

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

سینا زاهدی اصل^{۱*}، علیرضا فرید حسینی^۲، Yong-Sang Choi^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران سنجش از دور دانشگاه فردوسی مشهد Sina.Zahedi.Asl@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد Farid-h@ferdowsi.um.ac.ir

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست دانشگاه Ewha، سئول، کره ی جنوبی ysc@ewha.ac.kr

چکیده

سنسور CALIOP بر روی سکوی ماهواره ی CALIPSO در 28 آوریل سال 2006 به منظور تکامل سری ماهواره های هواشناسی (A-Train) به فضا پرتاب شد. مهمترین مأموریت سنجنده ی CALIPSO تهیه و تعیین توزیع مکانی ابرها و آئروسول ها در فضا و همچنین بهبود درک بشر از خواص نوری و فیزیکی ذرات معلق در هوا می باشد. سنجنده ی CALIPSO به طور خاص برای اندازه گیری ابرها، آئروسول ها و جزئیات توزیع عمودی آنها در طول موج های 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 پیوسته ی مجموعه داده های سالانه در سطح جهانی نموده که در نهایت منجر به پیشرفت های قابل توجهی در تفسیر شرایط آب و هوایی و مدل های مربوطه شده است. تفسیر صحیح اندازه گیری ها، امری بسیار حیاتی بوده و مبنای این تفسیر براساس الگوریتم تمایز ابر و آئروسول (CAD) می باشد. به این صورت که این الگوریتم طی یک تابع ۳ بعدی با استفاده از داده های سطح ۲ شامل MAB، TCR و ارتفاع (z) اقدام به تمایز ذرات از هم می نموده است. سپس با اضافه شدن شاخص VDR و عرض جغرافیایی به تابع فوق، طی یک تابع ۵ بعدی تمایز ذرات مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: CALIPSO، الگوریتم CAD، آئروسول، ابر، TCR، MAB، VDR.

۱- مقدمه

ماهواره ی CALIPSO در 28 ام آوریل سال 2006 به عنوان قسمتی از مجموعه ماهواره های خورشید آهنگ A-Train با دوره تناوب 16 روز در ارتفاع 705 کیلومتر از زاویه 0.3 درجه از نادیر و زاویه ی میل 98.2 درجه به فضا پرتاب شد (Winker et al. 2006). ماهواره ی CALIPSO طی مأموریت مشترک سازمان های فضایی NASA (آمریکا) و CNES (فرانسه) به منظور تأمین داده های مرتبط با نقش آئروسول ها و ابرها در شرایط آب و هوایی و درک بشر از این پدیده ها، طراحی و ساخته شده است. این سکو شامل سه سنسور (CALIOP^۱، WFC^۲ و IIR^۳) در ناحیه ی مادون قرمز می باشد. CALIOP اصلی ترین سنسور موجود روی این سکو است که توسط Ball Aerospace and Technologies Corporation، Fibertek و مرکز تحقیقات Langley Research Center (LaRC) برای تهیه ی پروفیل های عمودی پراکنش های کشسان^۴ در دو طول موج 532 و 1064 نانومتر طراحی شده است.

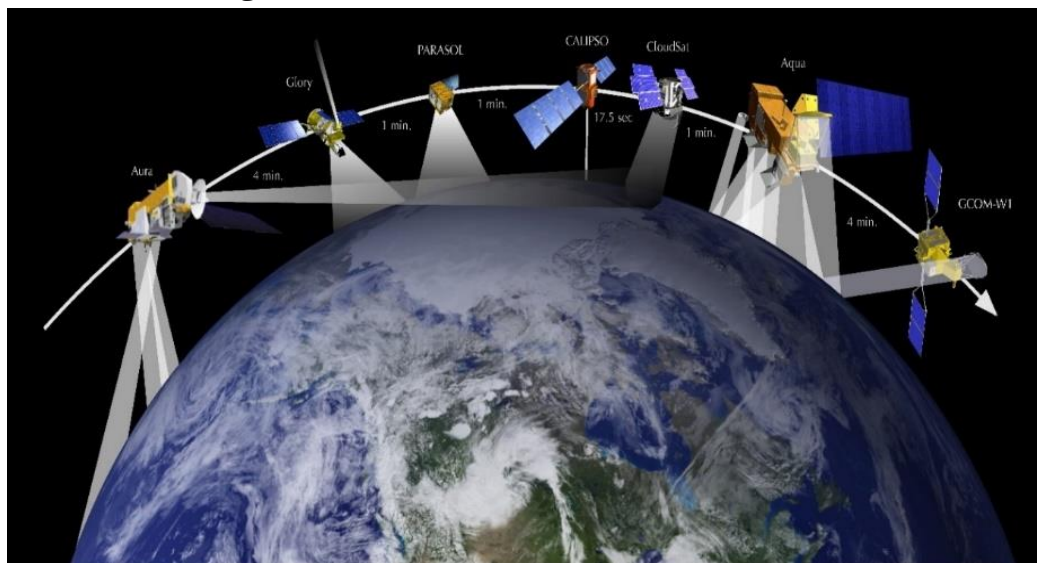
^۱ CALIOP - Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization

^۲ WFC - Wide Field Camera

^۳ IIR - Imaging Infrared Radiometer

^۴ Elastic Scattering

از آنجائیکه اصلی‌ترین هدف مأموریت CALIPSO تهیه و اندازه‌گیری توزیع مکانی و فضایی ابرها و آئروسول‌ها 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 آئروسول‌ها و در نتیجه بازیابی خواص نوری و فیزیکی ذرات معلق در هوا؛ CALIPSO با استفاده از سنسور CALIOP اقدام به شناسایی لایه‌های ابری نازک از ابرهای ضخیم Stratus و حتی از آئروسول‌ها می‌نماید (Winker et al. 2010). سنسورهای CALIPSO به عنوان بخشی از مجموعه ماهواره‌های A-Train؛ شامل ماهواره‌های Aqua، CloudSat، CALIPSO، Parosol و Aura می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- مجموعه ماهواره‌های A-Train (برگرفته از سایت www.nasa.gov).

این ماهواره‌ها مطابق شکل ۱ به دلیل عبور از استوا در ساعت ۱:۳۰ 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 ۱ الی ۲ 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 ۲ منبع عمده در سطح جهان (بیابان‌های Gobi و Taklamakan)، منتشر شده است (Huang et al. 2008, Huang et al. 2009, Liu, Wang, et al. 2008, Generoso et al. 2008, Liu, Liu, et al. 2008, 2009, Uno et al. 2009, Chen et al. 2010, Badarinath et al. 2010). 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 ۲ 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 آئروسول می‌باشند. میزان این طبقه‌بندی اشتباه به عنوان نمونه در تحقیقات Chen و همکاران (2010) 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 ۳ انجام شود.

در June سال 2010 نسخه‌ی جدیدی از داده‌های CALIPSO تحت عنوان داده‌های سطح ۳ که دارای محصولات با کیفیت‌تری نسبت به نسخه‌های قبلی می‌باشد؛ منتشر شد. این نسخه از داده‌ها حاوی چندین نوع از محصولات مرتبط با آئروسول از جمله

نسبت‌های رنگی و دپلاریزاسیون حجمی می‌باشد. با استفاده از داده‌های سطح سوم، پیشرفت‌های قابل توجهی را در تمایز لایه‌های آئروسول 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 آئروسول‌ها (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 آئروسول‌ها است که دارای تنوع وسیعی در ترکیب و ابعاد هستند (Weinzierl et al. 2009, Mishchenko et al. 2007, Lenoble, Remer, and Tanré 2013). 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 آئروسول‌ها 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 ۱ 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) ارائه شده است.

جدول ۱- رزولوشن‌های افقی و عمودی مربوط به داده‌های سنجنده CALIPSO.

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

قطر ردپای CALIPSO برابر با 70 متر به فاصله‌ی ۳۳۵ متر از هم می‌باشد بنابراین داده‌ی سطح ۱ دارای رزولوشن (قدرت تفکیک) افقی ۳۳۳ متر و رزولوشن افقی ۳۰ متر برای ارتفاعات بین 0.5 Km- الی 8.2 Km می‌باشد. داده‌ی سطح ۲ (Level 2) بازیابی شده از داده‌ی سطح ۱ دارای رزولوشن افقی پایین‌تری نسبت به متوسط رزولوشن‌های افقی و رزولوشن عمودی آن، 60 متر برای ارتفاعات بین 0.5 Km- الی 8.2 Km می‌باشد. برای پروفیل آئروسول 5 کیلومتری بین ارتفاعات 20 Km تا 30 Km رزولوشن عمودی برابر با 180 متر می‌باشد.

۲- تجربیات گذشتگان و روش‌های مرتبط

آنالیزهای انجام شده توسط محققین و پژوهشگران در طول سال‌های گذشته با استفاده از نسل اول داده‌های CALIOP به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. عمده تحقیقات صورت گرفته در این رابطه برای منابع عمده 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 ۲- 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)	Asian dust 5-15 May 2007	- Total extinction coefficients - Particulate depolarization ratio - (δ_p)
(Huang et al. 2008)	Taklimakan dust 26-31 July 2006	- MAB (β'_{532}) - VDR - Dust AOD - Dust aerosol extinction coefficient - Averaged vertical profiles of the dust extinction coefficient
(Kim et al. 2008)	Asian dust 14,30 Sep, 24 Oct, 25 Nov 2006, 12 Jan, 21 Feb 2007	- Apparent scattering ratio at 532 nm - Vertical profiles of aerosol extinction coefficient at 532 nm - Backscatter-to-extinction ratio (lidarratio)
(Liu, Liu, et al. 2008)	Tibetan dust Spring in 2007	- MAB (β'_{532}) - VDR - Backscatter Color Ratio (χ')
African Dust		
(Generoso et al. 2008)	Saharan dust 30 June-6 July 2006, 13-17 February 2007	- Attenuated backscatter profiles at 532 nm - Time series of attenuated backscatter profiles at 532 nm (From August 2006 to February 2007)
(Liu et al. 2010)	North Africa (12°-30°N; 30°W-35°E) / June 2006- December 2008	- Effective Lidar Ratio (ELR) - Multiple scattering factor

۳- تئوری کار پردازش اطلاعات

به طور معمول پردازش داده‌های لیدار شامل ۲ سطح (سطح ۱ و ۲) می‌باشد (Winker et al. 2006). سطح ۱ مربوط به کالیبراسیون و زمین مرجع نمودن داده‌های پس‌پراکنشی لیدار بوده و پروفیل‌های ارتفاعی ضرایب پراکنش بازگشتی تضعیف‌شده در نهایت در داده‌های سطح ۱ (1B)، CALIOP ارائه می‌شوند. سپس این داده‌ها در پردازش سطح ۲ برای بازیابی خواص نوری و فیزیکی ابرها و آئروسول‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Powell et al. 2009, Hostetler et al. 2006).

پردازش سطح ۲ شامل سه ماژول اصلی SIBYL^۵، SCA^۶ و HERA^۷ می‌باشد. ابتدا الگوریتم آشکارساز لایه (SIBYL) عوارضی از قبیل ابرها، آئروسول‌ها، سطوح، زیرسطوح و لایه‌های اتمسفریک را تجسس نموده و مناطق دارای تغییرات سیگنال بالا در پروفیل‌های پس‌پراکنشی تضعیف‌شده را با استفاده از داده‌های سطح ۱، آشکار می‌نماید (Vaughan et al. 2009). بعد از تشخیص عوارض شاخص‌های MAB^۸ برای طول‌موج‌های 532 و 1064 نانومتر، نسبت رنگی کلی تضعیف‌شده (TCR^۹) و نسبت دپلاریزاسیون حجمی (VDR^{۱۰}) 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 ۲ ارائه می‌شود. سپس هر عارضه براساس خواص نوری و فیزیکی خود با استفاده از ماژول SCA، کلاس‌بندی می‌شود (Liu et al. 2005). 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، آئروسول و غیره) است (Young and Vaughan 2009). بازیابی دقیق لایه‌ی مربوط به خواص نوری (با استفاده از ماژول HERA)، شدیداً به انتخاب مناسب نسبت لیدار در بخش طبقه‌بندی صحنه وابسته است.

^۵ SIBYL - Selective Iterated Boundary Locator

^۶ SCA - Scene Classification Algorithms

^۷ HERA - Hybrid Extinction Retrieval Algorithms

^۸ MAB – Mean Attenuated Backscatter

^۹ TCR – Total Color Ratio

^{۱۰} VDR – Volume Depolarization Ratio

هسته‌ی اصلی طبقه‌بندی ابر و آئروسول، براساس تابع چگالی احتمال چندبعدی ابرها و آئروسول‌ها عمل می‌کند (Liu et al. 2004). به طور عمده تمایز ابر و آئروسول براساس تفاوت‌های موجود در خواص فیزیکی و نوری این ذرات انجام می‌گیرد. رابطه (۱) تابع چگالی احتمال مورد استفاده در الگوریتم را نشان می‌دهد (Liu et al. 2004).

$$f_{mD}(X_1, X_2, \dots, X_m) = \frac{P_c(X_1, X_2, \dots, X_m) - P_a(X_1, X_2, \dots, X_m)k}{P_c(X_1, X_2, \dots, X_m) + P_a(X_1, X_2, \dots, X_m)k} \quad (1)$$

که P_a و P_c به ترتیب تابع چگالی احتمال ابر و آئروسول، برای ابعاد (X_1, X_2, \dots, X_m) می‌باشد. k فاکتور مقیاس مربوط به لایه‌های آئروسول 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 (X_1, X_2, \dots, X_m) شامل اندازه‌گیری‌های لیدار از جمله: شدت پراکنش، نسبت دپلاریزاسیون و یا پارامترهای اضافی (نظیر: دما، فشار، موقعیت و غیره) می‌باشد (خواص نوری و فیزیکی). f تابع احتمال دیفرانسیلی نرمالیزه شده با مقداری بین -1 و +1 می‌باشد که در الگوریتم سطح ۲ و ۳ CALIOP، به صورت مقادیر درصدی صحیح بین 100- تا 100+ (به عنوان امتیازات ویژه CAD) برای هر عارضه ارائه می‌شود. شناسایی هریک از عوارض ابری و آئروسولی براساس امتیاز اختصاصی برای هر عارضه، با توجه به شرایط زیر انجام می‌شود.

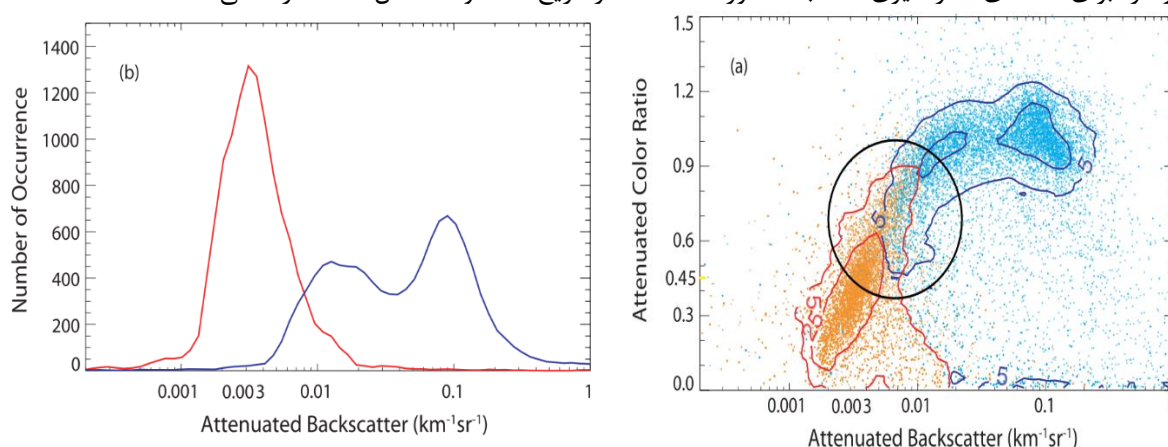
الف- $f > 0$ ؛ تابع احتمال ابر بزرگتر از تابع احتمال آئروسول بوده و عارضه به عنوان ابر کلاس‌بندی می‌شود. ب- $f < 0$ ؛ تابع احتمال ابر کوچکتر از تابع احتمال آئروسول بوده و عارضه به عنوان آئروسول کلاس‌بندی می‌شود. ج- $f = 0$ ؛ احتمال ابر و آئروسول بودن عارضه یکسان بوده و بنابراین نوع عارضه، نامشخص می‌باشد.

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 دهنده اطمینان کامل و مقادیر مطلق کوچکتر از 100 مربوط به نواحی مبهم ابری و آئروسولی 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 آئروسول می‌باشد؛ به طوریکه با کوچکتر شدن ناحیه هم‌پوشانی تمایز این ذرات کامل‌تر و در نتیجه عملکرد 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, 2010). 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 (χ) در دسترس نبوده و به همین جهت با پارامتر فرعی آن (یعنی نسبت رنگی تضعیف‌شده (χ')) جایگزین می‌شود. ابعاد تابع چگالی احتمال برای نسخه اول و دوم، شامل ۲ و ۳ بعد $(\beta', \text{TCR}, \chi)$ و ارتفاع مرکز لایه (Z)، بوده که با اضافه شدن ۲ شاخص VDR (δ') و عرض جغرافیایی (Lat)؛ نسخه سوم، ۵ بعدی الگوریتم تمایز ابر و آئروسول حاصل می‌شود (Liu et al. 2004, 2010).

۳-۱. الگوریتم CAD V.2

در این بخش تئوری اساسی الگوریتم CAD لیدار CALIPSO بررسی شده و توسعه‌های الگوریتمی وارده به نسخه‌ی ۲ 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)، 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 طبقه‌بندی می‌شوند. آنالیز داده‌های July سال ۲۰۰۶ نشان می‌دهد که طبقه‌بندی اشتباه لایه‌های گردوغبار و دود به عنوان ابر، برای درصد کمتری از ابرهای استراتوسفریک و آئروسول‌ها رخ داده است که البته لایه‌های دود به نسبت لایه‌های گرد و غبار کمتر دچار طبقه‌بندی اشتباه شده است. همچنین ابرهای نازک مرئی در مناطق قطبی نیز می‌توانند اشتباهاً به عنوان گرد و غبار طبقه‌بندی شوند. اما در کل میزان این نوع از اشتباهات در مقایسه با طبقه‌بندی اشتباه آئروسول‌ها به عنوان ابر بسیار کوچک می‌باشد. به همین دلیل در مطالعات مرتبط با آئروسول‌ها در مناطق قطبی و مرطوب همواره بایستی جانب احتیاط رعایت شود. Liu و همکاران (2009) 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 ۳ بعدی (به صورت $20 \times 100 \times 100$) نمودند. شاخص β' به صورت یک تابع لگاریتمی دارای 100 المان بوده که از $\ln(\beta') = -12$ شروع و با قطعات 0.14 تابی افزایش می‌یابد. شاخص نسبت رنگی χ' دارای 100 المان بوده که از $\chi' = 0$ شروع و با قطعاتی با گام‌های 0.02 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 سخت-افزاری 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 آئروسول و لایه‌های موجود در زیر ابرهای متراکم به هنگام آشکارسازی با مشکل مواجه می‌شوند. شکل ۲ نمایش پراکنش با خطوط منحنی میزان، برای ابر و آئروسول و توزیع وقوع پس‌پراکنش‌های تضعیف‌شده‌ی ابر با رنگ آبی و آئروسول با رنگ قرمز را در محدوده‌ی ارتفاعی صفر تا یک کیلومتر (برای داده‌های اندازه‌گیری شده با سنسور CALIOP در تاریخ 12 آگوست سال 2006) ارائه می‌دهد.



شکل ۲- (a) نمایش پراکنش با خطوط منحنی میزان برای ابر (رنگ آبی)، آئروسول (رنگ قرمز) و ناحیه هم‌پوشانی (رنگ مشکی). (b) توزیع وقوع ابرها (رنگ آبی) و آئروسول‌ها (رنگ قرمز).

ملاحظه می‌شود که آئروسول‌ها 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)، با استفاده از مجموعه نرم‌افزارهای ^{۱۱}OPAC (تهیه شده توسط Hess, Koepke و Schult (1998)) کلاس‌های ابر و آئروسول در فضای نسبت رنگی به طور گسترده‌ای از هم تفکیک می‌شوند. با وجود اینکه آئروسول‌ها دارای توزیع تک نمایی^{۱۲} متمرکز در نقطه‌ی $(0.003 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1})$ از محور پس‌پراکنش تضعیف‌شده بوده و در نقطه‌ی 0.45 از محور نسبت رنگی تضعیف‌شده متمرکز می‌باشند؛ ابرها دارای توزیع دونمایی^{۱۳} به ترتیب متمرکز در نقاط $(0.1 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1})$ ، $(0.01 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1})$ از محور پس‌پراکنش تضعیف‌شده

^{۱۱} OPAC – Optical Properties of Aerosols and Clouds

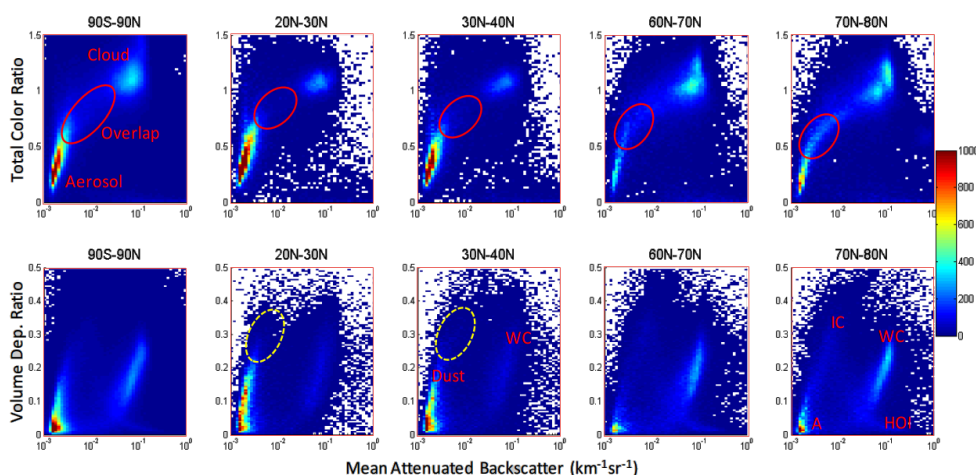
^{۱۲} Single-mode Distribution

^{۱۳} Bimodal Distribution

و متمرکز در نقاط 1, 0.95 از محور نسبت رنگی تضعیف شده می‌باشند. یک هم‌پوشانی عمده در ناحیه‌ی بین $(0.01 - 0.004 \text{ km}^{-1} \text{sr}^{-1})$ از محور پس‌پراکنش تضعیف شده و ناحیه‌ی بین 0.5 – 0.9 از محور پس‌پراکنش تضعیف شده مشاهده می‌شود که ممکن است حاوی لایه‌های گردوغبار و دود بوده در نتیجه امکان کلاس‌بندی اشتباه به دلیل هم‌پوشانی وجود دارد. آئروسول‌های گردوغبار به دلیل داشتن ابعاد بزرگتری از ذرات، دارای نسبت‌های رنگی تضعیف‌شده‌ی بالاتری در مقایسه با ابرها می‌باشند.

۲-۳. الگوریتم CAD V.3

به منظور استفاده از ورژن ۳ محصولات (الگوریتم سطح ۳) داده‌های لیدار CALIPSO یک الگوریتم ۵ بعدی تمایز ابر و آئروسول موسوم به CAD توسط Liu و همکاران (2010) ارائه داده شده است. عمده مزیت این تابع ۵ بعدی نسبت به تابع ۳ بعدی 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 ۳ بعدی اغلب به‌صورت اشتباهی به عنوان ابر کلاس‌بندی می‌شدند. با توجه به اینکه الگوریتم تمایز ابر و آئروسول (CAD) یک تابع چگالی احتمال (PDF) چندبعدی^{۱۴} مبتنی بر روش ارائه شده توسط Liu و همکاران (2004) است؛ تابع PDF مورد استفاده در داده‌های منتشر شده‌ی سطح ۲، از نوع ۳ بعدی بوده که شامل شاخص‌های MAB ، (β') ، TCR ، و (χ') و ارتفاع مرکز لایه (z) (که این توابع قبل از پرتاب سنجنده، بارگذاری می‌شوند) می‌باشد. موضوع مهم در رابطه با داده‌های سطح ۲ (ورژن ۲) 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 ۳ بعدی می‌باشد.



شکل ۳- توزیع ۲ بعدی وقوع عوارض به عنوان توابعی از پارامترهای $TCR-MAB$ (۵ 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 ۴ ماهه‌ی اندازه‌گیری شده (January, May, and August 2007, and January 2008).

نتایج حاصل از استفاده از تابع PDF ۵ بعدی در تمایز ابر و آئروسول نشان می‌دهد که لایه‌های گردوغبار غلیظ و دود از لایه ابری به خوبی تمیز شده است. در واقع عارضه‌ها به دلیل محدودیت فضای ۳ بعدی انتخاب شده، به طور عمده بین ۲ کلاس ابر و آئروسول تقسیم بندی می‌شوند. در نتیجه برای عملکرد بهتر در طبقه‌بندی بین کلاس‌های مختلف و در نهایت تمایز کامل‌تر ابر و آئروسول‌ها، به توسعه و افزایش ابعاد تابع چگالی احتمال نیاز است (Liu et al. 2004). به عنوان مثال شکل ۳ توزیع ۲ بعدی از

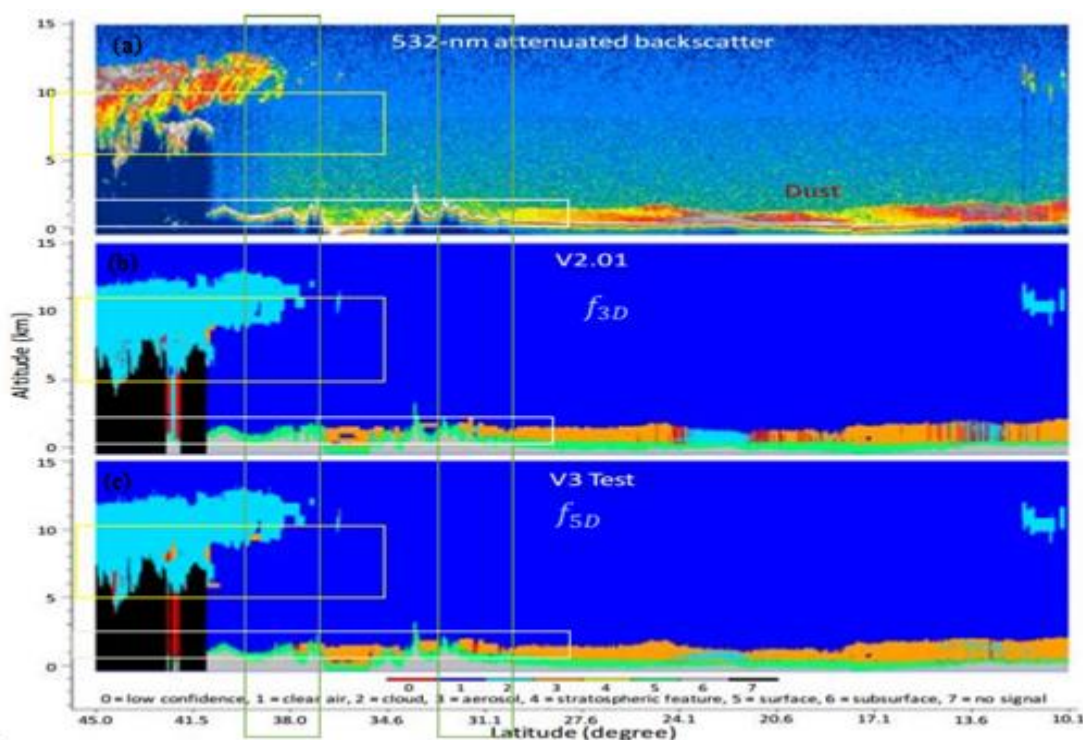
^{۱۴} Multi-Dimensional Probability Density Function (PDF)

وقوع عوارض برای ۴ ماه مجموعه داده، با استفاده از شاخص MAB بین عرض‌های جغرافیایی 90S تا 90N را برای محدوده‌ی ارتفاعی بین 2 تا 3 کیلومتر به وسیله‌ی شاخص‌های VDR و TCR نمایش می‌دهد.

ملاحظه می‌شود که در قسمت بالایی شکل ۳ آئروسول‌ها دارای مقادیر پایین TCR-MAB بوده، در حالیکه ابرها مقادیر بالای TCR-MAB را به خود اختصاص می‌دهند. البته با وجود هم‌پوشانی بین ابر و آئروسول 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 ۳ 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^{۱۵} و همچنین کریستال‌های یخی^{۱۶} که به هنگام استفاده از شاخص TCR قادر به آشکارسازی نبودند، تعیین موقعیت شدند. بیضی‌های موجود در شکل‌های بالایی نشان‌دهنده‌ی مناطق هم‌پوشانی ابر و آئروسول تابع PDF در فضای TCR-MAB می‌باشد و بیضی‌های خط‌چین در شکل‌های پایینی نشان-دهنده‌ی مناطقی با لایه‌های گردوغبار غلیظ در فضای VDR-MAB می‌باشد.

۴. بحث و بررسی

شکل ۴، نتایج حاصل از مجموعه داده‌ی ۴ ماهه با استفاده از تابع PDF-5D پیشرفت قابل توجهی را در تمایز ابر و آئروسول نشان می‌دهد.



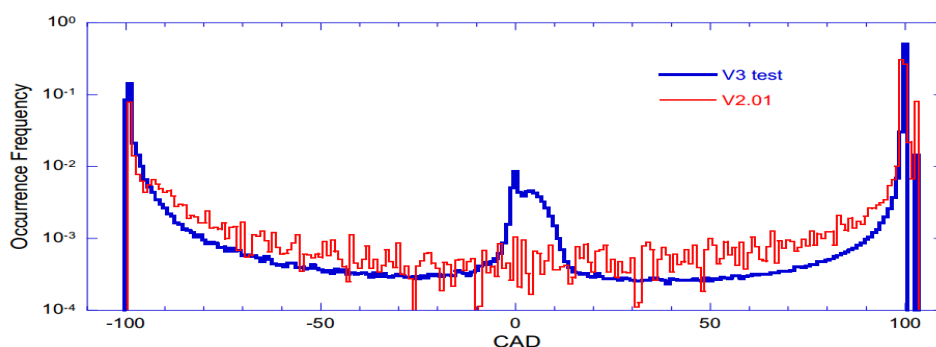
شکل ۴- تصویر پس‌پراکنش تضعیف‌شده در طول موج 532 nm (a)، VFM‌های حاصل از داده‌های نسخه‌ی ۲ (b) و نسخه‌ی ۳ (c) برای شمال آفریقا در طول گذر شبانه (آئروسول‌ها با کدبندی رنگ نارنجی ابرها با رنگ آبی روشن و عوارض با رنگ قرمز معرف عارضه‌هایی با امتیاز $|CAD| < 20$ تحت عنوان عوارض پوچ).

با مقایسه‌ی نتایج حاصل (VFM) از اجرای دو الگوریتم ۳ و ۵ بعدی در آشکارسازی لایه‌های گرد و غبار غلیظ (در عرض جغرافیایی ۳۱N واقع در ارتفاع کمتر از ۲ کیلومتری)، برای تنها یک عکس از منطقه شمال آفریقا (January 1, 2007) و با

^{۱۵} IC,WC – Ice and Water cloud

^{۱۶} HOI – Horizontally Oriented Ice

استفاده از نسخه ۳ الگوریتم CAD (مطابق شکل ۴)، صحت این مسئله تصدیق می‌شود. بخش‌های متراکم‌تر (غلیظ) لایه‌های گردو غبار، دارای مقادیر پس‌پراکنشی بالاتر نزدیک به مقادیر یافت شده (در ارتفاع بالای ۵ کیلومتری) در اطراف ابرهای سیروس واقع در عرض جغرافیایی 38N می‌باشد. در حالی که این مناطق با استفاده از الگوریتم نسخه 2 اشتباها 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 ۵ 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 آئروسول و ابر و اختصاص امتیازات کمتر از 20 ($|CAD| < 20$) برای اطمینان از کلاس‌بندی این عوارض می‌باشد. به عنوان مثال نوارهای قرمز موجود در تصویر پایینی واقع در شمال عرض- جغرافیایی 41N که به صورت 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 بیش‌از حد عمق نوری^{۱۷} باشد. در واقع بیشتر محصولات الگوریتم 5 بعدی با استفاده از عوارض دارای مقدار تقریباً $|CAD| > 20$ قابل استفاده بوده و مابقی عوارض با مقدار $|CAD| < 20$ که تقریباً تنها 0.01% از کل عوارض را شامل می‌شوند؛ بدون کلاس‌بندی با کد رنگی مشکلی به عنوان عوارض شناسایی نشده باقی می‌مانند. شکل ۵ هیستوگرام مربوط به فراوانی عوارض، با توجه به امتیازات کلاس‌بندی CAD، برای هر دو الگوریتم ۳ و ۵ بعدی تمایز ابر و آئروسول را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- هیستوگرام داده‌های حاصل از نسخه‌های ۲ (قرمز) و ۳ (آبی) الگوریتم CAD.

با توجه به شکل ۵، 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 ۳ نسبت به نسخه‌ی 2.01، به مراتب آسانتر می‌باشد. برآمدگی (توده^{۱۸}) 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 بیش‌از حد AOD)؛ به عوارض شناسایی نشده مربوط باشد (عوارض با کد رنگی مشکلی). نکته‌ی قابل تأمل 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 گردو غبار 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 اندازه‌گیری‌ها امری بدیهی می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است؛ پردازش نسخه‌ی 3 الگوریتم منجر به تولید تقریباً 14% درصد آئروسول بیشتر نسبت به نسخه‌ی قبلی می‌گردد. چرا که بیشتر لایه‌های ترکیبی از ابر و آئروسول به دلیل مشابه بودن خواص نوری آنها با ابر، به عنوان ابر شناسایی شده بودند در حالی که الگوریتم جدید عمدتاً در کلاس آئروسول قرار گرفتند. با توجه به استفاده از شاخص VDR، امتیازات 101 (ابر)، 102 (HOI) و 103 (ذرات بزرگ) از عوارض حذف و کاهش یافته است.

^{۱۷} Overestimated AOD

^{۱۸} Bump

پس می‌توان نتیجه گرفت که در پردازش V3 آئروسول‌های بیشتری نسبت به V2.01 در نواحی مرزی مرتبط با لایه‌های گردوغبار غلیظ و دود، تولید می‌شود.

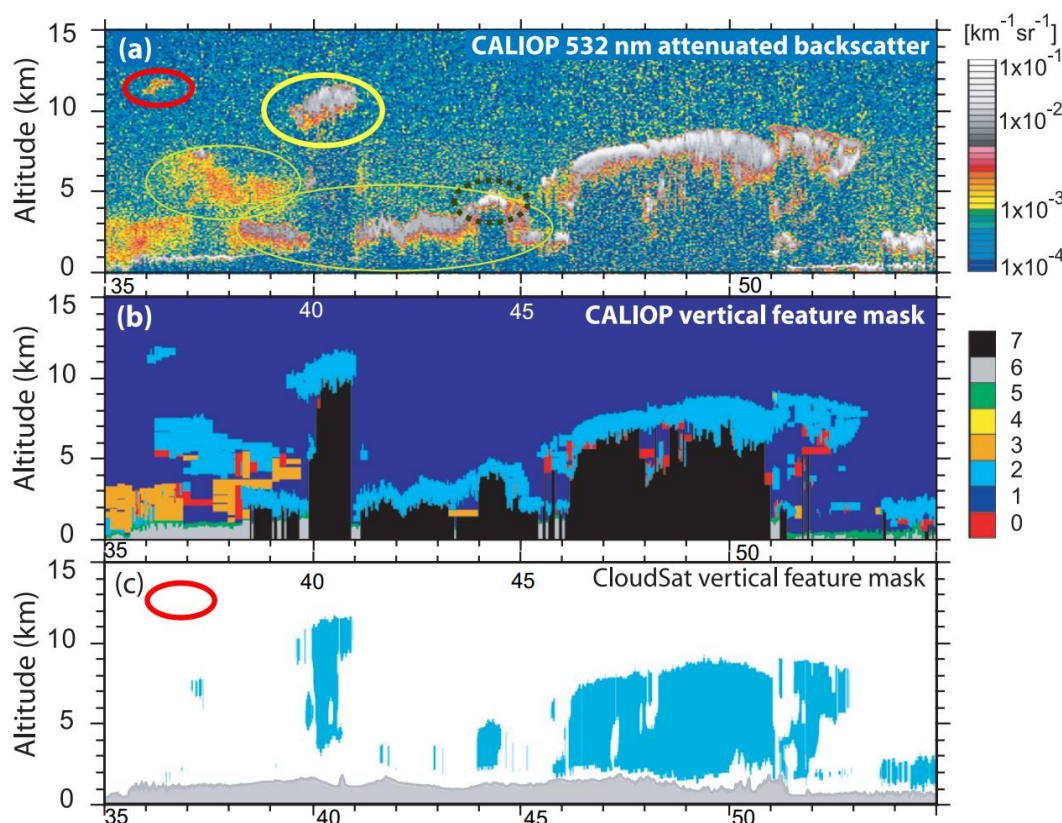
جدول ۳- تفاوت نتایج حاصل از نسخه‌های 2 و 3 الگوریتم CAD.

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

البته با وجود استفاده از تابع توزیع چگالی ۵ بعدی، وجود برخی هم‌پوشانی بین ابر و آئروسول 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 هم‌پوشانی‌های ظاهر شده، نیاز به توسعه‌ی الگوریتم نسخه ۳ 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 آئروسول امکان‌پذیر شود.

علی‌رغم افزایش دقت و صحت طبقه‌بندی الگوریتم CAD طی نسخه‌ی ۲ و ۳، هنوز هم چندین کلاس با فرکانس‌های متفاوت، به اشتباه طبقه‌بندی می‌شوند. شایع‌ترین آنها، گردوغبار بسیار غلیظ و آئروسول‌های 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 ۱ (داده‌های منتشر شده‌ی اولیه‌ی CALIOP) وقوع می‌یابد. اما با انتشار داده‌های سطح ۲ CALIOP، میزان طبقه‌بندی اشتباه لایه‌ها کاهش می‌یابد. در شکل ۶، نمونه‌ای از طبقه‌بندی اشتباه لایه‌های گردوغبار غلیظ برای منطقه‌ای واقع در شمال آفریقا، با استفاده از تابع PDF 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 ۲۰۰۷ 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). مشاهدات حاصل از CALIOP، وقوع این طوفان را با رنگ‌های زرد، نارنجی، قرمز و خاکستری برای شمال 46N و ارتفاعات کمتر از 8 Km (شکل ۶-ا) تأیید می‌کنند. اما رادار CloudSat که صرفاً به منظور کمک به شناسایی ابرهای ضخیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، به دلیل استفاده از طول موج بزرگتر (۳ میلی‌متر) (در مقایسه با طول موج مورد نیاز برای شناسایی ذرات گردوغبار (میکرومتر))؛ قادر به تشخیص توده‌های گردوغبار مطابق شکل ۶-ب نمی‌باشد. توده‌های گردوغبار غلیظ (متراکم) در ناحیه‌ی 38N-46N با رنگ خاکستری در شکل ۶-ا (موجود در ارتفاعات کمتر از 4 km)؛ حاوی تغییر ناگهانی سیگنال بوده که بایستی دارای عمق نوری بیش از ۳ باشد. این توده گردوغبار غلیظ (با استفاده از الگوریتم CAD)، به دلیل مشابه بودن خواص نوری مورد انتظار توده با ابر، اشتباهاً به عنوان لایه ابری کلاس‌بندی شده است (تصویر VFM شکل ۶-ب). 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 آئروسولی برخی توده‌ها پی برد. به عنوان نمونه توده‌ی گردوغبار موجود در ارتفاعات 11-12 km (در ناحیه‌ی 35.5N-37.5N در 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 ۶).

در هر حال بیشتر اشتباهات صورت گرفته در طبقه‌بندی به هنگام استفاده از نسخه‌ی ۲ الگوریتم CAD می‌باشد. اما با این حال لایه‌های متوسط آئروسول 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 به صورت صحیح کلاس‌بندی شده است.



شکل ۶- تصویر پس پراکنش تضعیف شده‌ی سنسور CALIOP در طول موج ۵۳۲ 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 طول موج‌های ۵۳۲ و ۱۰۶۴ 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 آئروسول‌ها ارائه نماید. به طور کلی آنالیزهای صورت گرفته نشان می‌دهد که نسخه‌ی نهایی (CAD V 3) الگوریتم، نتایج قابل‌اعتمادی را فراهم می‌نماید. از این رو 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.