

## بررسی ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات گرد و غبار و وابستگی‌های آن‌ها به کمک داده‌های AERONET

شیمیا بهرام وش شمس

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور، دانشگاه صنعتی نصیرالدین طوسی

علی محمدزاده

گروه سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۱۱

sh\_bahramvash@yahoo.com

### چکیده

افزایش وقوع پدیده‌های گرد و غباری لزوم تحقیقات در راستای شناسایی دقیق، پایش مداوم و مقابله با این پدیده را نشان می‌دهد. در کنار شناسایی ویژگی‌های شیمیایی، ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات گرد و غبار نیز اهمیت فراوانی دارد. شناسایی گرد و غبار و ویژگی‌های دقیق آن به وسیله سنجش از دور یک روش پیشرو و همچنان چالش برانگیز است که نیازمند اطلاعات از پیش تهیه‌شده‌ای از ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات گرد و غبار منطقه است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های سطح ۲ سنجنده AERONET که ماسک ابر و کنترل کیفیت شده هستند، پارامترهای ویژگی اپتیکی و اندازه ذرات ایران بررسی شده‌اند. در مجموع از ۴۶۹ داده روز مستقل مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ مربوط به سه ایستگاه AERONET موجود در منطقه برای انجام این مطالعه بهره گرفته شده است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از بررسی متغیرها در منطقه مطالعاتی که پس از جداسازی داده‌های غیر گرد و غباری صورت گرفته به شرح زیر است: بیش از ۵۰٪ گرد و غبارهای ثبت شده دارای عمق اپتیکی ۰/۴ تا ۰/۶ برای طول موج ۰/۴۴ میکرون بوده و هیچ داده‌ای مبنی بر عمق اپتیکی بالاتر از ۲/۵ ثبت نشده است، پارامترهای البدوی تفرق منفرد بین ۰/۹ تا ۰/۹۵، عدم تقارن در بازه ۰/۷۴ تا ۰/۷۱ برای طول موج ۰/۴۴ تا ۱/۰۲ میکرون بدست آمده‌اند که بیانگر وابستگی آن‌ها به طول موج است. مقدار  $1/52 \pm 0.03i$  برای پارامتر ضریب شکست بدست آمده است. نتایج نشان از وابستگی بین پارامترهای توزیع اندازه ذرات به عمق اپتیکی بوده است به همین دلیل تابعی بر این پارامترها بر اساس عمق اپتیکی برازش داده شده است. در نهایت کلیه نتایج این مطالعه با تحقیق جهانی و داخلی انجام گرفته در همین راستا ارزیابی شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** گرد و غبار، ویژگی‌های اپتیکی، اندازه ذرات، AERONET

### مقدمه

در مناطق مختلف کره‌ی زمین افزایش یافته است (Goudie, 2009). در طی سال‌های اخیر وقوع گرد و غبارها در ایران به شدت افزایش یافته است. در تایید این موضوع می‌توان به تحقیق (Zarasvandi et al., 2011) اشاره کرد. در مطالعه ذکر شده، پژوهشی در باب توزیع مکانی و زمانی گرد و غبارهای ثبت شده در استان خوزستان در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۹ انجام گرفته است که حاکی از وقوع به طور متوسط ۴۷ روز گرد و غباری در طول سال، روند افزایشی آن با نرخ دو روز در سال است. به دنبال افزایش تعداد طوفان‌های گرد و غباری، خسارات ناشی از آنها به ویژه بیماری‌های قلبی و ریوی افزایش یافته‌اند. از این رو مهار این پدیده از الزامات کشور ما به حساب می‌آید. به عنوان مثال در شهر سیستان در فاصله سپتامبر ۲۰۱۰ تا جولای ۲۰۱۱، ۹۰٪ روزها اندکس کیفیت هوای خطرناک یا بسیار خطرناک داشته‌اند که به دلیل گرد و غبارهای نشأت گرفته از دریاچه خشک شده هامون بوده است (Rashki et al., 2012).

در کنار روش‌های مقابله با این پدیده نیاز به روش‌های شناسایی دقیق و پایش مداوم آن نیز روز به روز افزایش می‌یابد تا به این وسیله اطلاعات دقیق از گرد و غبارها و ویژگی‌های آن‌ها در مناطق مختلف در هر طوفان را فراهم کند و هم به عنوان سیستم پایش تاثیر راهکارهای مختلف در مقابله با این پدیده را ثبت و بررسی کند. تحقیقات ارزشمندی در راستای ترکیبات شیمیایی و معدنی گرد و غبار در ایران انجام گرفته است. این بررسی هم در نواحی غربی کشور که گرد و غبار عمدتاً منشأ خارج از ایران دارند (Zarasvandi et al., 2011) و هم در شرق ایران که منبع داخلی عامل اصلی است (Rashki et al., 2013) صورت گرفته است.

حیات در کره‌ی زمین متأثر از فرآیندهای فراوانی است. یکی از این فرآیندها، چرخه‌ی گرد و غباری است که با چرخه‌ی آب، کربن و انرژی نیز به شدت مرتبط است (Shao et al., 2011). برای ارائه تعریف دقیقی از پدیده-ی گرد و غبار با استناد به پروتوکول سازمان جهانی هواشناسی WMO بر اساس میزان دید، گرد و غبارها به ۴ دسته تقسیم می‌شوند (Shao and Dong, 2006): حالت تعلیق (گسترش آن در حالت تعلیق است، قابلیت دید کمتر از ۱۰ کیلومتر)، در حال وزیدن (کاهش قابلیت دید از ۱ تا ۱۰ کیلومتر)، طوفان گرد و غبار (کاهش قابلیت دید از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر)، طوفان شدید گرد و غبار (وزش شدید باد به همراه ذرات بزرگ گرد و غبار کاهش قابلیت دید کمتر از ۲۰۰ متر). در بحث مطالعه تاثیرات اتمسفری بار گرد و غبار، این اثرات به دو گروه تقسیم می‌شوند: اثرات مستقیم که به دلیل جذب یا پراکنش و تفرق پرتوهای خورشیدی صورت می‌گیرند و اثرات غیر مستقیم که به دلیل تغییر شکل ابرها اتفاق می‌افتند. طوفان‌های گرد و غباری عمدتاً مسیرهای طولانی را طی می‌کنند و در طی مسیرشان با عبور از روی مناطق مختلف خاک‌ها، نمک‌ها، گوده‌های شیمیایی و غیره را با خود حمل می‌کنند بنابراین در مرحله رسوب گذاری می‌توانند روی خاک و خصوصیات مختلف آن اثر گذار بوده و حتی در اکوسیستم‌ها نیز تغییراتی ایجاد کنند (Goudie, 2009).

ایران به دلیل قرار گرفتن در مرکز کمربند گرد و غبار و هم‌جواری با منابع بزرگ گرد و غباری مانند عراق و سوریه و عربستان همواره در معرض وقوع این پدیده بوده است (Prospero et al., 2002). به دلیل بروز خشک سالی‌های متعدد و دخالت‌های بی‌رویه بشر در سال‌های اخیر، رشد بیابان زایی

بنابراین اگر گرد و غبار شکل گرفته در این منطقه در تاریخ فوق همراه با این باده‌ها به داخل ایران انتقال پیدا کند. آنالیز تاریخ‌های دیگر گرد و غبارهای ایران نیز نتایج مشابه دارند. بنابراین عراق و سوریه مکان بسیار مناسبی برای انتخاب ایستگاه‌های AERONET می‌باشد اما متأسفانه در این دو کشور هیچ ایستگاهی وجود ندارد. همان‌طور که در (شکل ۱) نشان می‌دهد در تاریخ‌های دیگر نیز تایید می‌شود، از ترکیه نیز بادی به سمت نواحی غربی ایران وزیده نمی‌شود. بنابراین استفاده از ایستگاه واقع در غرب ترکیه کمکی به شناسایی ویژگی‌های گرد و غبار منطقه نمی‌کند. کشور کویت نیز از نظر منشا، دقیقاً با غرب ایران تشابه دارد. و می‌تواند کمبود داده منطقه را تا حدی جبران کند. ایستگاه‌های AERONET استفاده شده در این مطالعه سه ایستگاه به شرح زیر هستند: ایستگاه IASBS در داخل ایران و شهر زنجان که سال ۲۰۰۹ شروع به کار کرده است و در مجموع ۴۶۷ روز داده سطح ۲ جمع‌آوری کرده است، ایستگاه‌های واقع در دانشگاه و فرودگاه کویت است. (شکل ۲ و (جدول ۱) به ترتیب موقعیت و اطلاعات داده‌های این ایستگاه‌ها نشان می‌دهند. پارامترهایی که برای بررسی و شناخت ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات به کار می‌روند به شرح زیر می‌باشند (Dubovik et al., 2001): پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های اپتیکی موسوم به عمق اپتیکی، البدوی تفرق منفرد و ضریب شکست و پارامترهای اندازه ذرات مانند توان آنگسترم، پارمتر عدم تقارن، حجم تراکم کلی و ذرات زبر (شعاع بزرگ‌تر از  $0.16$  میکرون موسوم به coarse) و ذرات نرم (شعاع کوچک‌تر از  $0.16$  میکرون و موسوم به fine)، شعاع موثر کلی و ذرات زبر و نرم. در قسمت‌های بعدی به تفضیل در مورد هر یک از پارامترها بحث خواهد شد. با توجه به این که هدف این تحقیق برآوردی از خصوصیات اپتیکی و اندازه ذرات گرد و غبار در منطقه است تمهیداتی برای بهینه‌سازی آنالیزها و انتخاب داده‌های مناسب صورت گرفته است. در کنار استفاده از اندازه‌گیری‌هایی که شامل تمام پارامترها باشند (ستون پنجم از جدول ۱) راهکاری برای جداسازی اندازه‌گیری‌های غیر گرد و غباری در بین داده استفاده شده است (این امر به ویژه برای ایستگاه IASBS که در شهر زنجان واقع است اهمیت پیدا می‌کند چرا که این منطقه در معرض هواویزهای دیگر نیز قرار دارد). در این راستا با آنالیز مطالعات پیشین (Dubovik et al., 2001) مشخصه‌ای مهم، به عنوان شاخص جداسازی در نظر گرفته شده است: مهم‌ترین و بارزترین پارامتر ذرات گرد و غبار، نسبت حجم تراکم ذرات زبر به ریز است که تنها در این نوع ذرات عدد بزرگی را حاصل می‌کند. دلیل این امر درشت بودن نسبی ذرات گرد و غبار نسبت به هواویزهای دیگر است. به این ترتیب در باقی هواویزها مانند آلودگی هوا و دود ناشی از سوخت زیست توده، این پارامتر عمدتاً کمتر از یک است. در این مطالعه آستانه ۲ برای شناسایی ذرات گرد و غبار در نظر گرفته شده است. به این ترتیب تنها داده‌هایی به آنالیزها وارد شده‌اند که این آستانه را ارضا کرده باشند. در نهایت برای جلوگیری از تاثیر افزودگی داده در یک روز روی برآوردها، میانگین گیری روزانه از داده‌های دارای شرایط فوق صورت گرفته است (ستون ششم از جدول ۱) تا به این ترتیب تخمین‌هایی بهینه‌تر و دقیق‌تر بدست آید. در (شکل ۳) فلوجارت کلیه مراحل تحقیق نشان داده شده است.

#### بحث

#### عمق اپتیکی

این پارامتر شاخص تعیین شفافیت است. بر اساس نسبت رادیانسی که در طول مسیر جذب یا تفرق پیدا نکرده است، به مقدار رادیانس ابتدای مسیر تعریف می‌شود:

$$I/I_0 = e^{-\tau}$$

رابطه ۱

در کنار شناسایی ویژگی‌های شیمیایی و معدنی، خصوصیات اپتیکی و بررسی آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. به‌علاوه تعیین دقیق این ویژگی‌ها سبب بازیابی هرچه دقیق‌تر شدت گرد و غبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌گردد (Kaufman et al., 1997). بدیهی است که تعیین شدت، یکی از مهم‌ترین المان‌ها در تعیین خسارات ناشی از گرد و غبار اعم از سلامت، محیط زیست و غیره است میزان انرژی که در اثر وقوع گرد و غبار جذب یا تفرق می‌یابد است. این انرژی موجب تغییرات در نیروی تابشی کره زمین و به دنبال آن آب و هوا می‌شود و ویژگی‌های اپتیکی ذرات وابسته است. در سال‌های اخیر روش‌های سنجش از دوری، همواره در زمینه‌های شناسایی گرد و غبار (Ackerman, 1997) و پیدا کردن منابع و سرچشمه‌های گرد و غبار (Prospero et al., 2002) استفاده شده‌اند. اما یکی از اساسی‌ترین کاربردهای آنها بحث چالش برانگیز بازیابی شدت و عمق اپتیکی به وسیله تصاویر ماهواره‌ای است، این بازیابی‌ها نیازمند اطلاعات دقیق ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات است. هدف ما در این تحقیق علاوه بر برآورد این پارامترها، بررسی وابستگی‌های آن‌ها برای شناختی دقیق‌تر است.

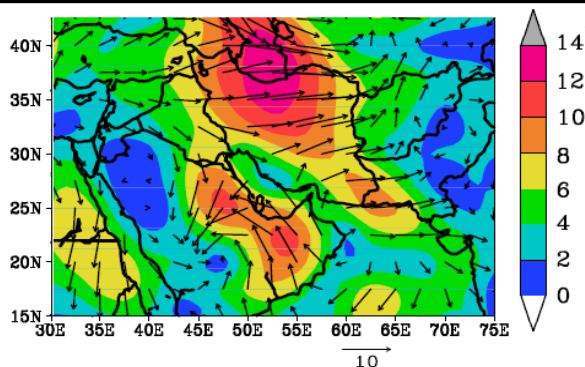
#### روش کار

به دنبال انتخاب سنجنده مناسب به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای آنالیز ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات، مروری بر تحقیقات جهانی در این زمینه انجام گرفته است تا داده‌ها را از بهترین سنجنده موجود اتخاذ و دقیق‌ترین و صحیح‌ترین آنالیزها انجام گیرد. در همین راستا با توجه به مطالعات ارزشمندی همچون (Dubovik et al., 2001) روی ویژگی‌های اپتیکی و جذبی هواویزها در سطح جهانی (Levy et al., 2009)، AERONET (Aerosol Robotic NET Work) به عنوان داده‌ی منتخب برای برآورد پارامترهای مورد نظر انتخاب شده است. AERONET یک سنجنده زمینی است که برای پایش هواویزها طراحی شده است. نحوه عملکرد آن بر اساس اندازه‌گیری مستقیم رادیانس طیفی آسمان است که با استفاده از مدل‌های معکوس انتقال تابشی، ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات هواویزها را محاسبه و فراهم می‌کند.

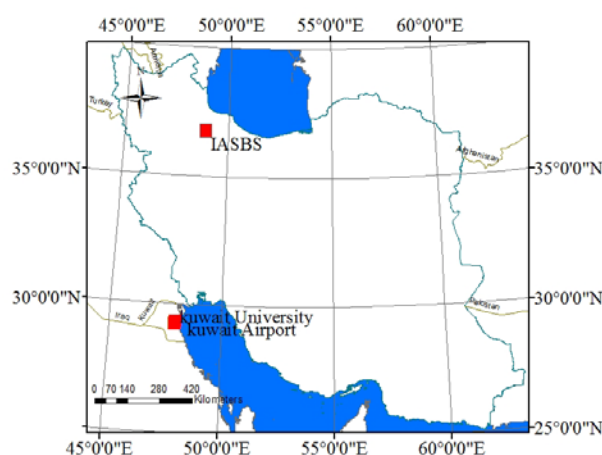
این سنجنده رادیانس‌های ۸ باند در محدوده‌ی مرئی و مادون قرمز نزدیک ( $0.47$  تا  $1.64$  میکرون) را اندازه‌گیری می‌کند (Holben et al., 1998). به دلایل مختلفی ممکن است در اندازه‌گیری‌ها خطا ایجاد شود از این رو یک سطح از داده‌های این سنجنده موسوم به سطح ۲ وجود دارد که کنترل کیفیت و ماسک ابر شده هستند. تقریباً در تمام مطالعاتی که از داده AERONET برای بدست آوردن ویژگی‌ها و یا ارزیابی روش‌های دیگر استفاده شده، از این داده بهره برده‌اند.

در این تحقیق نیز این سطح از داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در راستای انتخاب ایستگاه‌های مناسب برای بررسی ویژگی اپتیکی و اندازه ذرات منطقه باید منابع گرد و غباری و مسیر حرکت آنها مشخص و تا حد ممکن ایستگاه‌ها در این مناطق انتخاب شوند. از آنجایی که عامل اصلی انتقال گرد و غبار باد است، نقشه باد در روزهای گرد و غباری اطلاعات مناسبی را فراهم می‌کند. در (شکل ۱) نقشه باد در تاریخ ۱۳ آوریل ۲۰۱۱ نشان داده شده است. در این شکل سرعت باد بصورت پهنه‌ای و جهت باد با بردار نشان داده شده است.

در تاریخ فوق گرد و غبار گسترده‌ای وارد ایران شده و این روند در روزهای بعد از آن نیز ادامه داشته است. همان‌طور که بر روی نقشه نیز مشخص می‌باشد بادهای ورودی به ایران از سمت غرب (مناطق منشاء ریزگرد برای ایران) با دو جهت غربی - شرقی و شمال غرب - جنوب شرق هستند. همچنین این بادهای از روی هسته‌های سرعت شکل گرفته در کشور سوریه و عراق منشاء می‌گیرند.



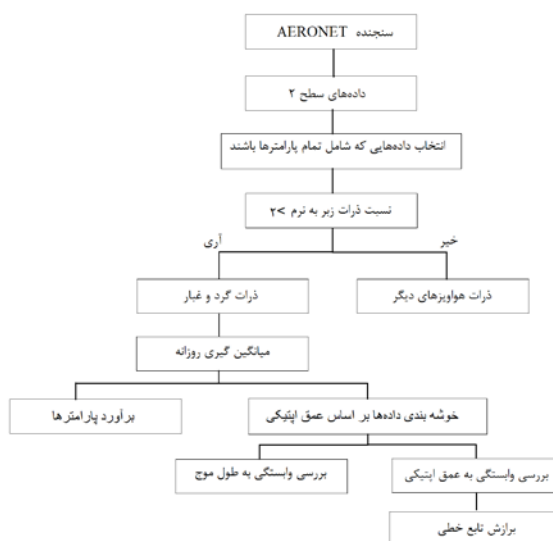
شکل ۱. نقشه جهت و شدت باد منطقه در ۱۳ آوریل ۲۰۱۱



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های AERONET استفاده شده در این تحقیق

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه‌های AERONET استفاده شده در این تحقیق

نام ایستگاه	کشور	تاریخ فعالیت	تعداد کل روزهای شامل داده سطح ۲	تعداد داده‌های سطح ۲ کامل	تعداد داده‌های روزهای مستقل
IASBS	ایران	۲۰۰۹ تا اکنون	۴۶۷	۹۳	۴۰
Kuwait_Airport	کویت	۲۰۰۹_۲۰۰۹	۲۳	۴۶	۱۲
Kuwait_University	کویت	۲۰۱۲_۲۰۰۱	۵۴۵	۱۲۲۲	۳۱۷
مجموع			۱۰۲۵	۱۳۶۱	۴۶۹



شکل ۳. فلوچارت مراحل تحقیق

در روابط ۲ و ۳  $T_{abs}$  و  $T_{set}$  به ترتیب عمق اپتیکی جذب و عمق اپتیکی تفرق و  $\omega_0$  البدوی تفرق منفرد هستند. همان طور که از روابط بالا مشخص است این پارامتر رابطه عکس با میزان جذب هواویز دارد.

نتایج حاکی از افزایش میزان البدوی تفرق منفرد گرد و غبار با افزایش طول موج است. از نقطه نظر ترکیب معدنی موجود در گرد و غبار مقدار جذب گرد و غبار به واسطه میزان حضور اکسید آهن تعیین می‌شود و یا نحوه ترکیب اکسید آهن با کوارتز یا رس در میزان جذب بسیار اثر گذار است (Dubovik et al., 2001). در (شکل ۴) روند افزایشی البدوی تفرق منفرد در هر دو ایستگاه Kuwait university (واقع در کویت) و IASBS (واقع در ایران) با افزایش طول موج نشان داده شده است.

### ضریب شکست

ضریب شکست به صورت عدد مختلط بیان می‌شود. قسمت حقیقی آن سرعت نور در ماده را نشان می‌دهد که با اندازه ذرات و قدرت تفرق آن‌ها رابطه دارد و قسمت موهومی آن تابع مقدار جذب نور در ماده است (King et al., 2003). از این رو است که مقدار البدوی تفرق منفرد در رابطه با ضریب شکست است چرا که هر دو بر اساس میزان تفرق و جذب بدست می‌آیند.

در آنالیزها این متغییر وابستگی خاصی با طول موج و عمق اپتیکی نداشتند هر چند قسمت حقیقی به مقدار جزئی با افزایش عمق اپتیکی افزایش می‌یافت اما دلیل این امر اختلاف بین فرض ذرات کروی مدل‌های انتقال تابشی استفاده شده در برآورد ویژگی‌ها و بی قاعده بودن شکل ذرات گرد و غبارها است این امر در تحقیقات دیگر نیز تایید شده است (Dubovik et al., 2001). بنابراین هر دو قسمت این متغییر معمولاً به صورت اعدادی ثابت برای هر منطقه بیان می‌شوند. در تحقیقات مختلف در نقاط گوناگون ۱/۴۸ تا ۱/۵۶ برای مقدار حقیقی بدست آمده، نتایج داده‌های منطقه مورد مطالعه مقدار ۱/۵۲ برای مقدار حقیقی و ۰/۰۳ برای مقدار موهومی حاصل کرده است.

### پارامتر عدم تقارن

در بخش‌های قبل توضیح داده شد که عمق اپتیکی به دو قسمت عمق اپتیکی ناشی از جذب و تفرق تفکیک می‌شود. پارامتر عدم تقارن اطلاعات بیشتری در مورد قسمت تفرق آن در اختیار قرار می‌دهد. به این معنی که با استفاده از میانگین وزن دار کسینوس زاویه تفرق، جهت تفرق پرتو در برخورد با ذره هواویز را تعیین می‌کند (Andrews et al., 2006). این پارامتر در بازه بین ۱- تا ۱ تعریف می‌شود و تفسیر آن به این صورت است که اگر عمده تفرق به سمت جلو باشد این متغییر به سمت یک میل می‌کند و مقدار ۱- و ۰ آن به ترتیب به معنای عمده تفرق به سمت عقب و تفرق یکسان در تمام جهات است. نتایج آنالیزها نشان از وابستگی بین پارامتر عدم تقارن و طول موج است که این رابطه به صورت معکوس است یعنی با افزایش طول موج شاهد کاهش مقدار پارامتر عدم تقارن هستیم. البته این کاهش در طیف مرئی با شدت بیشتری صورت می‌گیرد در مادون قرمز نزدیک کند و متوقف می‌شود. این نتیجه مؤید نتایج تحقیقات مشابه در مناطق دیگر است (Dubovik et al., 2001). در (شکل ۵) روند وابستگی پارامتر عدم تقارن به طول موج در هر دو ایستگاه در تمام گروه‌های عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون مشاهده می‌شود. (جدول ۴)

در رابطه ۱ رادیانس عبوری که تفرق و جذب پیدا نکرده  $I_0$  رادیانس اولیه و  $I$  نمایانگر عمق اپتیکی است. این پارامتر واحد ندارد. در بحث عمق اپتیکی اتمسفری که در این جا نیز مدنظر است عمق اپتیکی براساس رادیانس تفرق و جذب نیافته‌ای که فاصله عمود سطح زمین تا فضای خارج جو پیموده است بیان می‌شود و به این ترتیب برای محاسبه عمق اپتیکی همواره باید فاصله عمودی را در نظر گرفت و از قانون Beer-Lambert-Bouguer برای محاسبه آن استفاده می‌شود (Holben et al., 1998). در سنجنده AERONET داده عمق اپتیکی در ۵ طول موج ۰/۴۴، ۰/۵، ۰/۶۷۵، ۰/۸۷، ۱/۰۲ میکرون ارائه می‌شود.

در بحث عمق اپتیکی با عدم حضور عمق اپتیکی ۰/۵ میکرون در داده‌های ایستگاه IASBS مواجه بودیم که به دلیل این که این ایستگاه تنها ایستگاه واقع در خاک ایران است حذف آن ممکن نبود. بنابراین با توجه به مقایسه عمق اپتیکی طول موج‌های دیگر در تاریخ‌های نزدیک در این ایستگاه و ایستگاه‌های کویت و شباهت بسیار زیاد آن‌ها، برای برآورد عمق اپتیکی گرد و غبارهای منطقه در این طول موج تنها از داده‌های ایستگاه‌های کویت استفاده شده است. در مجموع برای کلیه طول موج‌ها حد بیشینه عمق اپتیکی به طور متوسط بین ۱ و ۲ بوده و در موارد محدودی از ۲ فراتر رفته است در (جدول ۲) بازه عمق اپتیکی در طول موج‌های مختلف نشان داده شده است.

در اینجا برای بررسی وابستگی پارامتر نسبت به عمق اپتیکی، داده‌ها بر اساس طول موج ۰/۴۴ میکرون که در تمام ایستگاه‌ها وجود داشت (عدم وجود داده عمق اپتیکی ۰/۵ میکرون در ایستگاه IASBS) خوشه بندی شده‌اند (Levy et al., 2007). انتخاب این طول موج برای تحقیقات آینده در راستای فراهم کردن پارامترها پیش فرض روش‌های سنسجش از دوری است که از باند مرئی برای تعیین شدت گرد و غبار استفاده می‌کنند (Kaufman et al., 1997).

این روش‌ها عمدتاً روی سنجنده MODIS پیاده‌سازی می‌شوند. طول موج ۰/۴۴ میکرون به مرکز باند ۳ این سنجنده نزدیک است. خوشه بندی عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون در ۵ گروه (کمتر از ۰/۴، بین ۰/۴ و ۰/۶، بین ۰/۶ و ۰/۸، بین ۰/۸ و ۱ و در نهایت بالاتر از ۱) صورت گرفته است. نکته قابل توجه دیگر این است که در بحث مدل‌های انتقال تابشی، بازیابی ویژگی‌ها در شرایط عمق اپتیکی پایین عدم قطعیت بالایی وجود دارد. به همین دلیل داده‌های سطح ۲ AERONET به ندرت شامل این اندازه‌گیری‌ها هستند (Levy et al., 2007). در این مطالعه نیز برای اجتناب از وارد شدن این عدم قطعیت به آنالیزها، از گروه کمتر از ۰/۴ که تنها ۱٪ از مشاهدات را به خود اختصاص داده‌اند، استفاده نشده است.

در (جدول ۳) تعداد و درصد تعلق گرد و غبارهای ثبت شده توسط AERONET به هر گروه عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون مشاهده می‌شود.

### البدوی تفرق منفرد

این پارامتر که بر اساس نسبت جذب و تفرق تعریف می‌شود، در تعیین جاذب بودن یا نبودن هواویزها کمک می‌کند. از آنجایی که عمق اپتیکی از دو قسمت عمق اپتیکی ناشی از تفرق و عمق اپتیکی ناشی از جذب تشکیل شده است، نسبت عمق اپتیکی ناشی از تفرق به مجموع هر دو (موسوم به عمق اپتیکی انهدام یافته  $T_{ext}$ ) را البدوی تفرق منفرد می‌نامند (Hansen and Travis, 1974):

$$\tau_a = \tau_{ext} = \tau_{abs} + \tau_{sc}$$

رابطه ۲

$$\omega_0 = \tau_{sc} / \tau_{ext}$$

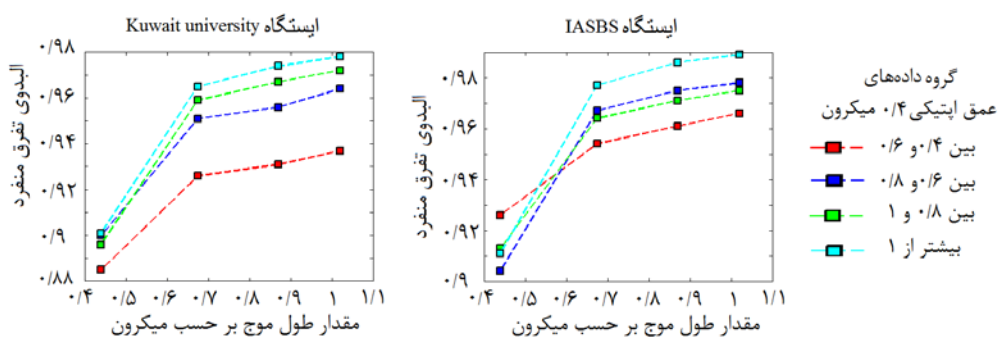
رابطه ۳

جدول ۲. بازه عمق اپتیکی‌های مشاهده شده در مجموع داده‌ها

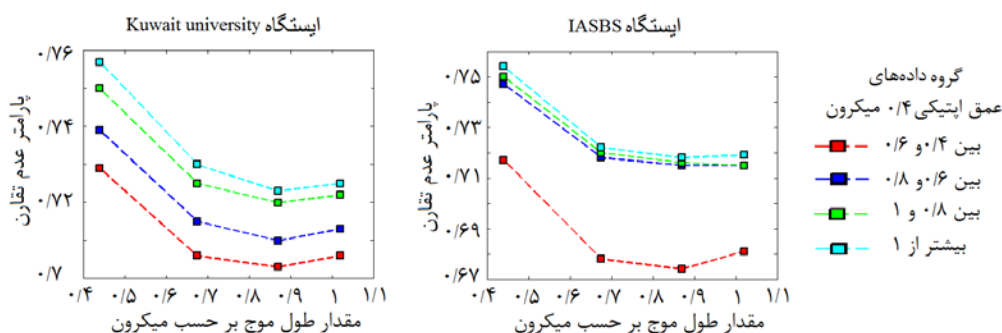
عمق اپتیکی	بازه مشاهدات
طول موج ۰/۴۴ میکرون	۲/۵_۰/۴
طول موج ۰/۵ میکرون	۲/۵_۰/۳
طول موج ۰/۶۷۵ میکرون	۲/۵_۰/۲
طول موج ۰/۸۷ میکرون	۲/۴_۰/۱۵
طول موج ۱/۰۲ میکرون	۲/۴_۰/۱

جدول ۳. گروه بندی داده‌های ایستگاه‌های AERONET استفاده شده در این تحقیق بر اساس عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون

مجموع	Kuwait University		Kuwait Airport		IASBS		بازه عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون
	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	
تعداد	۵	٪۱	۵	٪۲	۰	٪۰	کمتر از ۰/۴
تعداد	۱۹۶	٪۵۳	۱۶۰	٪۵۰	۳	٪۲۵	بین ۰/۶ و ۰/۴
تعداد	۶۷	٪۱۸	۵۹	٪۱۹	۳	٪۲۵	بین ۰/۸ و ۰/۶
تعداد	۴۶	٪۱۳	۴۳	٪۱۳	۲	٪۲۰	بین ۰/۸ و ۱
تعداد	۵۵	٪۱۵	۵۰	٪۱۶	۴	٪۳۰	بیشتر از ۱



شکل ۴. افزایش مقدار البدوی تفرق منفرد در گروه‌های مختلف عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون با افزایش طول موج



شکل ۵. کاهش مقدار پارامتر عدم تقارن در گروه‌های مختلف عمق اپتیکی ۰/۴۴ میکرون با افزایش طول موج

جدول ۴. مقدار میانگین و واریانس پارامتر عدم تقارن در کل داده‌ها

پارامتر عدم تقارن	مقدار میانگین و واریانس
طول موج ۰/۴۴ میکرون	$0.74 \pm 0.02$
طول موج ۰/۶۷۵ میکرون	$0.72 \pm 0.02$
طول موج ۰/۸۷ میکرون	$0.71 \pm 0.02$
طول موج ۱/۰۲ میکرون	$0.71 \pm 0.02$

## توان آنگسترم

این پارامتر رابطه بین عمق اپتیکی و طول موج را برقرار می‌کند و به صورت زیر بیان می‌شود (Eck et al., 1999):

$$\tau_a = \beta \lambda^\alpha \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴ نمدادهای  $\alpha$ ،  $\lambda$  و  $\tau_a$  معرف توان آنگسترم، طول موج و عمق اپتیکی مربوط به آن بوده و  $\beta$  ضریبی است که رابطه را برقرار می‌کند و برای طول موج ۱ میکرون برابر با عمق اپتیکی متناظر است. این پارامتر که برآوردی از توزیع اندازه ذرات فراهم می‌کند به صورت نسبی برای دو طول موج و عمق اپتیکی متناظر آن‌ها هم بیان می‌شود (Eck et al., 1999). در این تحقیق از توان آنگسترم نسبی برای دو طول موج ۰/۴۴ و ۰/۸۷ میکرون بررسی شده است. همان طور که گفته شد این پارامتر اطلاعات کلی در مورد اندازه ذرات را ارائه می‌دهد به این نحو که آنگسترم نزدیک به ۲ بیانگر اندازه ریز ذرات هواویز است (هواویزهایی مثل دود ناشی از سوخت زیست توده) (Kaufman et al., 1992) و هر چه به صفر نزدیک‌تر شود بیشتر شدن سهم ذرات درشت را نشان می‌دهد (مثل گرد و غبار) (Holben et al., 1991). در این مطالعه مقدار توان آنگسترم بدست آمده در هر ایستگاه IASBS در بازه بین ۰ تا ۱/۲ و در ایستگاه Kuwaituniversity بین ۰ تا ۱/۳ بوده است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد نابرابر بودن تعداد داده‌ها در دو ایستگاه است که در قسمت جمع بندی بیشتر به آن پرداخته خواهد شد.

## شعاع موثر

در بحث توزیع اندازه‌های ذرات یکی از پارامترهای شاخص، شعاع موثر است که به صورت زیر تعریف می‌شود (Hansen and Travis, 1974):

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int (\pi r^3 dN/dr dr)}{\int (\pi r^2 dN/dr dr)} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه بالا  $N$  کل چگالی عددی ستونی و  $r$  شعاع ذره است. نتایج بررسی‌های این مطالعه وابستگی شعاع موثر و عمق اپتیکی را نشان می‌دهد. برای اطمینان از نحوه این وابستگی‌ها در کنار ایستگاه‌های منطقه که در این پارامتر به دلیل شباهت و نزدیکی زیاد به صورت تجمع شده بررسی شده‌اند، از داده‌های ایستگاه Solar village واقع در عربستان که از ایستگاه‌های اولیه AERONET بوده است نیز استفاده شده است. برای برازش تابع بر حسب عمق اپتیکی نتایج وابستگی بیشتر با افزایش طول موج را نشان داده‌اند به همین منظور ما از عمق اپتیکی ۰/۶۷۵ که بیشترین طول موج موجود بازه مرئی در اندازه‌گیری‌های AERONET است، استفاده شده است. در کنار شعاع موثر این وابستگی برای شعاع میانگین نیز مشاهده شده است.

در (شکل ۶) روند وابستگی شعاع‌ها به طول موج در این ایستگاه Solar village واقع در عربستان و ایستگاه‌های استفاده شده برای منطقه مطالعاتی نشان داده شده است، که موید رابطه مستقیم شعاع موثر و میانگین کلی عمق اپتیکی دارند. در (شکل ۷) کلیه داده‌ها و نمودار برازش داده شده برای هر دو این شعاع‌ها (موثر و میانگین)، حالت‌های مختص به ذرات نرم و زبر (آستانه تمایز بین تقسیم ذرات نرم و زبر در این داده‌ها ۰/۶ میکرون است) و در (جدول ۵) این توابع نشان داده شده‌اند.

## حجم تراکم ذرات

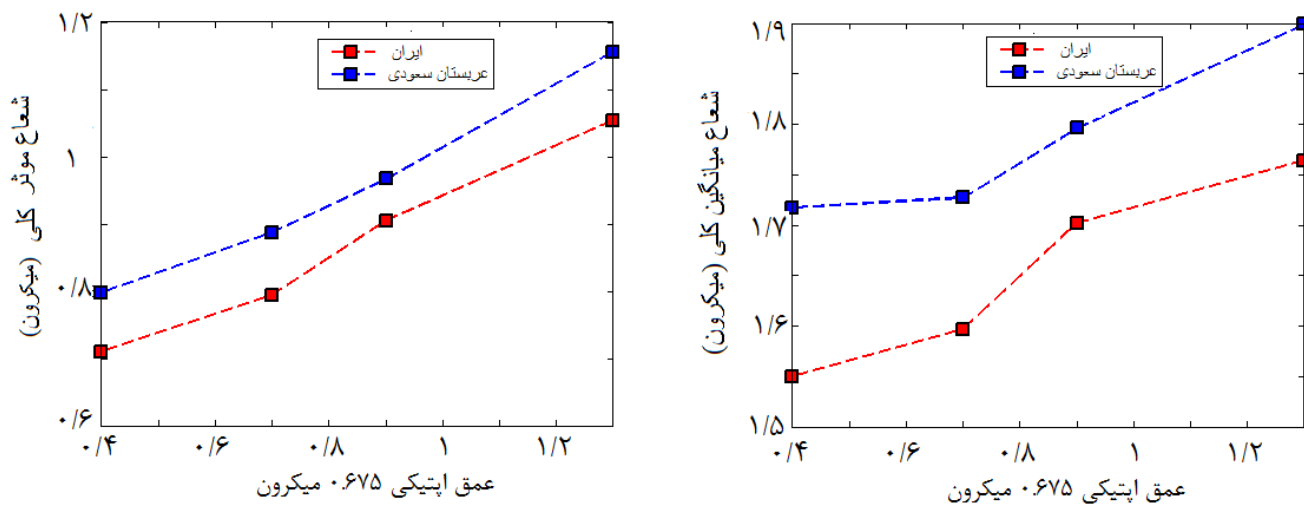
پارامتر دیگر در بحث اندازه ذرات، حجم تراکم ذرات است این پارامتر نیز همانند شعاع‌ها در سه حالت حجم تراکم کلی، نرم، زبر بیان می‌شود. همان طور که قسمت جداسازی هواویز گرد و غبار از دیگر هواویزها بیان شد، نسبت این پارامترها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و تعیین کننده‌ی میزان حضور ذرات با اندازه مختلف است. نسبت حجم تراکم ذرات زبر به نرم نمادی از میزان درشت دانه بودن هواویز است.

این پارامتر در ایستگاه Kuwait University نزدیک به ۱۲ و در ایستگاه IASBS نزدیک به ۱۰ بدست آمده است. از آنجایی که در صحرای عربستان و آفریقا که نسبت حجم تراکم ذرات زبر به نرم آن‌ها نزدیک به ۵۰ است (Dubovik et al., 2001) بنابراین در منطقه ایران نتیجه قابل پیش بینیمینی بر نرم‌تر بودن گرد و غبارهای این منطقه نسبت بهگرد و غبار عربستان تایید می‌شود. در (شکل ۸) توزیع داده‌های حجم تراکم نسبت به عمق اپتیکی و نمودار برازش داده شده بر آن نشان داده شده و (جدول ۶) نیز این توابع را معرفی می‌کند.

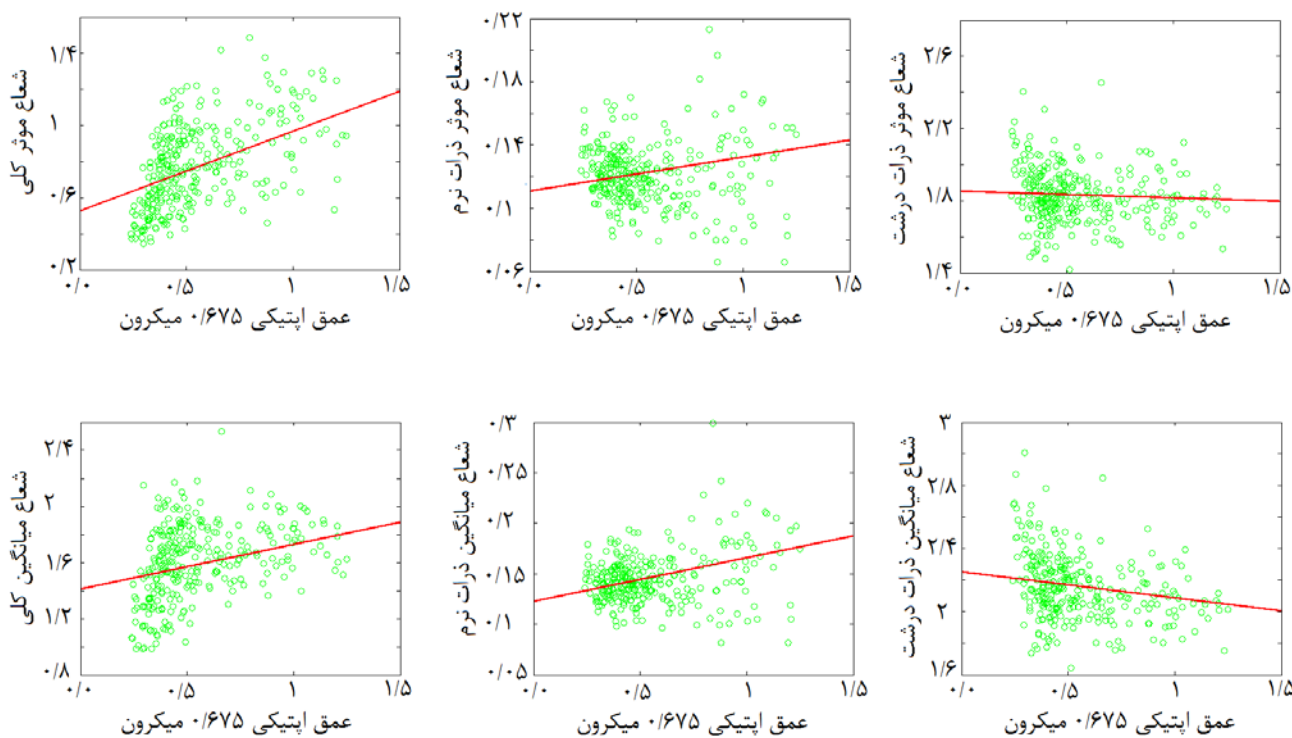
## مقایسه نتایج مطالعه با تحقیقات مشابه

در این قسمت به معرفی چند تحقیق شناسایی ویژگی‌های گرد و غبار ایران پرداخته و نتایج این مطالعه با آن‌ها مقایسه می‌شود. در سال ۲۰۱۱ (Zarasvandi et al., 2011) تحقیقی در باب ویژگی‌های ژئوشیمیایی ذرات گرد و غبار استان خوزستان انجام دادند. در این تحقیق با استفاده از آنالیز (X-ray Diffraction) XRD نمونه‌های گرد و غبار برداشته شده از سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به بررسی ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده گرد و غبار پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که ذرات گرد و غبار منطقه به طور عمده از کلسیت تشکیل یافته‌اند. دیگر عناصر درونی این ذرات شامل: کوارتز، کائولینیت و به مقدار جزئی سنگ گچ هستند.

آنالیز SEM (بررسی میکروسکوپ الکترونی ذرات) نمونه‌ها نشان از بی-قاعدگی شکل ذرات داشته است. اندازه ذرات گرد و غبار ۲ تا ۵۲ میکرون و به طور عمده در بازه ۱۰ تا ۲۲ میکرون بدست آمده است. تخمین فاکتورهای غنی سازی (Enrichment Factors) EFs در تمام اجزا نشان داده است که منگنز، هافنیوم، اورانیوم، اسکاندیم، پتاسیم، وانادیم، استرانسیم منشا طبیعی دارند. ولیسدیم، نیکل، کبالت، باریم و کروم منبع مصنوعی دارند. الگوهای عناصر نادر خاکی نشان داده است که گرد و غبار وارد شده به این استان از یک منبع بوده‌اند. این منبع از نوع رسوبات فرسایشی محیطی خارج از ایران بوده‌اند. در مطالعه دیگری (Rashki et al., 2013) برای اولین بار ویژگی‌های معدنی و شیمیایی گرد و غبار استان سیستان را با استفاده از نمونه‌های هواویز در دو ایستگاه نزدیک به بستر دریاچه خشک هامون بین سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰، بررسی کرده‌اند. علاوه از نمونه‌های سطح بالایی خاک در چندین منطقه از دریاچه خشک شده هامون و مسیر باد نیز استفاده کرده‌اند. این داده‌ها برای شناسایی ویژگی‌های شیمیایی و معدنی گرد و غبار، اثرات منابع و سهم آلودگی هوا در آن‌ها بررسی شده‌اند. آنالیز XRD بر روی نمونه‌ها نشان داده است که گرد و غبارهای منطقه به طور عمده از کوارتز، کلسیت، مسکویت و ... تشکیل شده‌اند. تخمین فاکتورهای غنی سازی EFs نشان داده است که برای تمام عناصر مطالعه شده مقدار فاکتورهای غنی سازی بسیار کم بوده است و گرد و غبار به طور کامل منشا طبیعی داشته و مواد آن مواد معدنی محلی است. بنابراین نتیجه این تحقیق حاکی از درست تشخیص دادن دریاچه‌های خشک شده هامون و رسوبات فرسایش یافته اطراف آن به عنوان منبع گرد و غبار آن منطقه بوده است. در تحقیق ذکر شده در راستای شناسایی ویژگی‌های ژئوشیمیایی ذرات گرد و غبار غرب کشور (Zarasvandi et al., 2011)، اندازه ذرات به طور عمده در بازه ۱۰ تا ۲۲ میکرون بدست آمده است. حال آن که در این مطالعه اندازه شعاع میانگین کلی ۱.۲ تا ۲ میکرون برآورد شده است. با توجه به این که مفهوم اندازه ذرات در بررسی ژئوشیمیایی انجام گرفته به قطر شباهت دارد می‌بایست با دو برابر اندازه شعاع شناسایی شده در این مطالعه مقایسه شود. با این حال همچنان اختلاف چند میکرونی بین این دو مطالعه وجود دارد.



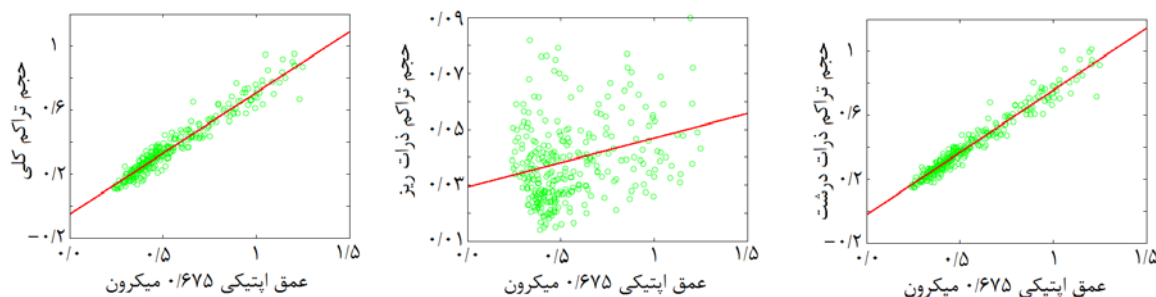
شکل ۶. روند تغییرات شعاع موثر و میانگین بین ایستگاه‌های مورد استفاده ایران و ایستگاه Solar Village در عربستان



شکل ۷. کلیه داده‌ها و نمودار برازش داده شده شعاع‌های موثر و میانگین در حالت‌های کلی، ذرات نرم و زبر

جدول ۵. توابع برازش داده شده بر شعاع‌های کل داده‌ها

انواع شعاع	تابع برازش داده شده (میکرون)
شعاع موثر	$0.15 * 0.167 + 0.47$
شعاع میانگین	$0.38 * 0.167 + 0.35$
شعاع موثر نرم	$0.02 * 0.167 + 0.112$
شعاع موثر زبر	$0.06 * 0.167 - 0.187$
شعاع میانگین نرم	$0.04 * 0.167 + 0.13$
شعاع میانگین زبر	$0.02 * 0.167 - 0.23$



شکل ۸. توزیع داده‌های حجم تراکم کلی، نرم و زبر نسبت به عمق اپتیکی و نمودار برازش داده شده

جدول ۶. تابع برازش داده شده بر حجم تراکم‌ها

حجم تراکم	تابع برازش داده شده ( بر حسب میکرون <sup>۲</sup> /میکرون <sup>۳۸</sup> )
حجم تراکم کلی	$-0.02 * 0.167 + 0.78$
حجم تراکم نرم	$0.03 * 0.167 + 0.02$
حجم تراکم زبر	$-0.06 * 0.167 + 0.08$

غبارهای بررسی شده آن با آلودگی هوا دارد (Ge et al., 2010)، مقدار البدوی تفرق منفرد بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ برای طول موج ۰/۴۴ تا ۱/۰۲ میکرون بدست آمده و مقدار دقت آن نیز ۰/۱ تا ۰/۰۲ بوده است.

این مقادیر نشان دهنده حضور بسیار محدودی از عناصر جاذب در گرد و غبارهای بررسی شده منطقه است که در بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی گرد و غبار نیز تایید شده است. بر خلاف تحقیقات معرفی شده که به بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی گرد و غبار می‌پرداختند و در نهایت نتیجه‌ای مبنی بر مکان منبع گرد و غباری اعلام می‌کردند، تحقیقات بررسی ویژگی‌های اپتیکی و اندازه ذرات اطلاعات در این زمینه در اختیار قرار نمی‌دهند. مهم ترین خصوصیت و کاربرد این تحقیقات شناسایی ویژگی‌های اپتیکی و در نهایت نحوه تعامل این ذرات با اتمسفر و پرتوهای تابیده شده آن‌ها است. تعیین این پارامترها در تخمین میزان نیروی تابشی که گرد و غبار در اتمسفر و به دنبال آن محیط زیست اعمال می‌کند، نقش اساسی دارد.

### نتیجه گیری

برای ارزیابی نتایج این تحقیق از مطالعه (Dubovik et al., 2001) استفاده شده است. بیشترین درصد گرد و غبارهای ثبت شده در عمق اپتیکی بین ۰/۴ تا ۰/۶ ثبت شده‌اند. بیشینه عمق اپتیکی بین ۱ و ۲ می باشد و در موارد محدودی از ۲ فراتر رفته است و داده‌ی AERONET در منطقه عمق اپتیکی بالاتر از ۲/۵ ثبت نکرده است در تحقیق Dubovik و همکاران نیز بیشینه عمق اپتیکی در بازه بین ۱ و ۲ بوده است. مقدار البدوی تفرق منفرد

این در حالی است که بازه اندازه ذرات بدست آمده در این تحقیق مطابقت کامل با تحقیقات جهانی انجام گرفته در شناسایی اندازه ذرات گرد و غبار به وسیله AERONET دارد (Dubovik et al., 2001). توجیه این اختلاف را باید در تفاوت روش بررسی اندازه ذرات دو مطالعه جست و جو کرد. از آن جایی که AERONET برای بازیابی اندازه ذرات از رادینانس ثبت شده، فرض کرویت را اعمال می‌کند سبب اغماض در برآورد اندازه ذرات می‌گردد. این در حالی است که در بحث‌های ژئوشیمیایی بزرگترین وجه اندازه معیار اندازه ذرات محسوب می‌گردد که موجب اختلاف نتایج این دو نوع روش می‌شود. نکته مهم که در این تحقیق بر روی آن تاکید شده است وابسته بودن پارامترهای اندازه ذرات به عمق اپتیکی است. به این معنی که نمی توان یک عدد و بازه ثابت را برای این پارامتر در نظر گرفت و باید همواره به صورت تابعی از عمق اپتیکی گرد و غبار اتفاق افتاده بیان شود.

برای برآورد میزان حضور هواویزهای دیگر در گرد و غبار منطقه، به خصوص آلودگی‌های هوا با منشا انسانی بهترین راهکار بررسی مقدار البدوی تفرق منفرد است. بازه ۰/۹ تا ۰/۹۹ بازه تایید شده این متغیر است. میل هر چه بیشتر به سمت ۰/۹۹ نشان از حضور کمتر عناصر جاذب در گرد و غبار بررسی شده دارد، هواویزهای دیگر نظیر دود یا آلودگی هوا جاذب طول موج‌های مورد مطالعه به حساب می‌آیند. همان طور که پیش از این توضیح داده شد این پارامتر رابطه عکس با میزان جذب دارد. به عنوان مثال مقدار البدوی تفرق منفرد ۰/۷۴ تا ۰/۸۴ تحقیقی در کشور چین نشان از اختلاط شدید گرد و



بیشترین وابستگی را به مقدار عمق اپتیکی نشان دادند که البته مقدار این وابستگی در عمق اپتیکی طول موج بیشتر با شدت بیشتری صورت می‌گرفت. به همین دلیل برازش نمودارها را بر اساس طول موج ۰/۶۷۵ میکرون که بالاترین طول موج مرئی است انجام گرفته است تا در تحقیقات آینده از همین برآوردها برای برآوردها از روی سنجنده MODIS (باند ۱ طول موج ۰/۶۷ میکرون دارد) نیز استفاده شود. برای اطمینان از نتایج داده‌های ایستگاه solar village عربستان را نیز با داده‌های منطقه مطالعاتی مقایسه شده است. روند افزایش یکسانی مشاهده شده که به دلیل قرار گرفته این ایستگاه در مرکز عربستان و منبع اصلی بودن داده‌های آن یک بایاس مثبت با نمودار داده‌های مطالعه حاضر داشت که مطابق با پیش‌بینی‌های قبلی است. همچنین برای پارامتر حجم تراکم ذرات نیز رابطه مستقیم با عمق اپتیکی مشاهده شده است و نمودار بر اساس عمق اپتیکی ۰/۶۷۵ میکرون بر آن برازش داده شده است. در پایان پیشنهاداتی برای مطالعات آینده در همین راستا را بیان می‌شود: تعداد ایستگاه‌های AERONET در منطقه مطالعاتی محدود می‌باشند، هر چند که قسمت اعظمی از گرد و غبارهای از خاک عراق وارد ایران می‌شوند اما متأسفانه هیچ ایستگاهی در خاک عراق و حتی سوریه وجود ندارد لذا چنانچه چنین ایستگاه‌هایی ایجاد شوند امکان مطالعات دقیق‌تری را فراهم می‌کنند. مطالعات گسترده‌ای در مورد منابع و مسیرهای گرد و غباری ایران صورت گرفته است چنانچه در این مسیرها ایستگاه‌های AERONET راه‌اندازی شود می‌توان نحوه تغییر ویژگی‌ها را مدل‌سازی کرد تا شناخت بهتری از این تغییرات فراهم گردد.

بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ برای طول موج ۰/۴۴ تا ۱/۰۲ میکرون بدست آمده و مقدار دقت آن نیز ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ بوده است و وابستگی آن در آنالیزها به صورت روند افزایش به دنبال افزایش طول موج بوده است. نتایج تحقیق فوق در نزدیک منطقه مورد مطالعه بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ بوده است که با در نظر گرفتن این نکته دقت البدوی تفرق منفرد آن تحقیق نیز ۰/۰۲ بوده است و تحقیق ۱۰ سال پیش صورت گرفته و ایستگاه‌های مورد استفاده آن به صحرای عربستان نزدیک‌تر بوده‌اند نتایج قابل قبول می‌باشد. در بحث ضریب شکست بازه ۱/۴۸ تا ۱/۵۶ برای مقدار حقیقی و ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۳ برای مقدار موهومی این پارامتر برای تمام ایستگاه‌های جهان در نظر گرفته شده است و مقدار ۱/۵۲ برای مقدار حقیقی و ۰/۰۰۳ برای مقدار موهومی در منطقه مورد مطالعه بدست آمده است. مقدار پارامتر عدم تقارن بین ۰/۷۴ تا ۰/۷۱ با دقت ۰/۰۲ برای طول موج ۰/۴۴ تا ۱/۰۲ میکرون بدست آمده و رابطه معکوس بین این پارامتر و طول موج مشاهده شده است که البته در طیف مرئی بیشتر صادق است این رابطه معکوس در تحقیق Dubovik و همکاران نیز تایید شده است. مقدار توان انگسترم که در محدوده ۰ تا ۱/۳ بدست آمده است با افزایش عمق اپتیکی کاهش می‌یابد که این امر نیز با توجه به رابطه عکس این پارامتر با سایز ذرات و درصد حضور ذرات بزرگ معقول و پذیرفتنی است، بازه این پارامتر برای ایستگاه‌های نزدیک منطقه مورد مطالعه در آن دوره زمانی بین ۰ تا ۱/۶ ثبت شده است که تاییدی بر نتایج این تحقیق است. شعاع موثر و میانگین

#### منابع

- [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/aerosol\\_asymmetry\\_factor.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/aerosol_asymmetry_factor.shtml), Volume 2013.
- [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg1\\_report\\_the\\_physical\\_science\\_basics.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basics.htm), Volume 2012.
- Ackerman, S. A., 1997, Remote sensing aerosol using satellite infrared observations: *Journal of Geophysical Research*, v. 102, no. D14, p. 17069–17079.
- Andrews, E., Sheridan, P. J., Fiebig, M., McComiskey, A., Ogren, J. A., Arnott, P., Covert, D., Elleman, R., Gasparini, R., Collins, D., Jonsson, H., Schmid, B., Wang, J., 2006, Comparison of methods for deriving aerosol asymmetry parameter: *Journal of Geophysical Research*, v. 111, no. D05S04.
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanre, D., Slutsker, I., 2001, Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations: *The atmospheric sciences*, v. 59.
- Eck, T. F., Holben, B., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., Kinne, S., 1999, Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols: *J. Geophys. Res.*, v. 104, no. D24, p. 31,333-331,350.
- Ge, J. M., Su, J., Ackerman, T. P., Fu, Q., Huang, J. P., Shi, J. S., 2010, Dust aerosol optical properties retrieval and radiative forcing over northwestern China during the 2008 China\_U.S. joint field experiment: *Journal of Geophysical Research*, v. 115.
- Goudie, A. S., 2009, Dust storms: Recent developments: *Journal of Environmental Management*, v. 90, p. 89–94.
- Hansen, J. E., Travis, L. D., 1974, Light scattering in planetary atmospheres: *Space Sci. Rev.*, v. 16, p. 527-610.
- Holben, B., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998, AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization: *Remote Sens. Environ.*, v. 66, p. 1–16.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Frase, R. S., 1991, Temporal and spatial variability of aerosol optical depth in the Sahel region in relation to vegetation remote sensing: *Remote Sens.*, v. 12, p. 1147-1163.
- Kaufman, Y. J., Setzer, A., Ward, D., Tanre, D., Holben, B., Menzel, W. P., Pereira, M. C., Rasmussen, R., 1992, Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A): *Journal of Geophysical Research*, v. 97, no. D13, p. 14581–14599.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D., Gordon, H. R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouins, R., Grassl, H., Herman, B. M., King, M. D., Teillet, P. M., 1997, Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect: *Journal of Geophysical Research*, v. 102, no. D14, p. 16,815-816,830.

- King, M. D., Menzel, W. P., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Gao, B. C., Platnick, S., Ackerman, S. A., Remer, L. A., Pincus, R., Hubanks, P. A., 2003, Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS: IEEE Trans.Geosci.Remote, v. 41, p. ۴۵۸-۴۴۲ .
- Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E., Kaufman, Y. J., 2007, Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance :J. Geophys. Res, v. 112, no. D13211.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Tanré, D., Mattoo, S., Kaufman, Y. J., 2009, Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS:Reversion 2; Collections 005 and 051. :
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., Gill, T. E., 2002, Environmental Characterization Of Global Sources Of Atmospheric Soil Dust Identified With The NIMBUS7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Product: Geophysics, v. 40.
- Rashki, A., Eriksson, P. G., Rautenbach, C. J. d. W., Kaskaoutis, D. G., Grote, W., Dykstra, J., 2013, Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran: Chemosphere, v. 90, no. 2, p. 227-236.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. J. d., Eriksson, P. G., Qiang, M., Gupta, P., 2012, Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran: Aeolian Research, v. 5, p. 51-62.
- Shao, Y., Dong, C. H., 2006, A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring: Global and Planetary Change, v. 52, p. 1-22.
- Shao, Y., Wyrwoll, K.-H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Wang, X., Yoon, S., 2011, Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science: Aeolian Research, v. 2, p. 181-204.
- Zarasvandi, A., Carranza, E. J. M., Moore, F., Rastmanesh, F., 2011, Spatio-temporal occurrences and mineralogical-geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran): Journal of Geochemical Exploration, v. 111, p. 138-151.