستقل از غلظت ذرات دیگر باشد.به دلیل اینکه الگوریتم CAD اولین مرحله از آنالیز کلاس­بندی صحنه (قبل از بازیابی ضرایب انقراض بوسیله­ی ماژول HERA) است؛ برخی از ویژگی­های ذاتی ذرات از قبیل نسبت رنگی () در دسترس نبوده و به همین جهت با پارامتر فرعی آن (یعنی نسبت رنگی تضعیف‌شده()) جایگزین می­شود. ابعاد تابع چگالی احتمال برای نسخه اول و دوم، شامل 2 و 3 بعد (MAB ()، TCR () و ارتفاع مرکز لایه(z))، بوده که با اضافه شدن 2 شاخص ­ VDR() و عرض­جغرافیایی (Lat)؛ نسخه سوم، 5 بعدی الگوریتم تمایز ابر و آئروسل حاصل می­شود ([Liu et al. 2004](#_ENREF_16), [2010](#_ENREF_13)).

## 3-1. الگوریتم CAD V.2

در این بخش تئوری­ اساسی الگوریتم CAD لیدار CALIPSOبررسی شده و توسعه­های الگوریتمی وارده به نسخه­ی 2 که در نسخه­ی اولیه­ی داده­ها به کار گرفته شده؛ تفسیر می­گردد. سپس شرح و بررسی انجام شده برای داده­ی مربوط به یک روز کامل (Aug 12 2006) همراه با داده­ی 5 کیلومتری حاصل از یک ماه اندازه­گیری (ماه ژوئن) CALIOP، و همچنین داده­ی شبانه CALIOP (Jun 27 2007) به هنگام عبور از مرکز و جنوب اروپا و شمال آفریقا به عنوان نمونه ارائه می­شود. با توجه به نتایج ذکر شده توسط Liu و همکاران [(2009)](#_ENREF_17)، این الگوریتم در بیشتر زمینه­ها نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند. اما با این وجود هنوز تعدادی لایه­ی به اشتباه طبقه­بندی شده، وجود دارد. شایع­ترین آنها، لایه­های گردوغبار و دود می­باشد که به طور معمول به دلیل مشابه بودن خواص نوری آنها با ابرها، به عنوان ابر طبقه بندی می­شوند. آنالیز داده­های July سال 2006 نشان می­دهد که طبقه­بندی اشتباه لایه­های گردوغبار و دود به عنوان ابر، برای درصد کمتری از ابرهای استراتوسفریک و آئروسل­ها رخ داده است که البته لایه‌های دود به نسبت لایه‌های گرد و غبار کمتر دچار طبقه بندی اشتباه شده است. همچنین ابرهای نازک مرئی در مناطق قطبی نیز می­توانند اشتباها به عنوان گرد و غبار طبقه­بندی شوند. اما در کل میزان این نوع از اشتباهات در مقایسه با طبقه­بندی اشتباه آئروسل‌ها به عنوان ابر بسیار کوچک می­باشد. به همین دلیل در مطالعات مرتبط با آئروسل‌ها در مناطق قطبی و مرطوب همواره بایستی جانب احتیاط رعایت شود. Liu و همکاران ( [2009](#_ENREF_17)) به کمک مبنای نظری الگوریتم CAD و نحوه­ی اجرای آن اقدام به تمایز ذرات از هم با استفاده از تابع PDF به عنوان یک آرایه­ی 3 بعدی (به‌صورت 20\*100\*100) نمودند. شاخص به‌صورت یک تابع لگاریتمی دارای 100 المان بوده که از ln( شروع و با قطعات 0.14 تایی افزایش می­یابد. شاخص نسبت رنگی دارای 100 المان بوده که از شروع و با قطعاتی با گام­های0.02 افزایش می­یابد و در نهایت ارتفاع (z) برای 20 کیلومتر، (از 1 تا (20 به ارتفاعات 1 کیلومتری تقسیم­بندی شده است. با وجود سخت­افزارهای کامپیوتری مناسب و تأمین انبوه داده­ها، به جهت تسهیل در طبقه­بندی دستی تصاویر بر مبنای عوارض و همچنین علی‌رغم پشتیبانی­های سخت­افزاری و اقدامات مرتبط در این زمینه­، بعضی عوارض با درصد اطمینان بالا­، (با استفاده از این الگوریتم) شناسایی و آشکارسازی نشده­اند. این عوارض شامل: لایه­ها و اشیاء موجود در کناره­های ابرها، لایه­های ترکیبی ابر و آئروسل و لایه­های موجود در زیر ابرهای متراکم به هنگام آشکارسازی با مشکل مواجه می­شوند. شکل 2 نمایش پراکنش با خطوط منحنی میزان، برای ابر و آئروسل و توزیع وقوع پس­پراکنش­های تضعیف­شده­ی ابر با رنگ آبی و آئروسل با رنگ قرمز را در محدوده­ی ارتفاعی صفر تا یک کیلومتر (برای داده­های اندازه­گیری شده با سنسور CALIOPدر تاریخ 12 آگوست سال 2006) ارائه می­دهد.

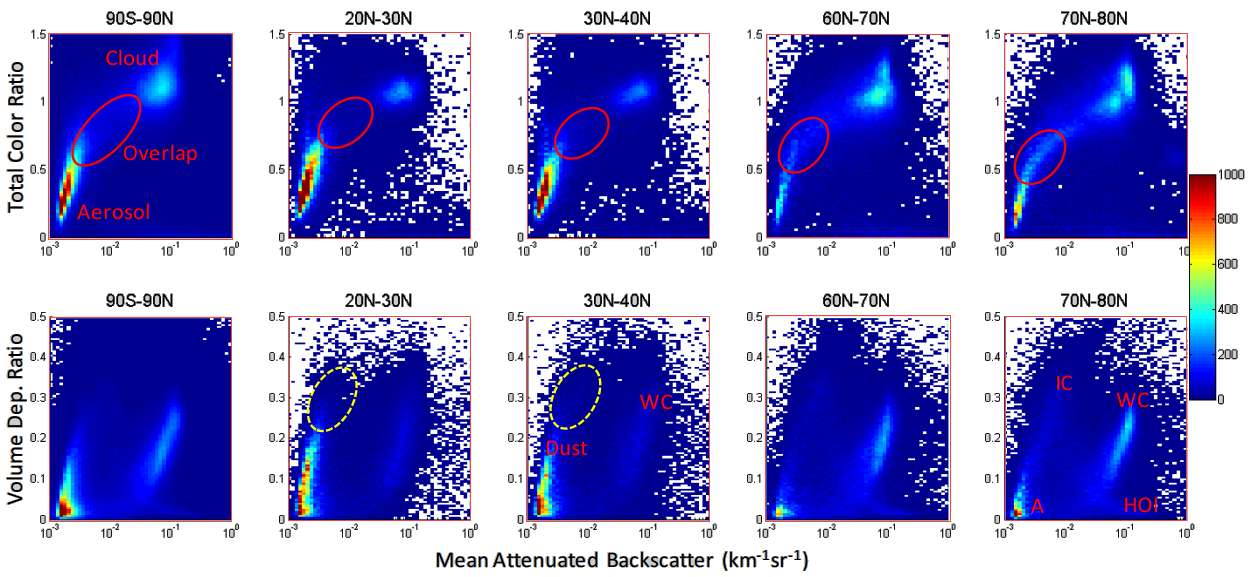
|  |  |
| --- | --- |
| E:\MA-FUW\FUM_03\Seminar\Seminar_Doc\Pix\fig-17-aB.bmp | E:\MA-FUW\FUM_03\Seminar\Seminar_Doc\Pix\fig-17-aB.bmp |

شکل 2- (a) نمایش پراکنش با خطوط منحنی میزان برای ابر (رنگ آبی)، آئروسل­ (رنگ قرمز) و ناحیه هم­پوشانی (رنگ مشکی).(b)  توزیع وقوع ابرها (رنگ آبی) و آئروسل­ها (رنگ قرمز).

ملاحظه می­شود که آئروسل­ها عمدتاً دارای شدت پس­پراکنش و نسبت رنگی پس­پراکنش تضعیف‌شده­ی پایین­تری در مقایسه با ابرها هستند. مطابق نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده توسط Liu و همکاران ( [2004](#_ENREF_16)) ، با استفاده از مجموعه نرم­افزارهای OPAC[[11]](#footnote-11) (تهیه شده توسط Hess، Koepke و Schult ([1998](#_ENREF_5))) کلاس­های ابر و آئروسل در فضای نسبت رنگی به طور گسترده­ای از هم تفکیک می­شوند. با وجود اینکه آئروسل­ها دارای توزیع تک نمایی[[12]](#footnote-12) متمرکز در نقطه­ی *)* از محور پس­پراکنش تضعیف‌شده بوده و در نقطه­ی 0.45 از محور نسبت رنگی تضعیف‌شده متمرکز می­باشند؛ ابرها دارای توزیع دونمایی[[13]](#footnote-13) به ترتیب متمر­کز در نقاط *)* از محور پس­پراکنش تضعیف‌شده و متمرکز در نقاط 0.95, 1 از محور نسبت رنگی تضعیف‌شده می­باشند. یک هم­پوشانی عمده در ناحیه­ی بین ) از محور پس­پراکنش تضعیف‌شده و ناحیه­ی بین 0.5 – 0.9 از محور پس­پراکنش تضعیف‌شده مشاهده می­شود که ممکن است حاوی لایه­های گردوغبار و دود بوده درنتیجه امکان کلاس­بندی اشتباه به دلیل هم­پوشانی وجود دارد. آئروسل­های گردوغبار به دلیل داشتن ابعاد بزرگتری از ذرات، دارای نسبت­های رنگی تضعیف­شده­ی بالاتری در مقایسه با ابرها می­باشند.

## 3-2. الگوریتم CAD V.3

به منظور استفاده از ورژن 3 محصولات (الگوریتم سطح 3) داده‌های لیدار CALIPSO یک الگوریتم 5 بعدی تمایز ابر و آئروسل موسوم به CAD توسط Liu و همکاران ([2010](#_ENREF_13)) ارائه داده شده است. عمده مزیت این تابع 5 بعدی نسبت به تابع 3بعدی پیشین، پیشرفت­های موجود در قابلیت آشکارسازی عارضه‌های موجود در جو ( تروپوسفر) به­ویژه در رابطه با لایه­های متراکم گرد و غبار (Dust) می­باشد که در تابع 3بعدی اغلب به‌صورت اشتباهی به عنوان ابر کلاس­بندی می­شدند. با توجه به اینکه الگوریتم تمایز ابر و آئروسل (CAD) یک تابع چگالی احتمال (PDF) چندبعدی[[14]](#footnote-14) مبتنی بر روش ارائه شده توسط Liu و همکاران ([2004](#_ENREF_16)) است؛ تابع PDF مورد استفاده در داده­های منتشر شده­ی سطح 2، از نوع 3 بعدی بوده که شامل شاخص‌های MAB () ،TCR ، () و ارتفاع مرکز لایه (z) (که این توابع قبل از پرتاب سنجنده­، بارگذاری می­شوند) می­باشد. موضوع مهم در رابطه با داده­های سطح 2 (ورژن 2) طبقه­بندی اشتباه برخی عوارض است که مورد بسیار معمول آن لایه­های متراکم گرد و غبار موجود در طوفان­های گرد و غبار در برخی مناطق هستند. این طبقه­بندی اشتباه به دلیل مشابه بودن مشخصات پس­پراکنشی لایه­های گردوغبار متراکم با لایه­های نازک ابر در تابع 3بعدی می­باشد.



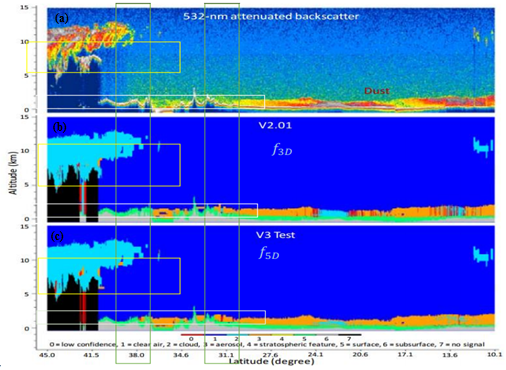
شکل 3- توزیع 2 بعدی وقوع عوارض به عنوان توابعی از پارامترهای TCR-MAB (5 شکل بالایی) و VDR-MAB (شکل­های پایینی) برای ارتفاعات 2-3 کیلومتری از ناحیه­ی 90S-90N و چهار ناحیه­ی (20N-30N, 30N-40N, 60N-70N, 70N-80N) برای داده­ی 4 ماهه­ی اندازه­گیری شده (January,May, and August 2007, and January 2008).

نتایج حاصل از استفاده از تابع PDF 5 بعدی در تمایز ابر و آئروسل نشان می­دهد که لایه‌های گردوغبار غلیظ و دود از لایه ابری به خوبی تمیز شده است. در واقع عارضه­ها به دلیل محدودیت فضای 3 بعدی انتخاب شده، به طور عمده بین 2 کلاس ابر و آئروسل تقسیم بندی می­شوند. در نتیجه برای عملکرد بهتر در طبقه­بندی بین کلاس­های مختلف و در نهایت تمایز کامل­تر ابر و آئروسل­ها، به توسعه و افزایش ابعاد تابع چگالی احتمال نیاز است ([Liu et al. 2004](#_ENREF_16)). به عنوان مثال شکل 3 توزیع 2 بعدی از وقوع عوارض برای 4 ماه مجموعه داده، با استفاده از شاخص MAB بین عرض­های جغرافیایی 90S تا 90Nرا برای محدوده­ی ارتفاعی بین 2 تا 3 کیلومتر به وسیله­ی شاخص‌های VDR و TCR نمایش می­دهد.

ملاحظه می­شود که در قسمت بالایی شکل 3 آئروسل­ها دارای مقادیر پایین TCR-MAB بوده، در حالیکه ابرها مقادیر بالای TCR-MAB را به خود اختصاص می­دهند. البته با وجود هم‌پوشانی بين ابر و آئروسل در تمام باند­ها با پیشرفت به سمت قطب شمال، هم­پوشانی عوارض به سمت مقادیر پایین شاخص­ها میل دارد. به نحوی که نواحی شمالی بخش قابل توجهی از ابر­های یخی را به خود اختصاص می­دهند. در قسمت پایین شکل 3 به دلیل استفاده از شاخص VDR، افزایش تعداد کلاس آشکار شده مشاهده می­شود. به طوری که موقعیت لایه‌های گرد و غبار، ابرهای یخی و آبی[[15]](#footnote-15) و همچنین کریستال‌های یخی[[16]](#footnote-16) که به هنگام استفاده از شاخص TCR قادر به آشکارسازی نبودند، تعیین موقعیت شدند. بیضی­های موجود در شکل­های بالایی نشان­دهنده­ی مناطق هم­پوشانی ابر و آئروسل تابع PDF در فضای TCR-MAB می­باشد و بیضی­های خط­چین در شکل­های پایینی نشان­دهنده­ی مناطقی با لایه­های گردوغبار غلیظ در فضای VDR-MAB می­باشد.

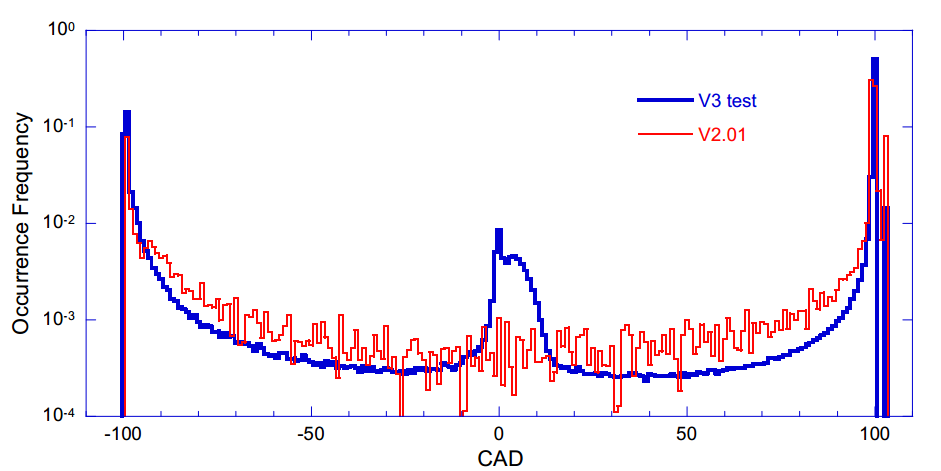
## 4 . بحث و بررسی

شکل 4، نتایج حاصل از مجموعه داده­ی 4 ماهه با استفاده از تابع PDF-5D پیشرفت قابل توجهی را در تمایز ابر و آئروسل نشان می­دهد.



شکل 4- تصویر پس­پراکنش تضعیف‌شده در طول‌موج 532 nm (a)، VFMهای حاصل از داده­های نسخه­ی 2 (b) و نسخه­ی 3 (c) برای شمال آفریقا در طول گذر شبانه (آئروسل­ها با کدبندی رنگ نارنجی ابرها با رنگ آبی روشن و عوارض با رنگ قرمز معرف عارضه­هایی با امتیاز تحت عنوان عوارض پوچ).

با مقایسه­ی نتایج حاصل (VFM) از اجرای دو الگوریتم 3 و 5 بعدی در آشکارسازی لایه‌های گرد و غبار غلیظ (در عرض جغرافیایی N31 واقع در ارتفاع کمتر از 2 کیلومتری)، برای تنها یک عکس از منطقه شمال آفریقا (January 1, 2007) و با استفاده از نسخه 3 الگوریتم CAD (مطابق شکل 4)، صحت این مسئله تصدیق می­شود. بخش‌های متراکم­تر (غلیظ) لایه‌های گردو غبار، دارای مقادیر پس­پراکنشی بالاتر نزدیک به مقادیر یافت شده (در ارتفاع بالای 5 کیلومتری) در اطراف ابرهای سیروس واقع در عرض­جغرافیایی 38N می­باشد. در حالی که این مناطق با استفاده از الگوریتم نسخه 2اشتباها به عنوان ابر کلاس­بندی شده­اند. البته لازم به ذکر است که با توجه به استفاده از تنها یک عکس و عدم امکان میانگین­گیری از داده­های دیگر، آشکارنشدن لایه­های گرد و غبار غلیظ امری معمول محسوب می­شود که این مطلب مؤید مزیت نسخه­ی سوم الگوریتم CAD 5 بعدی (قابلیت بازیابی لایه­های دود و گرد و غبار تنها با یک عکس) محسوب می­شود. پیشرفت قابل توجه دیگر در این الگوریتم، شناسایی عوارض موجود در فواصل دور از خوشه­های منتسب به لایه‌های آئروسل و ابر و اختصاص امتیازات کمتر از 20 () برای اطمینان از کلاس‌بندی این عوارض می­باشد. . به عنوان مثال نوارهای قرمز موجود در تصویر پایینی واقع در شمال عرض­جغرافیایی 41Nکه به‌صورت عمودی تا ارتفاعات بالای ابرهای سیروس گسترده شده با مقادیر کم امتیاز مربوط به کلاس­بندی می­تواند به عنوان خطای این الگوریتم محسوب شود که ممکن است ناشی از تخمین بیش‌ازحد عمق نوری[[17]](#footnote-17) باشد. در واقع بیشتر محصولات الگوریتم 5 بعدی با استفاده از عوارض دارای مقدار تقریباً >20 قابل استفاده بوده و مابقی عوارض با مقدار <20 که تقریباً تنها 0.01%از کل عوارض را شامل می­شوند؛ بدون کلاس‌بندی با کد رنگی مشکی به عنوان عوارض شناسایی نشده باقی می­مانند. شکل 5 هیستوگرام مربوط به فراوانی عوارض، با توجه به امتیازات کلاس­بندی CAD، برای هر دو الگوریتم 3 و 5 بعدی تمایز ابر و آئروسل را نمایش می­دهد..



شکل 5- هیستوگرام داده­های حاصل از نسخه­های 2 (قرمز) و 3 (آبی) الگوریتم CAD.

با توجه به شکل 5، منحنی مربوط به نسخه­ی 3 نسبت به نسخه­ی 2.01، جز در ناحیه­ی کوچک نزدیک صفر و به طور معمول برای مقادیر پایین CAD (که فرکانس (فراوانی) وقوع آنها بسیار پایین می­باشد)، دارای توزیع نرم­تری است. در نتیجه متمایز نمودن، تفکیک و حتی حذف عوارض در نسخه­ی 3 نسبت به نسخه­ی 2.01، به مراتب آسانتر می­باشد. برآمدگی (توده[[18]](#footnote-18)) موجود در نسخه­ی 3 بین مقادیر -10 تا +20 حدود 6% از عوارض را شامل می­شود. این توده می­تواند (به جهت عدم اطلاع کافی از خصوصیات فیزیکی و نوری ذرات و ابرها و همچنین با توجه به تخمین بیش‌ازحد (AOD ؛ به عوارض شناسایی نشده مربوط باشد (عوارض با کد رنگی مشکی). نکته­ی قابل‌تأمل در این رابطه آن است که عوارض مذکور در نسخه ­2.01، به طور گسترده بین مقادیر 100- تا 100+ گسترده شده بودند، اما در نسخه­ی 3 بعد از آشکارسازی لایه‌های گردوغبار غلیظ و دود، تمام این عوارض به مرکز هیستوگرام انتقال یافتند. در واقع با توجه به خصوصیات آماری داده­ها، احتمال وقوع خطاهای بسیار کوچک در اندازه­گیرها امری بدیهی می­باشد. همان‌طور که در جدول 3 نشان داده شده است؛ پردازش نسخه­ی 3 الگوریتم منجر به تولید تقریباً 14% درصد آئروسل بیشتر نسبت به نسخه­ی قبلی می­گردد. چرا که بیشتر لایه­های ترکیبی از ابر و آئروسل به دلیل مشابه بودن خواص نوری آنها با ابر، به عنوان ابر شناسایی شده بودند در حالی در الگویتم جدید عمدتاً در کلاس آئروسل قرار گرفتند. با توجه به استفاده از شاخص VDR، امتیازات 101 (ابر)، 102 (HOI) و 103(ذرات بزرگ) از عوارض خذف و کاهش یافته است. ~~پ~~س می­توان نتیجه گرفت که در پردازش V3 آئروسل­های بیشتری نسبت به V2.01 در نواحی مرزی مرتبط با لایه‌های گردوغبار غلیظ و دود، تولید می­شود.

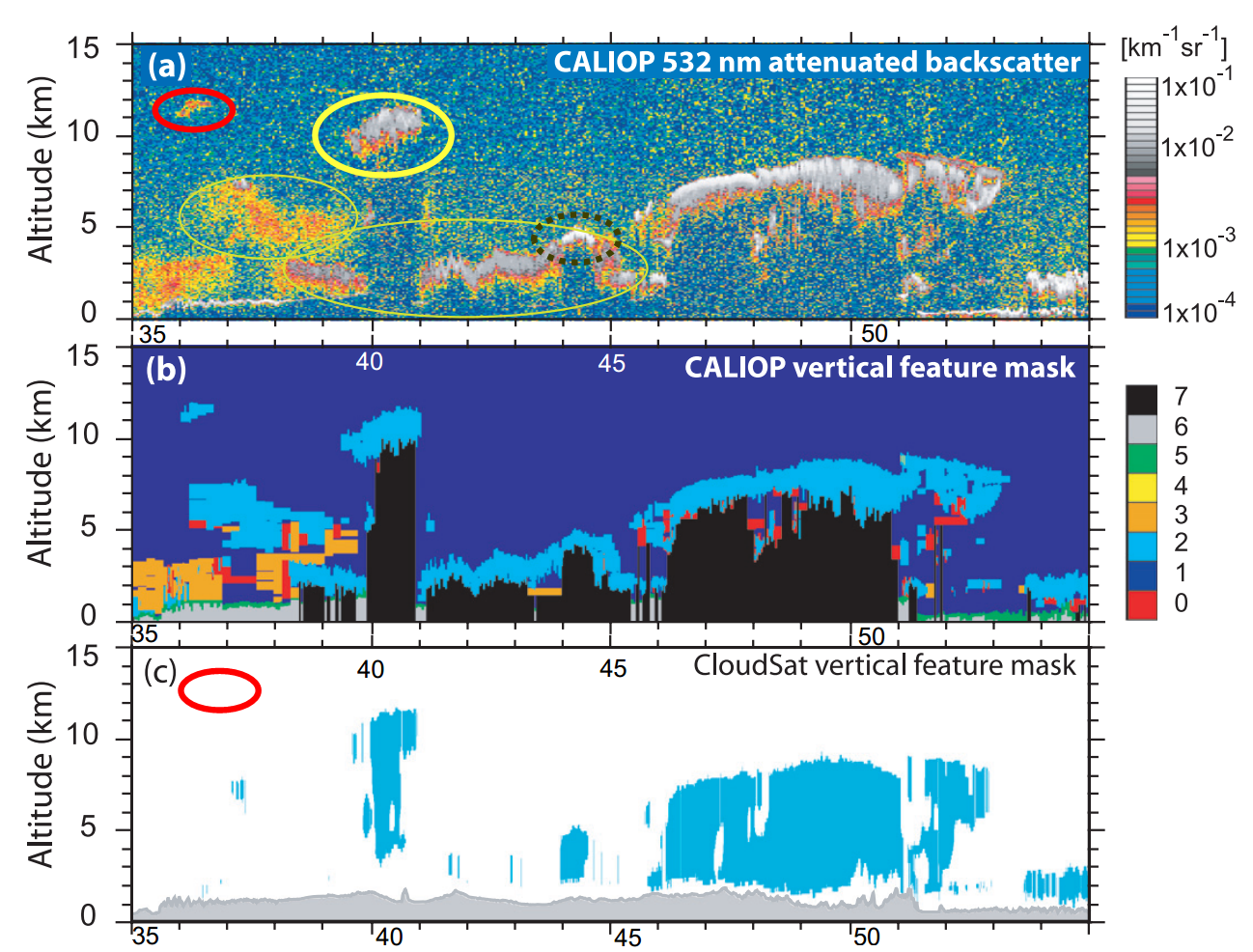
جدول 3- تفاوت نتایج حاصل از نسخه­های 2 و 3 الگوریتم CAD.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **103** | **102** | **101** | **0 to +100**  **Cloud** | **-100 to 0**  **Aerosol** | **CAD** |
| 0.5% | None | None | 63.3% | **36.2%** | **V.3** |
| 8.0% | 0.7% | 2.2% | 67.3% | 21.9% | **V.2** |

البته با وجود استفاده از تابع توزیع چگالی 5 بعدی، وجود برخی هم­پوشانی بین ابر و آئروسل امری اجتناب­ناپذیر است به عنوان نمونه ممکن است که لایه‌های گردوغباری که به عرض­های بالای جغرافیایی منتقل شده­اند به اشتباه به عنوان ابر کلاس­بندی شوند که این امر ناشی از وجود ابرهای سیروس کم ارتفاع موجود در عرض­های جغرافیایی بالا می­باشد. در نهایت به منظور جلوگیری از برخی هم­پوشانی های ظاهر شده ، نیاز به توسعه­ی الگوریتم نسخه 3 نیز وجود دارد که این امر می­تواند با کسب اطلاعات بیشتر از خواص نوری و فیزیکی ذرات و افزایش ابعاد مرتبط با تابع چگالی احتمال مورد استفاده در الگوریتم تمایز ابر و آئروسل امکان­پذیر شود.

علی‌رغم افزایش دقت و صحت طبقه­بندی الگوریتم CAD طی نسخه­ی 2 و 3، هنوز هم چندین کلاس با فرکانس­های متفاوت، به اشتباه طبقه­بندی می­شوند. شایع­ترین آنها، گردوغبار بسیار غلیظ و آئروسل­های دود موجود در نواحی مورد بررسی می­باشد. دلیل این امر مشابه بودن خواص نوری لایه­های گردوغبار و دود با خواص نوری مورد انتظار برای لایه­ی ابری (در ناحیه­ی ­ارتفاعی مورد بررسی) می­باشد. این نوع طبقه­بندی اشتباه اغلب در استفاده از داده­های سطح 1 (داده­های منتشر شده­ی اولیه­ی CALIOP) وقوع می­یابد. اما با انتشار داده­های سطح 2 CALIOP ، میزان طبقه­بندی اشتباه لایه­ها کاهش می­یابد. در شکل 6، نمونه­ای از طبقه­بندی اشتباه لایه­های گردوغبار غلیظ برای منطقه­ای واقع در شمال آفریقا، با استفاده از تابعPDF 3D برای داده­ی روزانه CALIOP (March 30.2007) (به هنگام عبور از مرکز و شمال چین و مرکز صحرای (Gobi ارائه شده است. در اواخر March سال 2007 یک طوفان گردوغباری در صحرای Gobi واقع در شمال چین و جنوب مغولستان، به وقوع پیوست که توده­های گردوغبار آن پس طی مسافت طولانی تا اقیانوس آرام شمالی نیز انتقال یافتند ([Yumimoto et al. 2008](#_ENREF_26)). مشاهدات حاصل از CALIOP، وقوع این طوفان را با رنگ­های زرد، نارنجی، قرمز و خاکستری برای شمال 46N و ارتفاعات کمتر از8 Km (شکل 6-a) تائید می­کنند. اما رادار CloudSat که صرفاً به منظور کمک به شناسایی ابرهای ضخیم مورد استفاده قرار می­گیرد، به دلیل استفاده از طول‌موج بزرگتر (3میلی­متر) (در مقایسه با طول‌موج موردنیاز برای شناسایی ذرات گردوغبار (میکرومتر))؛ قادر به تشخیص توده­های گردوغبار مطابق شکل 6-c نمی­باشد. توده­های گردوغبار غلیظ(متراکم) در ناحیه­ی 38N-46Nبا رنگ خاکستری در شکل 6-a (موجود در ارتفاعات کمتر از (4 km؛ حاوی تغییر ناگهانی سیگنال بوده که بایستی دارای عمق نوری بیش از 3 باشد. این توده گردوغبار غلیظ (با استفاده از الگوریتم (CAD، به دلیل مشابه بودن خواص نوری مورد انتظار توده با ابر، اشتباها به عنوان لایه ابری کلاس­بندی شده است(تصویرVFM شکل 6-b). از طرف دیگر توده­ی خاکستری رنگ مشابه دیگری واقع در 39.4N-41N به عنوان توده ابر غلیظ در تصاویر VFM حاصل از رادار CloudSat و سنسور CALIOP، تشخیص داده شده است. البته با مقایسه تصاویر VFM تا حدودی می­توان به ماهیت ابری و آئروسلی برخی توده­ها پی ­برد. به عنوان نمونه توده­ی گردوغبار موجود در ارتفاعات 11-12 km (در ناحیه­ی35.5N-37.5Nدر تصویر VFM سنسور CALIOP)، به عنوان ابر کلاس­بندی شده، در حالی که در تصویر VFM رادار CloudSat، توده ابری در این ناحیه آشکار نشده است (بیضی­های قرمز رنگ در شکل 6).

در هر حال بیشتر اشتباهات صورت گرفته در طبقه­بندی به هنگام استفاده از نسخه­ی 2 الگوریتم CAD می­باشد. اما با این حال لایه­های متوسط آئروسل در ارتفاعات نسبتاً بالا (که انتظار نمی­رفت بوسیله­ی این الگوریتم شناسایی شود)، به درستی در تصویر VFM سنسور CALIOP، آشکار شده است. همچنین گردوغبار موجود در شمال 37N و ارتفاع کمتر از 4 Km به‌صورت صحیح کلاس­بندی شده است.

****

شکل 6- تصویر پس­پراکنش تضعیف‌شده­ی سنسور CALIOP در طول‌موج 532 nm (a)، ماسک VFM حاصل از داده­های سنسور CALIOP (b) و سنسور CloudSat (c) برای منطقه­ای واقع در شمال آفریقا.

با توجه به اینکه سنسور CALIOP، قادر به نفوذ در ابرهای ضخیم و یا به عبارتی غلیظ (به دلیل طول­موج­های 532 و 1064 نانومتر نمی­باشد)، برای آشکارسازی این قبیل ابرها از داده­های حاصل از رادار CloudSat استفاده می­شود. مناطق سیاه رنگ موجود در تصویر VFM سنسور CALIOP و ابرهای ضخیم آشکار شده در ناحیه­ی متناظر (در تصویر VFM رادار (CloudSat، مؤید این مطلب می­باشد. در نتیجه اندازه­گیری­های توأم CALIOP، CloudSat و سایر ماهواره­های A-Train و یا اضافه نمودن ابعاد و پارامترهای مستقل و مرتبط با ذرات معلق در هوا، می­تواند نتایج کامل­تری از توزیع ابر و آئروسل­ها ارائه نماید. به طور کلی آنالیز­های صورت گرفته نشان می­دهد که نسخه­ی نهایی (CAD V 3) الگوریتم، نتایج قابل­اعتمادی را فراهم می­نماید. ازاین­رو برای مطالعات مرتبط با گردوغبار بسیار مناسب می­باشد.

**مراجع**

Badarinath, KVS, Shailesh Kumar Kharol, DG Kaskaoutis, Anu Rani Sharma, V Ramaswamy, and HD Kambezidis. 2010. "Long-range transport of dust aerosols over the Arabian Sea and Indian region—A case study using satellite data and ground-based measurements." *Global and Planetary Change* no. 72 (3):164-181.

Chen, B, J Huang, P Minnis, Y Hu, Y Yi, Z Liu, D Zhang, and X Wang. 2010. "Detection of dust aerosol by combining CALIPSO active lidar and passive IIR measurements." *Atmospheric Chemistry and Physics* no. 10 (9):4241-4251.

Eguchi, K, I Uno, K Yumimoto, T Takemura, A Shimizu, N Sugimoto, and Z Liu. 2009. "Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model." *Atmospheric Chemistry and Physics* no. 9 (9):3137-3145.

Generoso, Sylvia, Isabelle Bey, Mathieu Labonne, and François‐Marie Bréon. 2008. "Aerosol vertical distribution in dust outflow over the Atlantic: comparisons between GEOS‐Chem and Cloud‐aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO)." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* no. 113 (D24).

Hess, M, P Koepke, and I Schult. 1998. "Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC." *Bulletin of the American meteorological society* no. 79 (5):831-844.

Hostetler, Chris A, Zhaoyan Liu, J Reagan, M Vaughan, D Winker, M Osborn, WH Hunt, KA Powell, and C Trepte. 2006. "CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document–Part 1: Calibration and Level 1 Data Products." *Doc. PC‐SCI* no. 201.

Huang, J, Q Fu, J Su, Q Tang, P Minnis, Y Hu, Y Yi, and Q Zhao. 2009. "Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints." *Atmospheric Chemistry and Physics* no. 9 (12):4011-4021.

Huang, Jianping, Patrick Minnis, Bin Chen, Zhongwei Huang, Zhaoyan Liu, Qingyun Zhao, Yuhong Yi, and J Kirk Ayers. 2008. "Long‐range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* no. 113 (D23).

Hunt, William H, David M Winker, Mark A Vaughan, Kathleen A Powell, Patricia L Lucker, and Carl Weimer. 2009. "CALIPSO lidar description and performance assessment." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* no. 26 (7):1214-1228.

Kim, S-W, Sebastien Berthier, J-C Raut, Patrick Chazette, Francois Dulac, and S-C Yoon. 2008. "Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea." *Atmospheric Chemistry and Physics* no. 8 (13):3705-3720.

Lenoble, Jacqueline, Lorraine Remer, and Didier Tanré. 2013. *Aerosol remote sensing*: Springer Science & Business Media.

Liu, Dong, Zhien Wang, Zhaoyan Liu, Dave Winker, and Charles Trepte. 2008. "A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* no. 113 (D16).

Liu, Z, R Kuehn, M Vaughan, D Winker, A Omar, K Powell, C Trepte, Y Hu, and C Hostetler. 2010. The CALIPSO cloud and aerosol discrimination: Version 3 algorithm and test results. Paper read at 25th International Laser Radar Conference (ILRC), St. Petersburg, Russia.

Liu, Z, AH Omar, Yongxiang Hu, MA Vaughan, DM Winker, LR Poole, and TA Kovacs. 2005. CALIOP algorithm theoretical basis document, part 3: Scene classification algorithms. In *NASA-CNES document PC-SCI-203*.

Liu, Zhaoyan, Dong Liu, Jianping Huang, M Vaughan, Itsushi Uno, Nobuo Sugimoto, Chieko Kittaka, C Trepte, Zhien Wang, and C Hostetler. 2008. "Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations." *Atmospheric Chemistry and Physics* no. 8 (16):5045-5060.

Liu, Zhaoyan, Mark A Vaughan, David M Winker, Chris A Hostetler, Lamont R Poole, Dennis Hlavka, William Hart, and Matthew McGill. 2004. "Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* no. 109 (D15).

Liu, Zhaoyan, Mark Vaughan, David Winker, Chieko Kittaka, Brian Getzewich, Ralph Kuehn, Ali Omar, Kathleen Powell, Charles Trepte, and Chris Hostetler. 2009. "The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: Version 2 algorithm and initial assessment of performance." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* no. 26 (7):1198-1213.

Mishchenko, Michael I, Igor V Geogdzhayev, Brian Cairns, Barbara E Carlson, Jacek Chowdhary, Andrew A Lacis, Li Liu, William B Rossow, and Larry D Travis. 2007. "Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* no. 106 (1):325-347.

Powell, Kathleen A, Chris A Hostetler, Mark A Vaughan, Kam-Pui Lee, Charles R Trepte, Raymond R Rogers, David M Winker, Zhaoyan Liu, Ralph E Kuehn, and William H Hunt. 2009. "CALIPSO lidar calibration algorithms. Part I: Nighttime 532-nm parallel channel and 532-nm perpendicular channel." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* no. 26 (10):2015-2033.

Uno, Itsushi, Kenta Eguchi, Keiya Yumimoto, Toshihiko Takemura, Atsushi Shimizu, Mitsuo Uematsu, Zhaoyan Liu, Zifa Wang, Yukari Hara, and Nobuo Sugimoto. 2009. "Asian dust transported one full circuit around the globe." *Nature Geoscience* no. 2 (8):557-560.

Vaughan, Mark A, Kathleen A Powell, David M Winker, Chris A Hostetler, Ralph E Kuehn, William H Hunt, Brian J Getzewich, Stuart A Young, Zhaoyan Liu, and Matthew J McGill. 2009. "Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* no. 26 (10):2034-2050.

Weinzierl, Bernadett, Andreas Petzold, Michael Esselborn, Martin Wirth, Katharina Rasp, Konrad Kandler, Lothar Schütz, Peter Koepke, and Markus Fiebig. 2009. "Airborne measurements of dust layer properties, particle size distribution and mixing state of Saharan dust during SAMUM 2006." *Tellus B* no. 61 (1):96-117.

Winker, D, C Hostetler, M Vaughan, and A Omar. 2006. CALIOP algorithm theoretical basis document, Part 1: CALIOP Instrument and Algorithms Overview Release 2.0. Tech. rep., NASA Langley Research Center PC-SCI-202 Part 1.

Winker, DM, Jacques Pelon, JA Coakley Jr, SA Ackerman, RJ Charlson, PR Colarco, P Flamant, Q Fu, RM Hoff, and C Kittaka. 2010. "The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds."

Young, Stuart A, and Mark A Vaughan. 2009. "The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: Algorithm description." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* no. 26 (6):1105-1119.

Yumimoto, K, I Uno, N Sugimoto, A Shimizu, Z Liu, and DM Winker. 2008. "Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations." *Atmos. Chem. Phys* no. 8 (11):2869-2884.

1. CALIOP - Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization [↑](#footnote-ref-1)
2. WFC - Wide Field Camera [↑](#footnote-ref-2)
3. IIR - Imaging Infrared Radiometer [↑](#footnote-ref-3)
4. Elastic Scattering [↑](#footnote-ref-4)
5. SIBYL - Selective Iterated Boundary Locator [↑](#footnote-ref-5)
6. SCA - Scene Classification Algorithms [↑](#footnote-ref-6)
7. HERA - Hybrid Extinction Retrieval Algorithms [↑](#footnote-ref-7)
8. MAB – Mean Attenuated Backscatter [↑](#footnote-ref-8)
9. TCR – Total Color Ratio [↑](#footnote-ref-9)
10. VDR – Volume Depolarization Ratio [↑](#footnote-ref-10)
11. OPAC – Optical Properties of Aerosols and Clouds [↑](#footnote-ref-11)
12. Single-mode Distribution [↑](#footnote-ref-12)
13. Bimodal Distribution [↑](#footnote-ref-13)
14. Multi-Dimensional Probability Density Function (PDF) [↑](#footnote-ref-14)
15. IC,WC – Ice and Water cloud [↑](#footnote-ref-15)
16. HOI – Horizontally Oriented Ice [↑](#footnote-ref-16)
17. Overestimated AOD [↑](#footnote-ref-17)
18. Bump [↑](#footnote-ref-18)