

بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هوایزهای فصلی ایران

محمود احمدی^{۱*}، علیرضا شکیبا^۲ و عباسعلی داداشی رودباری^۳

۱. دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۴/۱۰، پذیرش نهایی: ۹۷/۷/۳)

چکیده

عمق نوری هوایزها (AOD) کمیته بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد. شناخت AOD برای درک تأثیرات آن بر کیفیت هوا و ارائه راهکارهای مقابله با آن ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی نقش مؤلفه‌های جغرافیایی مکان و شاخص‌های پوشش گیاهی بر عمق نوری هوایزهای فصلی (AOD_{550nm}) موجود در جو ایران است. در این پژوهش از فرآورده ۶ سنجنده MODIS ماهواره Aqua برای ارزیابی مقادیر AOD، NDVI و EVI به شکل فصلی طی دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۳ استفاده شد. جنوب غرب، شرق و سواحل خلیج فارس بالاترین و شمال غرب کشور و زاگرس کمترین مقدار AOD را به خود اختصاص داده‌اند. دلیل بالا بودن مقدار AOD در ایران بار ورودی گردوغبار، احتراق سوخت‌های فسیلی و کاهش ارتفاع لایه مرزی (BLH) در دوره سرد سال است چراکه اکثر آلاینده‌های جوی در لایه مرزی منتشر می‌شود و از راه فرآیندهای تلاطمی لایه آمیخته همگن می‌شود. همبستگی AOD با ارتفاع و عرض جغرافیایی منفی و در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. همبستگی منفی معنی‌دار بین شاخص‌های EVI، NDVI و AOD در فصول تابستان و انتقالی سال وجود دارد به طوری که کاستی پوشش گیاهی با افزایش AOD در هر فصل با یکدیگر متناظرند. رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) نشان داد که مقدار پوشش گیاهی توانایی بالایی در کنترل هوایزهای ورودی پایینی و ارتفاعات نقش سدکنندگی مسیر ترابرد ذرات را دارند و در نتیجه بر انتشار گردوغبار در حالت محلی و منطقه‌ای نیز تأثیر خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: عمق نوری هوایزها، شاخص‌های پوشش گیاهی، سنجنده MODIS، ایران.

۱. مقدمه

اندراکنش (جذب و پراکندگی) آنها با تابش فرودی خورشید و تابش گرمایی زمین بودجه تابشی زمین را تغییر می‌دهند. افزایش هوایزها در جو زمین موجب کاهش نمایانی جو می‌شود (بیات، ۱۳۹۲). بر این اساس برای ارزیابی هوایزها و آلاینده‌های جوی، به خصوص ذرات معلق موجود در جو از پارامتر عمق نوری هوایزها (Aerosol Optical Depth (AOD)) استفاده می‌شود (خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۲).

اثرات هوایزها معمولاً به دو بخش مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۰۷). هوایزها با جذب و پراکندگی تابش طول‌موج کوتاه خورشیدی و تابش طول‌موج بلند زمینی بر ترازمندی تابش جو اثر

هوایزها ذرات جامد یا مایع معلق در هوا هستند که ابعاد آنها از چندین نانومتر تا چندین ده میکرون متغیر است و در کنار مولکول‌های گاز و ابرها جو زمین را تشکیل می‌دهند (معصومی، ۱۳۹۱). عمق نوری هوایزها کمیته بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد و بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از هوایزها در مسیر عبوری نور است. به عبارت دیگر، عمق نوری هوایزها (AOD) مجموع ضرایب خاموشی جو برای یک طول‌موج خاص در هر لایه از جو و معیاری از میزان هوایزهای موجود در جو است (خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۲). هوایزها نقش مهمی در کارایی سامانه آب‌وهوایی دارند (بلوین و همکاران، ۲۰۰۵). زیر

مطالعه پوشش گیاهی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در ارزیابی چرخه آب‌وهوایی گردوغبار می‌باشد. عمدتاً سه شرط برای ایجاد طوفان‌های گردوغبار ضروری است که نبود هر کدام شکل‌گیری این پدیده را به تأخیر می‌اندازند:

۱- باد قوی

۲- ناپایداری در ورود سپهر پایینی

۳- سطح زمین خشک به‌عنوان منبع تولید گردوغبار (ژئو و ژای، ۲۰۰۴).

پژوهش حاضر به عامل سوم به‌صورت فصلی در ایران مبتنی بر پایش‌های ماهواره ای پرداخته است. پوشش گیاهی به‌عنوان یک عامل اصلی مؤثر در وقوع طوفان‌های گردوغباری در نظر گرفته می‌شود (شینودا و همکاران، ۲۰۱۱). پوشش گیاهی بالا باعث افزایش طول زبری سطح و کاهش انتشار گردوغباری می‌شود در نتیجه موجب کاهش طوفان‌های گردوغباری خواهد شد (مائو و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس نتایج شینودا و همکاران (۲۰۱۱) کارایی پوشش گیاهی از چهار منظر در مطالعه گردوغبارها و یا در دیدگاهی کلان‌تر برای مطالعه هواویزهای ورودی به جو در نظر گرفته می‌شود:

۱- کنترل آئرودینامیکی و فیزیکی پوشش گیاهی بر روی فرسایش باد و فرآیندهای انتشار گردوغبار

۲- روابط شناخته‌شده به‌منظور مدل‌سازی منطقه‌ای

۳- پارامترهای بحرانی مؤثر بر انتشار گردوغبار که پوشش گیاهی در آن نقش دارد (زبری سطح و آئرودینامیک)

۴- نقش پوشش گیاهی در مدل‌های یکپارچه فرسایش بادی.

کارایی پوشش گیاهی بر اکوسیستم‌های طبیعی در جهت کاهش ظرفیت انتقال ذرات توسط باد از سوی پژوهشگران متعددی مورد ارزیابی قرار گرفته است در همین راستا ویگنر و همکاران (۱۹۹۴) ثابت کردند که در صحرای کالاهاری از بین رفتن پوشش گیاهی موجب کاهش دو برابری زبری آئرودینامیک و نیز کاهش ۶۰ درصدی میانگین سرعت برشی باد می‌شود. این در حالی

مستقیم می‌گذارند. در مقابل آنها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم نیز با تأثیر بر خردفیزیک ابرها بر ترازمندی تابشی جو اثر بگذارند که تحت عنوان تأثیر اولیه غیرمستقیم هواویزها شناخته می‌شود (زارعی و همکاران، ۱۳۹۶). هواویزها همچنین می‌توانند بر کیفیت هوا و بهداشت عمومی تأثیر بگذارند (کامپا و کاستاناس، ۲۰۰۸) که پیامدهای بی‌شماری را برای زندگی مدرن به‌همراه خواهد داشت.

فشار مداوم تغییرات آب‌وهوایی در مقیاس سیاره‌ای و دخالت انسان که تشدید این پدیده را به‌همراه خواهد داشت عواقب جبران‌ناپذیری را به‌همراه خواهد داشت. همچنین مرکز بین‌الدول تغییرات آب‌وهوایی در جدیدترین گزارش خود ابراز داشته است که به‌علت دگرگونی فضایی-زمانی و مشخصه‌های فیزیکی-شیمیایی هواویزها کارایی که کمیت حاضر بر واداشت‌های آب‌وهوایی دارند؛ تا حد زیادی با عدم قطعیت بالایی روبه‌رو است (IPCC, 2013). فارغ از تمامی مباحث مرتبط با هواویزها ارتباط مؤلفه‌های جغرافیایی مکان و پوشش گیاهی نقش مهمی در تغییرات زمانی-مکانی آن دارد. ذرات معلق در هوا وابستگی زیادی به منشأ و مسیر حرکت در توده هوا دارند (کونیکال و همکاران، ۲۰۰۹). از عوامل مهم تأثیر گذار در تغییرپذیری ذرات معلق در هوا می‌توان به منشأ تولید گردوغبار، توپوگرافی مسیر حرکت توده، ویژگی‌های آب‌وهوایی منطقه و نیز فعالیت‌های شهری و صنعتی اشاره کرد (برتینا و همکاران، ۱۳۹۳). یکی از عواملی که تاکنون کمتر در پژوهش‌های مرتبط با هواویزها در ایران بدان پرداخته شد؛ پوشش گیاهی است. پوشش گیاهی ممکن است در چرخه گردوغبار جهانی اهمیت بیشتری در سال‌های پیش رو پیدا کند. کارایی گردوغبارها بر بودجه جهانی تابش (کومار و همکاران، ۲۰۱۴)، فرآیندهای مرتبط با ابر (لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ بانگرت و همکاران، ۲۰۱۲)، آلودگی هوا (ساینفلد و پاندیس، ۲۰۱۶) و توزیع کربن در مقیاس سیاره ای (ماهوالد و همکاران، ۲۰۱۰) اثبات شده است؛ بنابراین

به سرعت باد وابسته هستند و نقش پارامترهای آب‌وهوایی بیشتر از پارامتر پوشش گیاهی است اما در شرق کشور مغولستان افزایش پوشش گیاهی به‌عنوان یک عامل کاهنده قوی در رخدادهای گردوغباری عمل می‌کند. دگرگونی فضایی-زمانی هواویزهای جوی و عوامل مؤثر بر آن در مرکز چین پژوهشی است که گائو و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی آن پرداختند. آنان با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS طی یک دوره ۶ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸) مقادیر AOD، NDVI، ارتفاع و تراکم جمعیتی را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که در جنوب منطقه مورد مطالعه به دلیل ارتفاع کم، پوشش گیاهی پایین و تراکم جمعیتی بالا مقدار AOD بالاست. مائو و همکاران (۲۰۱۳) به تأثیر دگرگونی پوشش گیاهی در فعالیت‌های گردوغباری در شمال شرق آسیا پرداختند، آنان گردوغبارهای بهاری را با شبیه‌سازی دو رویداد مورد ارزیابی قراردادند. همچنین مدل‌سازی‌های آنها نشان داده است که افزایش ۰/۱ در مقدار NDVI باعث کاهش ۴ روزه طوفان‌های گردوغباری، ۱/۵ روزه طوفان‌های وزشی و ۰/۲ روزه گردوغبارهای شناور در جو می‌شود. در ایران نیز بهرامی و همکاران (۱۳۹۲) به مدل‌سازی مکانی-زمانی وقوع طوفان‌های گردوغباری در استان خوزستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تخریب پوشش گیاهی به‌طور مؤثری فراوانی طوفان‌های گردوغبار با منشأ داخلی را در استان خوزستان تحت تأثیر قرار داده است و خاک‌های شور قلیا بیشتر از سایر خاک‌ها مستعد رهاسازی ذرات غبار به جو هستند. مطالعه تأثیر ریزگردها بر تغییرات پوشش گیاهی با تأکید بر تالاب شادگان استان خوزستان نیز پژوهش دیگری است که بیات و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از شاخص NDVI سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ به ارزیابی آن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که غلظت سالانه ریزگردها ضریب تعیین ۰/۸۵ با شاخص NDVI دارد. احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۷ الف) به ارزیابی عمق نوری هواویزهای (AOD_{550nm}) فصلی ایران مبتنی بر برونداد مدل پایشگر

است که در ایران حتی ارتباط این دو مؤلفه مبتنی بر کمیت‌های آماری مورد ارزیابی قرار نگرفته است تا بتوان برای مطالعات آزمایشگاهی هدف‌گذاری کرد. پوشش گیاهی به جهت ارتباط تنگاتنگی که با فعالیت‌های گردوغباری از طریق انتشار گردوغبار طی فرآیند فرسایش بادی دارد می‌بایستی قبل از هرگونه مطالعه‌ای از هواویزها مورد توجه قرار گیرد. این امر زمانی از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود که میزان فرسایش خاک در ایران، ۱۶/۷ تن در هکتار است به‌طوری‌که سرعت رشد و شتاب گسترش فرسایش خاک در کشور ما ۶ برابر استاندارد جهانی است که سالانه معادل یک میلیون هکتار تخریب زمین‌های کشاورزی است (کاویانی‌راد، ۱۳۸۹). همچنین ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند گردوغبار که از کرانه غربی آفریقای شمالی شروع شده و با عبور از خاورمیانه و آسیای مرکزی و جنوبی تا چین ادامه دارد (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶) در سال‌های اخیر با مشکلات عدیده‌ای مواجه شده است به‌طوری‌که احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۷ ب) با مطالعه روند عمق نوری هواویزهای (AOD_{550nm}) فصلی ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۳ روند غالب افزایشی را برای هواویزها گزارش کردند. پژوهش‌های بسیاری به کارایی پوشش گیاهی مشاهداتی و مدل‌سازی شده بر فعالیت‌های گردوغباری پرداخته‌اند. کنترل انتشار گردوغبار توسط پوشش گیاهی و ارتفاع به‌منظور ارزیابی فرکانس طوفان‌های گردوغباری در سطح جهانی با بیش از ۲۴۰۰ ایستگاه هواشناسی توسط انگلستان و همکاران (۲۰۰۳) انجام شد و به این نتیجه دست یافتند که پوشش گیاهی به‌شکل مؤثری در کاهش چشمه‌های گردوغباری نقش دارد و عامل ارتفاعی نیز به‌عنوان مؤلفه کنترلی صریح در انتشار چرخه جهانی گردوغبار ایفای نقش می‌کند. ژئو و ژای (۲۰۰۴) رابطه منفی بین پوشش گیاهی و وقوع رخدادهای گردوغباری در شمال چین برای چشمه‌های مولد گردوغباری شناسایی شده بین سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۸۲ شناسایی کردند. لی و سون (۲۰۰۹) دریافتند که در بیابان‌های تکله‌مکان و گبی رخدادهای گردوغباری

است. علت انتخاب طول موج ۵۵۰ نانومتر برای ارزیابی عمق نوری هواویزهای ایران به این دلیل بوده که این طول موج در میانه محدوده مرئی قرار دارد یعنی جایی که اوج طیف خورشیدی که اثر بیشینه را تابشی دارد (فلوتسی و همکاران، ۲۰۱۶).

۲-۱-۲. شبکه ربانیک هواویزها (AERONET)

به منظور صحت‌سنجی داده‌های عمق نوری هواویزها به دست آمده توسط ماهواره Aqua از شبکه ربانیک هواویزها (AERONET) موجود در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، دانشگاه کویت، بحرین و امارات متحده استفاده شد.

۲-۱-۳. شاخص‌های پوشش گیاهی EVI و NDVI

در این پژوهش از دو شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) و شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) سنجنده MODIS ماهواره Aqua برای دوره زمانی مشترک با AOD استفاده شد. همانند AOD برای دو شاخص پوشش گیاهی نیز از فرآورده ۶ سنجنده MODIS (MYD13C2_006) استفاده شد. قدرت تفکیک یاخته‌ها 0.05×0.05 درجه قوسی بوده است که بر این اساس برای هر فصل ۶۲۲۵۵ یاخته مورد پردازش قرار گرفت. شاخص NDVI، شاخصی پایه جهت تعیین سایر پارامترهای پوشش گیاهی می‌باشد که مزایای آن نسبت به سایر شاخص‌ها در این امر نهفته است که این شاخص اختلاف بین بیشینه جذب در ناحیه قرمز ناشی از رنگ‌دانه‌های و حداکثر بازتاب در ناحیه قرمز ناشی از ساختار سلولی برگ را مشخص می‌کند (گالو و همکاران، ۲۰۰۵). در مقابل شاخص EVI در مناطق خشک و نیمه‌خشک با ترکیب پیچیده خاک و آثار جو و پوشش گیاهی تنک امکان استخراج اطلاعات قابل اعتماد را از داده‌های ماهواره‌ای کاهش داده و از تشخیص پوشش‌های گیاهی کمتر از ۳۰ درصد جلوگیری می‌کند. لذا شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) می‌تواند نتایج

ترکیبات جوی و آب‌وهوایی (MACC) پرداختند و نتایج پژوهش آنها نشان داد کمینه مقدار AOD_{550nm} در فصل پاییز و بیشینه آن در فصل تابستان اتفاق می‌افتد. عمق نوری هواویزها با ارتفاع بیشینه همبستگی معکوس و با طول جغرافیایی بیشینه همبستگی مستقیم را دارد. پژوهش‌های دیگری نیز به ارزیابی عمق نوری هواویزها در ایران که می‌توان به مطالعات (معصومی، ۱۳۹۱؛ خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۲؛ برتینا و همکاران، ۱۳۹۳ و انصافی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۶) اشاره کرد. ارزیابی منابع مرور شده با تأکید بر اهداف تعیین شده این پژوهش نشان داده است که نقش مؤلفه‌های جغرافیایی مکان و پوشش گیاهی در ارتباط دگرگونی هواویزها در کشور به درستی تبیین نشده است محدود پژوهش‌هایی هم که به نقش پوشش گیاهی در دگرگونی هواویزها پرداخته‌اند به صورت منطقه‌ای بوده که از کارایی چندانی برخوردار نمی‌باشند. لذا این پژوهش با هدف بررسی نقش مؤلفه‌های جغرافیایی مکان و شاخص‌های پوشش گیاهی برای اولین بار به صورت فصلی مبتنی بر برون‌داده‌های ماهواره‌ای به ارزیابی نقش هر یک از مؤلفه‌های نام‌برده در دگرگونی هواویزها (AOD_{550nm}) می‌پردازد.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱-۱. داده‌های مورد استفاده

۲-۱-۱-۲. عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm})

در این پژوهش از داده‌های روزانه فرآورده ۶ سطح ۳ (MYD08_M3_6) عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm}) الگوریتم Deep Blue (سایر و همکاران، ۲۰۱۴)، سنجنده MODIS، ماهواره Aqua استفاده شد. داده‌ها به شکل یاخته‌ای از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ با تفکیک مکانی 1×1 درجه قوسی برای ایران بارگیری شد. بعد از تبدیل داده‌ها به فرمت قابل پردازش برای تهیه نقشه در محیط GIS ماتریسی به ابعاد 154×4 ایجاد شد. در این ماتریس 154 نماینده یاخته‌ها و ۴ نماینده فصول می‌باشد که بعد از تبدیل داده‌های روزانه به داده‌های فصلی به دست آمده

$$y_i = \beta_0 + \sum_K \beta_K x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

(۲)

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

در روابط فوق y متغیر وابسته، x_i متغیر مستقل، β_0 و β_1 ضرایبی هستند که باید تخمین زده شوند، ε جزء خطا است، u_i, v_i طول و عرض جغرافیایی نقطه i ام می‌باشد و $\beta_k(u_i, v_i)$ پیاده‌سازی فاکتور مورد بررسی روی یک سطح پیوسته است (فوتیرنگهام و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین برای بررسی بهینه بودن مدل وایازشی برآورد شده از معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) استفاده شد (چارلتون و همکاران، ۲۰۰۹). برای همبستگی داده‌ها نیز از روش همبستگی پیرسون استفاده شد.

۲-۳. ارزیابی سری زمانی AOD، NDVI و EVI در ایران

به منظور نمایش ارتباط بهتر شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار AOD در ایران نمودارهایی از سری زمانی NDVI، EVI و AOD برای هشت شهر ایران (۱- کرمانشاه، ۲- ایلام، ۳- اهواز، ۴- گرگان، ۵- رشت، ۶- مشهد، ۷- زاهدان و ۸- چابهار) که هر یک معرف یک پهنه کلان آب‌وهوایی (مسعودیان، ۱۳۹۰) هستند، استفاده شد.

۲-۴. صحت‌سنجی داده‌های عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm})

مطالعات بسیاری به اعتبار سنجی و ارزیابی عدم قطعیت فرآورده AOD سنجنده MODIS پرداختند و کیفیت فرآورده این سنجنده را در مقیاس جهانی و منطقه‌ای مورد تأیید قرار دادند چرا که عدم قطعیت مجموعه داده‌ها بسیار با اهمیت است همچنین دریافتند که عدم قطعیت نمونه‌ها به علت تفاوت زمان عبور دو ماهواره Terra و Aqua از گذرگاه زمانی استوایی ۱۸ درصد است (رمر و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژانگ و رید، ۲۰۱۰). مطالعاتی که اخیراً انجام شده‌اند نشان دادند که عدم قطعیت حاصل از

بهتری را در مناطق خشک و نیمه‌خشکی همچون ایران ارائه دهد به همین منظور از دو شاخص پوشش گیاهی به طور همزمان استفاده شده است. شاخص EVI از بازتاب در ناحیه مادون قرمز نزدیک، بازتاب در ناحیه مادون قرمز، بازتاب باند آبی و ضرایب L ، C_1 و C_2 تولید می‌شود. مهم‌ترین مزیت این شاخص به نسبت سایر شاخص‌ها کاهش اثرات جو و پخش هواویزها می‌باشد. به عبارتی ساده می‌توان EVI را یک NDVI دگرگون شده دانست که در آن فاکتور تنظیم خاک با دو ضریب لحاظ می‌شود (واردلو و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۱-۴. داده‌های ارتفاعی مورد استفاده برای

مدل‌سازی و ارتباط با مقادیر AOD

به منظور ارزیابی نقش ارتفاع در عمق نوری هواویزهای فصلی ایران از داده‌های مدل رقومی ارتفاع (GDEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. سپس با استفاده از تابع نمونه‌گیری در محیط ArcGIS ارتفاع هر یاخته محاسبه و برای پردازش‌های آماری ارائه شد.

۲-۲. مدل‌سازی روابط فضایی مؤلفه‌های جغرافیایی

مکان و پوشش گیاهی با مقدار AOD با استفاده از مدل‌های GWR و OLS

در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی روابط فضایی عمق نوری هواویزها با مؤلفه‌های جغرافیایی مکان و شاخص‌های پوشش گیاهی از روش‌های GWR و OLS استفاده شد. وایازش وزن‌دار جغرافیایی (GWR) و حداقل مربعات معمولی (OLS) روش‌های پذیرفته جهانی می‌باشند که برای تخمین ارتباط بین یک متغیر وابسته و مجموعه‌ای از یک یا چند متغیر مستقل می‌باشند (ناکایا، ۲۰۱۴؛ فوتیرنگهام و همکاران، ۲۰۱۵). وایازش وزن‌دار جغرافیایی در یک حالت پذیرفته شده می‌تواند به صورت رابطه شماره (۱) نوشته شود مدل (GWR) به جای گسترش پارامترهای معمولی به شناسایی و برآورد یک مدل از طریق رابطه شماره (۲) می‌پردازد:

موردهای انتخابی، خطای بزرگی را به دلیل آلودگی‌های منطقه‌ای از خود به‌جای می‌گذارند. درحالی‌که عدم قطعیت ناشی از مطالعات فصلی (در مقیاس آب و هواشناسی) ناچیز است. این مقدار عدم قطعیت برای مقیاس ماهانه و بزرگ‌تر کمتر از ۵۰ درصد است (ژانگ و رید، ۲۰۰۹؛ ۲۰۱۰). لذا نتایج صحت‌سنجی نشان داد ضریب تعیین برای دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان ۰/۸۶، دانشگاه کویت، ۰/۷۹، بحرین ۰/۸۲ و ام‌القیوین ۰/۸۳ می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

اطلاعات آماری عمق نوری هواویزها در ایران (AOD_{550nm})، شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی ($NDVI$) و شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Aqua به شکل فصلی در جدول ۱ و شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شد. ارزیابی‌ها از زمان گذر ماهواره Aqua نشان داد بین ساعت ۱۲:۳۰ تا ۱۴ به وقت محلی ایران (تهران) از کشور عبور می‌کند. لذا اطلاعات این ماهواره را می‌توان برای ارزیابی‌های عصر هنگام در کشور به کار برد.

مقدار متوسط AOD ایران مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای Aqua بین ۰/۱۰۱ تا ۰/۱۵۶ به ترتیب برای فصول پاییز و بهار در نوسان است، مقدار متوسط بالای AOD در فصل بهار نشان‌دهنده فعال شدن چشمه‌های غبار مؤثر در منطقه می‌باشد. این نتیجه با پژوهش نصر آزادانی (۱۳۹۴) که دریافت در اوایل بهار میزان رطوبت خاک رو به کاهش گذاشته و در اواخر فصل بهار و تابستان به کمینه مقدار خود می‌رسد همخوانی دارد. در فصل زمستان مقدار متوسط AOD در ایران ۰/۱۲۰ است که کمترین مقدار انحراف معیار نیز در همین فصل اتفاق افتاده است. از آنجایی که انحراف معیار نوعی معدل انحرافات فردی از میانگین است (عساکره، ۱۳۹۰) لذا این مقدار نشان‌دهنده نسبتی از مشاهدات در فاصله‌های مختلف از میانگین است. از آنجایی که کمترین مقدار انحراف معیار با ۰/۰۴۶ در

فصل زمستان اتفاق افتاده است می‌توان اذعان داشت که مقدار AOD این فصل تغییرپذیری کمتری دارد (شایان توجه است که یکاد انحراف معیار با یکاد متغیر یکی است). همین امر برای پراش نیز صادق است چرا که هرچه تغییرپذیری مقادیر مجموعه داده‌ها بزرگ‌تر باشد پراش نیز بزرگ‌تر است و برعکس. همان‌طور که در جدول ۱ آمده است دامنه تغییرات AOD در فصل تابستان ۰/۴۸۰ به‌دست آمده است و پراش نیز ۰/۰۰۷ محاسبه شد که بالاترین مقدار پراش در بین فصول است و همگام با پراش انحراف معیار فصل تابستان نیز ۰/۰۸۱ در بین فصول پیشینه است. مقایسه نتایج به‌دست آمده با پژوهش مائو و همکاران (۲۰۱۴) که AOD یک دهه گذشته (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲) جهان را ارزیابی کردند نشان داد که مقدار AOD میانگین فصلی بهار و تابستان در ایران از متوسط مقدار جهانی که ۰/۱۲۶ است بیشتر می‌باشد. نام‌برده متوسط AOD خشکی‌های زمین را ۰/۱۳۱ عنوان کرده است که بازهم دوره گرم سال در ایران بیشتر از متوسط خشکی‌های کره زمین است. اگر در سطح قاره نیز بخواهیم مقدار AOD ایران را ارزیابی کنیم بر اساس نتایج همان پژوهش متوسط AOD قاره آسیا ۰/۱۵۱ است که فصل تابستان در ایران با ۰/۱۵۶ حتی از متوسط قاره آسیا نیز هواویزهای آن بزرگ‌تر است. لذا می‌توان اذعان داشت ایران یکی از بیشترین هواویزهای جهانی را دارا است که از نظر سلامتی و کیفیت هوا از شرایط مناسبی برخوردار نیست. کمینه مقدار AOD بر اساس نتایج ارائه شده جدول ۱ در ایران به مقدار ۰/۱ نیز در هیچ فصلی نمی‌رسد؛ اما پیشینه مقدار AOD در ایران در دوره گرم سال اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی دوره گرم سال مقدار پیشینه AOD در ایران بیشتر از دوره سرد سال است که دور از انتظار نیز نبوده است. اگر چارک سوم را مرز کانون پیشینه هواویزهای ایران در نظر بگیریم در دوره گرم سال یک‌چهارم ایران مقدار هواویزهای بیشتر از حداقل ۰/۱۶۷ و حداکثر ۰/۱۸۳ دارند. در فصل بهار چارک اول ۰/۱۰۹ محاسبه شد این مقدار نشان می‌دهد در ۷۵ درصد از

به‌دست‌آمده، اما برای شاخص NDVI مقدار بیشینه با ۰/۷۷۷ در فصل تابستان به‌دست‌آمده است. بر اساس اطلاعات آماری ارائه شده برای دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI در تمامی آماره‌های مورد مطالعه مقادیر شاخص EVI کمتر از شاخص NDVI می‌باشد علت این امر می‌تواند به دلیل بازتاب بیش حد از خاک در زمینه مطالعاتی باشد (جی و پترس، ۲۰۰۳). از آنجایی که خشکسالی پس از وقوع و با تأخیر روی شاخص‌های پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد لذا مطالعه دگرگونی زمانی-مکانی این شاخص‌ها گویای رفتار آب‌وهوایی منطقه می‌باشد چرا که پوشش گیاهی هر منطقه جغرافیایی، مشخصه‌های مربوط به خاک و چگونگی توزیع و شدت بارندگی را در خود نهفته است.

مساحت کشور عمق نوری هواویزها ۰/۱۰۹ و بیشتر است. بر اساس اطلاعات شاخص NDVI و EVI بیشینه مقادیر آماری، دامنه تغییرات، بیشینه، میانگین، پراش و انحراف از معیار هر دو شاخص در فصول گرم سال اتفاق می‌افتد. بیشینه شاخص EVI در فصل تابستان با ۰/۴۷۸ و کمینه آن با ۰/۰۴۳- در فصل زمستان اتفاق افتاده است. بیشینه شاخص NDVI نیز همانند شاخص EVI در فصل تابستان با ۰/۷۷۷ و کمینه آن با ۰/۰۶۹- در فصل بهار به‌دست‌آمده است. طبیعی است که با توجه آب‌وهوای ایران بیشترین دامنه تغییرات هر دو شاخص در فصل بهار اتفاق بی‌افتد. بیشینه میانگین شاخص EVI با ۰/۱۰۵ و شاخص NDVI با ۰/۱۵۶ در فصل بهار برای متوسط کل کشور محاسبه شد. مقادیر بیشینه نیز در فصل بهار برای شاخص EVI ۰/۴۷۸

جدول ۱. اطلاعات آماری عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm})، شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص پوشش گیاهی بازسازی شده (EVI) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Aqua به صورت فصلی در ایران.

پارامتر	فصل	کمینه	بیشینه	دامنه تغییرات	چارک اول	چارک سوم	میانگین	پراش	انحراف از معیار
AOD	زمستان	۰/۰۶۱	۰/۳۲۹	۰/۲۶۸	۰/۰۹۰	۰/۱۳۸	۰/۱۲۰	۰/۰۰۲	۰/۰۴۶
	بهار	۰/۰۶۸	۰/۴۶۰	۰/۳۹۲	۰/۱۰۹	۰/۱۸۳	۰/۱۵۶	۰/۰۰۵	۰/۰۶۷
	تابستان	۰/۰۴۳	۰/۴۸۰	۰/۴۳۷	۰/۰۷۷	۰/۱۶۷	۰/۱۳۳	۰/۰۰۷	۰/۰۸۱
	پاییز	۰/۰۵۵	۰/۳۲۹	۰/۲۷۴	۰/۰۶۹	۰/۱۱۴	۰/۱۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۴۹
EVI	زمستان	-۰/۰۴۳	۰/۲۰۸	۰/۲۵۲	۰/۰۴۷	۰/۰۸۷	۰/۰۷۰	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵
	بهار	-۰/۰۳۶	۰/۴۶۱	۰/۴۹۷	۰/۰۵۴	۰/۱۴۰	۰/۱۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۷۱
	تابستان	۰/۰۲۵	۰/۴۷۸	۰/۴۵۴	۰/۰۵۳	۰/۱۲۶	۰/۰۹۷	۰/۰۰۵	۰/۰۶۸
	پاییز	۰/۰۲۵	۰/۳۶۷	۰/۳۴۳	۰/۰۵۳	۰/۰۹۹	۰/۰۸۲	۰/۰۰۲	۰/۰۴۸
NDVI	زمستان	-۰/۰۱۳	۰/۵۲۷	۰/۵۴۰	۰/۰۷۷	۰/۱۴۰	۰/۱۱۵	۰/۰۰۴	۰/۰۶۵
	بهار	-۰/۰۶۹	۰/۷۳۵	۰/۸۰۴	۰/۰۸۳	۰/۲۰۲	۰/۱۵۶	۰/۰۱۲	۰/۱۱۰
	تابستان	۰/۰۳۸	۰/۷۷۷	۰/۷۳۸	۰/۰۷۶	۰/۱۸۳	۰/۱۳۷	۰/۰۱۱	۰/۱۰۳
	پاییز	۰/۰۴۰	۰/۷۳۴	۰/۶۹۴	۰/۰۷۸	۰/۱۵۴	۰/۱۲۶	۰/۰۰۷	۰/۰۸۷

جدول ۲ همبستگی عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm}) فصلی ایران را با مشخصه‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI، ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی را ارائه داده است. همان‌طور که پیداست بیشینه همبستگی با مؤلفه‌های جغرافیایی مکان با عمق نوری هواویزهای ایران متعلق به ارتفاع و پس از آن عرض جغرافیایی و سپس طول جغرافیایی است؛ ارتفاع از آن جهت که به‌عنوان مانع در برابر توده هوا عمل می‌کند همبستگی بالایی را نشان داده است. پس از آن عرض جغرافیایی به‌دلیل آن‌که هر چه به‌سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر پیش برویم از مناطق خشک و نیمه‌خشک کاسته شده و در عرض‌های پایین جغرافیایی به‌دلیل مناطق خشک و نیمه‌خشک و بسترهای خشکیده ذرات زیادی وارد جو می‌کنند مقدار همبستگی بالایی را پس از ارتفاع نشان داده است که دور از انتظار نمی‌باشد همین امر برای طول جغرافیایی نیز با شدت کمتری صادق است. همبستگی AOD با ارتفاع و عرض جغرافیایی منفی و معنی‌دار می‌باشد ($\alpha = 0.05$) و همبستگی AOD با طول جغرافیایی در هیچ‌یک از فصول معنی‌دار نیست. این نتیجه پیش‌تر توسط احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۷ الف) برای عمق نوری هواویزهای (AOD_{550nm}) فصلی ایران مبتنی بر برونداد مدل پایشگر ترکیبات جوی و آب‌وهوایی (MACC) اثبات شده است که با نتایج این پژوهش مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS ماهواره Aqua هم‌راستا می‌باشد. بیشینه همبستگی AOD با ارتفاع به‌ترتیب در فصول تابستان، پاییز، بهار و زمستان رخ می‌دهد. در فصل تابستان مقدار AOD با ارتفاع همبستگی 0.742 - را نشان می‌دهد. به جهت ارزیابی مشخص‌تری از شرایط AOD ایران و ارتباط آن با مؤلفه‌های جغرافیایی و پوشش گیاهی از روش‌های وایزش فضایی نیز برای ارزیابی مقادیر استفاده شد. همان‌طور که در بخش روش کار نیز آمده است از دو روش GWR و OLS برای مدل‌سازی وایزش فضایی استفاده شد. نتایج این دو روش نشان داده است که مدل GWR برآوردهای دقیق‌تری برای متغیر پاسخ ارائه

می‌دهد مدل GWR می‌تواند ضرایب وایزشی را در هر مکانی برآورد کند. مدل‌سازی‌ها نشان داده است که باقی‌مانده‌های مدل GWR مطلوب‌تر از مدل OLS است این نتیجه نیز در پژوهش‌های پیشین که برای سایر فراسنج‌های آب و هوایی ایران همچون دما (فلاح قالهری و داداشی رودباری، ۲۰۱۸) و بارش (احمدی و همکاران، ۲۰۱۸) اثبات شده است. مقادیر محاسبه‌شده ضریب تعیین R^2 ، ضریب تعیین اصلاح‌شده $Adjusted R^2$ و معیاره اطلاعاتی آکائیک AICc تمامی فصول مورد مطالعه با روش‌های وایزش کلاسیک (OLS) و وایزش وزن‌دار جغرافیایی (GWR) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی فصول مورد مطالعه $Adjusted R^2$ ، R^2 مدل GWR نسبت به مدل OLS بیشتر است. که این امر نشان‌دهنده کاهش خطا و افزایش دقت در برآورد متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل و همچنین بیانگر برتری مدل وایزش وزن‌دار جغرافیایی (GWR) در این خصوص می‌باشد. تفاوت در مقدار معیاره AICc دو مدل OLS و GWR شاهدهی قوی از بهینگی در برازش داده‌ها به مدل را برای GWR نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد در مدل GWR برای برآورد پهنای باند از روش (AICc) انتخاب شد. هسته ثابت به‌جای هسته تطبیقی برای برازش پهنای باند انتخاب شد. چراکه یاخته‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌طور منظم و همگن توزیع شده‌اند. نتایج GWR بار دیگر نشان از نقش مهم ارتفاعات در مقدار AOD ایران داشته است. انگلستان و همکاران (۲۰۰۳) نیز از عامل ارتفاع به‌عنوان مؤلفه کنترلی صریح در انتشار چرخه جهانی گردوغبار یاد کردند که نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند. پس از ارتفاع، عرض جغرافیایی به‌عنوان یک عامل مهم نقش دارد. همانند نتایج ارائه شده برای همبستگی طول جغرافیایی کمترین اهمیت را دارد. مهم‌ترین دلیل افزایش همبستگی و مقدار R^2 ارتفاعات با مقدار AOD در ایران وجود رشته‌کوه‌های مختلف و با جهت‌گیری‌های خواصشان می‌باشد. رشته‌کوه زاگرس که نقش مهمی

شاخص‌های پوشش گیاهی و توزیع فضایی AOD و تأیید ارتباط منفی این دو مؤلفه دلیل اول برای مناطقی با پوشش گیاهی بالا می‌تواند غالب‌تر باشد.

ارزیابی نتایج وایازش‌های فضایی موردبررسی نیز نشان داده است که در مناطق شکننده محیطی همچون مناطق خشک و نیمه‌خشک افزایش مقدار AOD ناشی از کاهش طولانی‌مدت پوشش گیاهی در آن منطقه می‌باشد. البته باید به دو نکته توجه ویژه داشت که به شکل مستقل عمل می‌کنند: ۱- بار ورودی گردوغبار (مقدار AOD بالای غرب و جنوب غرب ایران) و ۲- نمک دریا (مقدار AOD بالای رشت و ساری در سواحل دریای خزر). مدل‌سازی‌ها با استفاده از وایازش‌های فضایی و به‌خصوص روش GWR نشان داده است که دگرگونی در مقدار پوشش گیاهی توانایی تأثیرگذاری در هواویزهای وردسپهری پایینی را دارند و در نتیجه بر انتشار گردوغبار در حالت محلی و منطقه‌ای نیز تأثیر خواهند داشت. لازم به ذکر است برای اندازه‌گیری دقیق نقش پوشش گیاهی بر ترابرد منطقه‌ای هواویزها و در گام بعدی ترابرد گردوغبار در وردسپهر پایینی نیازمند محاسبه شار غبار است که در اهداف تعیین شده این پژوهش نمی‌گنجد.

برای شناسایی تفاوت‌های منطقه‌ای بین پوشش گیاهی و هواویزهای موجود در جو ایران توزیع فصلی ضرایب به‌دست‌آمده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان از همبستگی منفی معنی‌دار بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با مقدار AOD در کشور وجود دارد. عمده پوشش گیاهی که باعث همبستگی منفی معنی‌دار در ایران شده‌اند پوشش گیاهی فصلی می‌باشد. نتیجه همبستگی منفی معنی‌دار نشان می‌دهد که در هر دگرگونی جزئی در افزایش پوشش گیاهی می‌تواند منجر به سرکوب رویدادهای گردوغباری و کاهش مقدار هواویزهای موجود در جو ایران منتهی شود درحالی‌که کاهش این مقدار می‌تواند نتیجه معکوسی به‌همراه داشته باشد. با این حال، در مناطق بیابانی بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی بسیار ضعیف همچون دشت کویر و

می‌تواند در دگرگونی زمانی-مکانی AOD در ایران داشته باشد با کشیدگی شمال غرب-جنوب شرق سوی خود همچون سدی مانع از انتقال هواویزهای غربی به ایران مرکزی می‌شوند که یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش غلظت هواویزها در مناطق غربی و جنوب غربی ایران است. این نتیجه توسط معصومی و همکاران (۲۰۱۳) نیز برای ایران ثابت شده است آنها به نقش رشته‌کوه البرز در شمال ایران و زاگرس در غرب ایران که به‌عنوان مانع در برابر توده‌های هوا عمل می‌کنند اشاره کردند.

این پژوهش علاوه بر مؤلفه‌های جغرافیایی مکان، شاخص‌های پوشش گیاهی را نیز در ارتباط با AOD فصلی ایران نیز مورد مطالعه قرار داده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود ارتباط منفی بین AOD و NDVI در تمامی فصول و همین ارتباط بین AOD و شاخص EVI مشاهده شد البته در فصل زمستان مقدار ۰/۰۳۹ به‌دست آمده است که از آنجایی که این مقدار همبستگی خیلی پایین است قابل چشم‌پوشی می‌باشد. با توجه نقش شاخص‌های پوشش گیاهی مورد مطالعه و همان‌طور که برای هشت شهر در هشت پهنه کلان آب‌وهوایی ایران نیز به‌شکل سری زمانی در شکل ۴ آمده است AOD فصلی بالاتر همراه با NDVI و EVI پایین‌تر همراه است و بالعکس. نتیجه حاضر توسط گائو و همکاران (۲۰۱۲) در مرکز چین نیز مورد تأیید قرار گرفته است؛ اما دو دلیل ممکن است در این خصوص وجود داشته باشد: ۱- از یک طرف مناطقی با پوشش گیاهی متراکم کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند و لذا آلودگی جوی خیلی جدی نیست که منجر به انتشار هواویزهای با منشأ شهری یا به‌شکل کلی‌تر با منشأ انسان شود؛ اما درست در نقطه مقابل این ادعا بیشتر آتش‌سوزی‌های مرتبط با زیست‌توده در این مناطق رخ می‌دهد که طبیعتاً ذرات ریزتری از هواویز تولید می‌کنند که باید با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. دلیل دوم توسط لی و همکاران (۲۰۱۰) تأیید شده است. حال با ترکیب این دو جنبه و نگاهی جامع‌تر به ارتباط

لوت، وردایی طوفان‌های گردوغباری و مقدار هواویزهای موجود در جو این مناطق به نظر نمی‌رسد که پوشش گیاهی مرتبط باشد که می‌توان به نقش پارامترهای آب‌وهوایی اشاره کرد.

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۲ شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) تنها در دوره گرم سال با مقدار AOD همبستگی معنی‌دار ارائه داده است. در مقابل شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) در سه فصل بهار، تابستان و پاییز ارتباط معنی‌دار با AOD ایران ارائه کرده‌اند. روش OLS نتوانسته است توضیح مناسبی از شاخص‌های گیاهی با AOD در ایران دهد. چرا در وایازش‌های معمولی فرض بر آن است که رابطه‌ای می‌خواهیم بین یک متغیر وابسته و تعدادی متغیر توضیحی مدل‌سازی کنیم در سراسر محدوده مورد مطالعه

یکسان است. همان‌طور که به روشنی پیداست چنین فرضی صحیح نمی‌باشد. در مقابل وایازش وزن‌دار جغرافیایی (GWR) یک معادله وایازش محلی برای هر کدام از عوارض موجود در بانک داده درست می‌کند که طبیعتاً نتیجه منطقی‌تر از متغیرهای وابسته و توضیحی در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. لذا همین امر باعث شده است که روش OLS نتواند توضیح مناسبی در خصوص AOD و پوشش گیاهی ارائه دهد. روش GWR همان‌طور که در جدول ۲ نیز ارائه شده است برای شاخص EVI به ترتیب در فصل زمستان ۰/۶۴۹، بهار ۰/۸۵۱، تابستان ۰/۸۳۲ و پاییز ۰/۸۳۵ و شاخص NDVI به ترتیب ۰/۷۰۸، ۰/۸۴۶، ۰/۸۲۳ و ۰/۸۲۹ درصد از تنوع مکانی عمق نوری هواویزهای ایران را توضیح داده‌اند.

جدول ۲. همبستگی و وایازش‌های فضایی مقدار AOD با مؤلفه‌های جغرافیایی و پوشش گیاهی در ایران.

پارامتر	فصل	همبستگی (Pearson)			حداقل مربعات معمولی			رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)		
		همبستگی	p-values	R ²	R ²	R ² Adjusted	AICc	R ²	R ² Adjusted	AICc
طول جغرافیایی	زمستان	-۰/۰۵۸	۰/۴۷۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	-۵۰۱	۰/۰۵۱۹	۰/۰۳۹۸	-۵۰۸
	بهار	-۰/۰۰۳	۰/۹۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶	-۳۸۶	۰/۰۰۴۸	۰/۰۳۶	-۳۹۲
	تابستان	۰/۱۱۰	۰/۱۷۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	-۳۳۰	۰/۰۰۶۴	۰/۰۵۲	-۳۳۷
	پاییز	۰/۰۷۳	۰/۳۶۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	-۴۸۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۳۱	-۴۸۹
عرض جغرافیایی	زمستان	-۰/۳۳۹	۰/۰۰۰	۰/۱۱۵	۰/۱۱۵	۰/۱۰۹	-۵۱۹	۰/۰۲۲۷	۰/۲۰۶	-۵۳۶
	بهار	-۰/۳۱۷	۰/۰۰۰	۰/۱۰۱	۰/۱۰۰	۰/۰۹۴	-۴۰۲	۰/۰۲۱۳	۰/۱۹۲	-۴۱۸
	تابستان	-۰/۴۳۸	۰/۰۰۰	۰/۱۹۲	۰/۱۹۱	۰/۱۸۶	-۳۶۱	۰/۰۲۷۰	۰/۲۵	-۳۷۲
	پاییز	-۰/۳۵۵	۰/۰۰۰	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۰	-۵۰۴	۰/۰۲۰۸	۰/۱۸۶	-۵۱۵
ارتفاع	زمستان	-۰/۴۹۰	۰/۰۰۰	۰/۲۴۰	۰/۲۴۰	۰/۲۳۵	-۵۴۲	۰/۰۷۵۹	۰/۶۸۲	-۶۵۴
	بهار	-۰/۶۳۱	۰/۰۰۰	۰/۳۹۸	۰/۳۹۸	۰/۳۹۴	-۴۶۳	۰/۰۸۴۳	۰/۷۸۷	-۵۹۸
	تابستان	-۰/۷۴۲	۰/۰۰۰	۰/۵۵۱	۰/۵۵۰	۰/۵۴۷	-۴۵۱	۰/۰۸۹۶	۰/۸۶۱	-۶۰۸
	پاییز	-۰/۷۰۹	۰/۰۰۰	۰/۵۰۳	۰/۵۰۲	۰/۴۹۹	-۵۹۰	۰/۰۸۶۹	۰/۸۲۴	-۷۲۶
EVI	زمستان	۰/۰۳۹	۰/۶۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۵	-۵۰۱	۰/۰۶۴۹	۰/۴۹۶	-۵۷۶
	بهار	-۰/۲۲۸	۰/۰۰۵	۰/۰۵۲	۰/۰۵۱	۰/۰۴۵	-۳۹۴	۰/۰۸۵۱	۰/۷۴۵	-۵۴۳
	تابستان	-۰/۲۳۸	۰/۰۰۳	۰/۰۵۷	۰/۰۵۶	۰/۰۵۰	۰/۳۳۷	۰/۰۸۳۲	۰/۷۵۳	-۵۱۰
	پاییز	-۰/۱۴۵	۰/۰۷۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	۰/۰۱۴	۰/۴۸۶	۰/۰۸۳۵	۰/۷۱۹	-۶۲۷
NDVI	زمستان	-۰/۰۶۶	۰/۴۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	-۵۰۱	۰/۰۷۰۸	۰/۵۵۲	-۵۸۵
	بهار	-۰/۲۶۷	۰/۰۰۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۶۴	-۳۹۷	۰/۰۸۴۶	۰/۷۸۴	-۵۵۰
	تابستان	-۰/۲۵۷	۰/۰۰۱	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۵۹	-۳۳۹	۰/۰۸۲۳	۰/۷۵۰	-۵۱۴
	پاییز	-۰/۱۸۷	۰/۰۲۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۴	۰/۰۲۸	-۴۸۹	۰/۰۸۲۹	۰/۷۲۸	-۶۴۱

مقادیر پررنگ (به غیر از صفر) در سطح ۰/۰۵ معنادار هستند.

پوشش گیاهی تنک، متوسط و متراکم عبارت‌اند از: ۰/۰۱۰، ۴۸/۶۸، ۴۷/۳۳، ۱/۸۷ و ۲/۰۹ درصد از کل مساحت کشور با به خود اختصاص داده‌اند.

در بهار (شکل ۱-ب شاخص EVI و شکل ۲-ب شاخص NDVI)، افزایش دما موجب ذوب خاک یخ‌زده و برف می‌شود که فرسایش خاک سطحی را به همراه دارد و مقدار سست خاک را به راحتی به پایین دست منتقل می‌کنند. در این فصل سامانه‌های همدیدی بسیار ناپایدار هستند که باعث شکل‌گیری باد با شدت بالا می‌شوند. همچنین در برخی از مناطق همچون جنوب شرق و جنوب کشور به دلیل دمای بالاتر، بارش کمتر و افزایش تبخیر در خشک‌ترین شرایط آب و هوایی در طول سال به سر می‌برند. در مقابل مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI در این فصل افزایش می‌یابد اما این مقادیر پوشش گیاهی هنوز تنک است و نشان‌دهنده این امر می‌باشد که پوشش گیاهی هنوز هم به میزان زیاد پخش نشده است؛ به‌ویژه در مناطق وسیعی در نوار غربی ایران. از تفاوت شاخص‌های پوشش گیاهی EVI و NDVI بین زمستان و بهار مشخص شد که مقادیر EVI و NDVI از زمستان به بهار فقط در یک دامنه کوچک افزایش می‌یابد. در مناطق مرکز و جنوب شرق ایران دگرگونی مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی مورد مطالعه بسیار محدود است. این دگرگونی حکایت از شرایط آب‌وهوایی مناطق نامبرده را دارد که نشان می‌دهد دگرش فصل در این مناطق به‌درستی بهبود نیافته است. هم‌سنجی شکل‌های ارائه‌شده برای مقادیر NDVI و EVI با مقدار AOD نشان می‌دهد که مناطقی با دگرگونی ناچیز بین فصلی پوشش گیاهی انطباق قابل‌توجهی با منابع اساسی تولید گردوغبار در کشور دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت پوشش گیاهی ضعیف همراه با پارامترهای مناسب آب‌وهوایی (منظور شکل‌گیری شرایط برای برخواستن گردوغبار است، هرچند که این شرایط را ذاتاً نمی‌توان مثبت تلقی کرد اما باید توجه داشت که در شکل‌گیری این پدیده سرعت‌بالای باد، ناپایداری شدید، بارش کم و دمای بالا

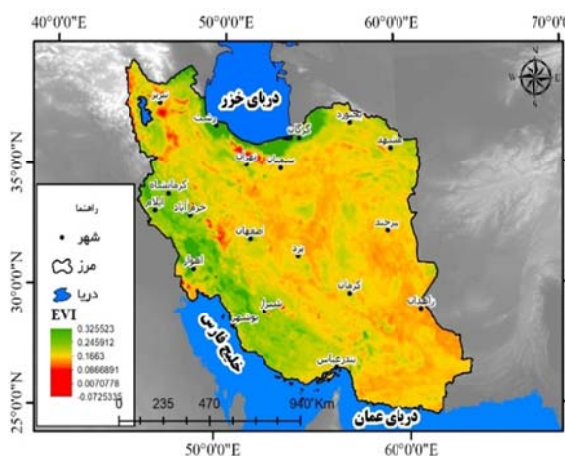
در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب (EVI) و (NDVI) به شکل فصلی در ایران ارائه شد.

مناطق حساس پوشش گیاهی در نوار غربی، جنوب غربی، مناطق مرکزی، شمال شرق، شرق و جنوب شرق کشور قرار دارند (مناطق با پوشش گیاهی متراکم و تقریباً دائمی در شمال کشور بسته به شرایط جغرافیایی و سامانه‌های کارساز جوی آن یک استثنا قلمداد می‌شود لذا در ارزیابی‌ها به مناطق حساس پوشش گیاهی پرداخته شد). این مناطق حساس به شکل کارسازی در افزایش هواویزها نقش دارند و بار گردوغباری بین سالانه را در سری زمانی می‌توانند کاهش و یا در حالتی معکوس افزایش دهند. نتایج نشان داده است که افزایش پوشش گیاهی (چه در منشأ و چه در محل رخداد) باعث کاهش بار گردوغباری ورودی به محل و همچنین تغییر در فرکانس گردوغبار می‌شود.

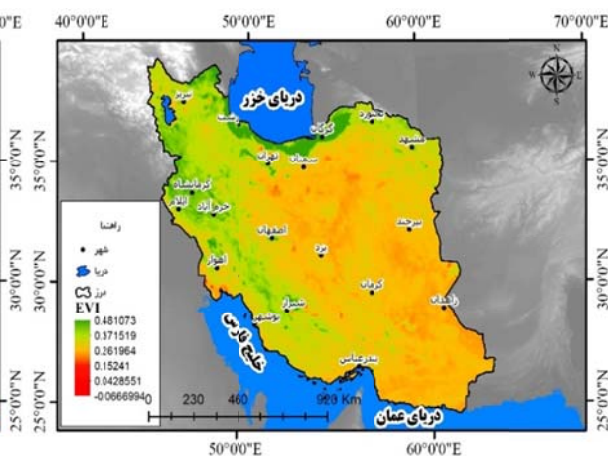
در فصل زمستان دو شاخص EVI (۱-الف) و NDVI (۲-الف) ارتباط چندانی با مقدار AOD در ایران نشان داده‌اند. در فصل زمستان شاخص EVI بین ۰/۰۷- تا ۰/۳۲ در نوسان است، بیشینه شاخص در سواحل شمالی ایران و کمینه شاخص در جنوب شرق و بیابان‌های داخلی قرار گرفته است. شاخص NDVI مقادیر بین ۰/۱۳- تا ۰/۶۱ را ارائه داده است؛ علت افزایش شاخص NDVI به نسبت شاخص EVI مقدار اصلاحی خاک در شاخص EVI بوده است مقادیر منفی در شاخص نشان‌دهنده یخ، برف و آب است. بر اساس تقسیم‌بندی توکانگا و تاک (۲۰۰۲) از شاخص NDVI در فصل زمستان ۰/۳۰ درصد آب، برف، یخ، ۵۱/۹۱ درصد خاک، ۴۴ درصد پوشش گیاهی تنک، ۲/۸۵ درصد پوشش گیاهی متوسط و ۱/۱۸ درصد پوشش متراکم از مساحت کشور را به خود اختصاص داده‌اند. در فصل بهار به ترتیب همان تقسیم‌بندی فصل زمستان مقادیر به‌دست‌آمده عبارت‌اند از: ۰/۰۶۹، ۴۱/۱۵، ۴۴/۱۱، ۱۱/۶۹ و ۲/۹۷ درصد. فصل تابستان: ۰/۰۱۵، ۴۹/۰۷، ۴۳/۵۳، ۴/۸۷ و ۲/۵۰ درصد؛ و در نهایت فصل پاییز مناطقی با سطح یخ، برف و آب، خاک،

جو بکشد (بار ورودی گردوغبار مورد بحث نیست بلکه منظور چشمه‌های داخلی می‌باشد) در مقابل در شرق کشور منابع گردوغبار فراوان است که حتی بادهای ضعیف نیز می‌توانند گردوغبار قابل توجهی را ایجاد کنند که در نتیجه مقدار هواویزهای موجود نیز افزایش می‌یابد.

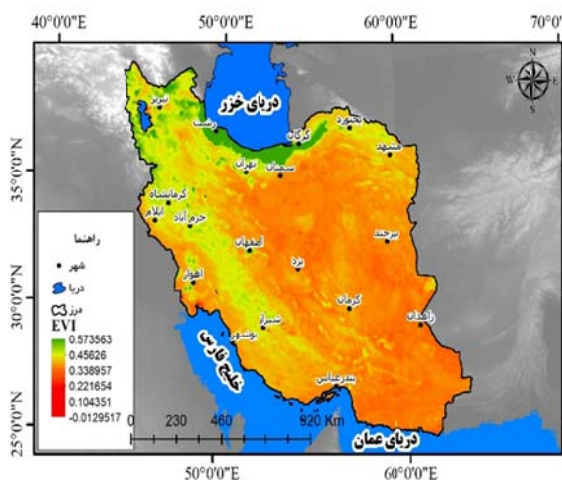
شرایط بهینه تلقی می‌شود) باعث گردوغبار فراوانی به‌ویژه در فصول انتقالی سال می‌شود. غرب ایران پوشش گیاهی بیشتری نسبت به شرق ایران دارد، لذا روشن است که در غرب ایران سرعت باد باید بیشتر از متوسط آستانه سرعت باد در کشور که بتواند گردوغبار، شن و ماسه را به سمت



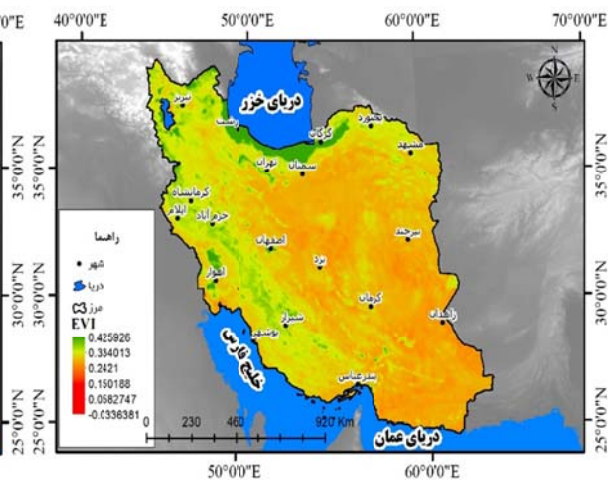
(ب)



(الف)

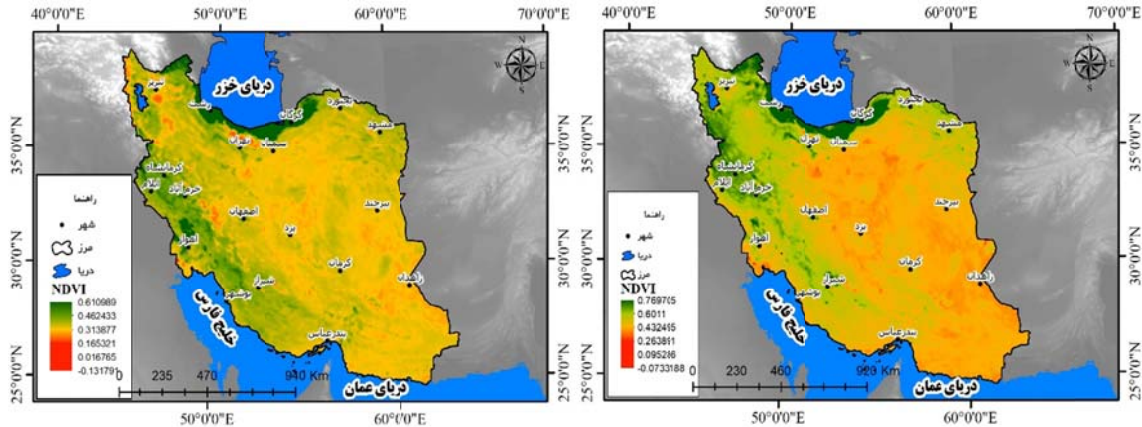


(د)



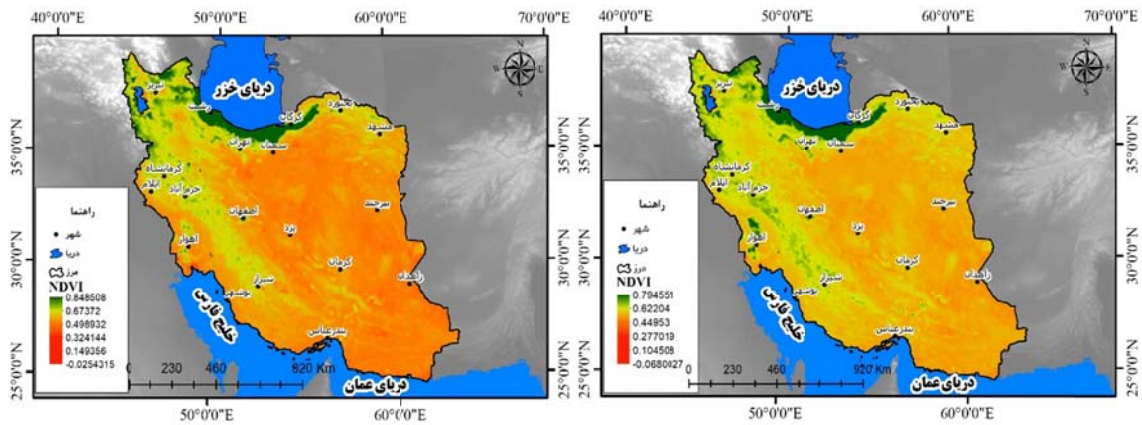
(ج)

شکل ۱. شاخص پوشش گیاهی بارسازی شده (EVI) مبتنی بر سنجنده MODIS ماهواره Aqua (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷)، (الف) فصل زمستان، (ب) فصل بهار، (ج) فصل تابستان و (د) فصل پاییز.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۲. شاخص اختلاف پهنجارشده پوشش گیاهی (NDVI) مبتنی بر سنجنده MODIS ماهواره Aqua (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷)، (الف) فصل زمستان، (ب) فصل بهار، (ج) فصل تابستان و (د) فصل پاییز.

توجه به مقادیر ارائه‌شده پوشش گیاهی توسط ماهواره دست‌کم می‌بایستی در غرب ایران در فصل بهار هواویزها پایین باشد و گردوغبار چشمگیری نیز وجود نداشته باشد اما نتایج آماری در جدول ۱ نشان داده است که بهار با متوسط ۰/۱۵۶ بیشینه متوسط AOD بین فصول سال را دارد که به راحتی می‌توان از نقش بار ورودی گردوغبار در کشور بحث کرد. هم‌سنجی شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI در فصول سرد سال نشان داده است که مقدار این دو شاخص در فصل پاییز (شکل ۱-د) شاخص EVI و شکل ۲-د) شاخص NDVI بیشتر از فصل زمستان است چراکه در پاییز آب‌وهوا نسبتاً گرم و مرطوب است و ارزش NDVI و EVI بالا نسبت به فصل

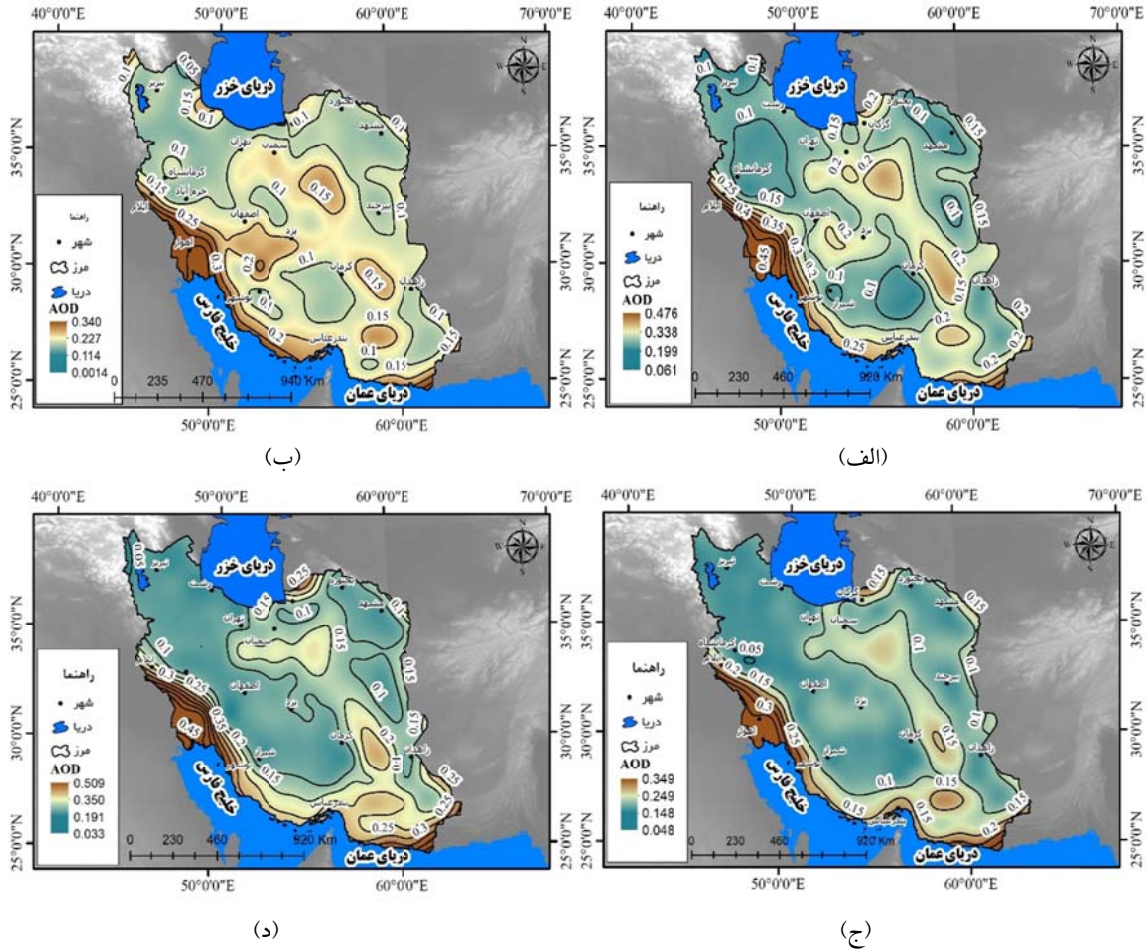
به‌شکل گسترده‌ای اثر مستقیم شرایط آب‌وهوایی از طریق درجه‌حرارت و بارندگی به رسمیت شناخته شد. به‌طورکلی، درجه‌حرارت بالا به‌همراه بارندگی باعث افزایش فعالیت گیاهی به‌دلیل افزایش فتوسنتز گیاهی می‌شود (ژائو و ژی، ۲۰۰۴). این مطلوبیت برای گیاه طبیعی است که بالاترین مقدار NDVI و EVI در ایران در فصل تابستان (شکل ۱-ج شاخص EVI و شکل ۲-ج شاخص NDVI) شکل گیرد. پوشش گیاهی باعث کاهش منابع گردوغباری می‌شود و در مجموع همه این عوامل باید باعث کاهش چشمگیر طوفان‌های گردوغباری در فصول گرم سال شود؛ اما واقعیت درباره هواویزها و گردوغبارهای ایران فراتر از این رابطه است چراکه با

زمستان در این فصل دیده می‌شود. می‌توان اذعان داشت که مؤلفه‌های آب‌وهوایی و پوشش گیاهی مناسب‌ترین دلایل برای طوفان‌های گردوغباری به‌ویژه در دوره گرم سال است. نکته‌ای که باید به آن توجه ویژه داشت و در پژوهشی مستقل در آینده به آن پرداخت نقش تغییرات آب‌وهوایی بر پوشش گیاهی است که کارایی مهمی می‌تواند بر دگرگونی سالانه طوفان‌های گردوغباری داشته باشد.

میانگین فضایی فصلی AOD_{550nm} ایران در فصل زمستان (۰/۰۰۱ تا ۰/۳۴)، فصل بهار (۰/۰۶ تا ۰/۴۷)، فصل تابستان (۰/۰۳ تا ۰/۵۰) و فصل پاییز (۰/۰۴ تا ۰/۳۴) به‌دست آمده است. در تمامی فصول مبتنی خروجی‌های ماهواره Aqua مقدار AOD در جنوب غرب ایران بیشینه است که از آن می‌توان به‌عنوان یک منطقه بیشینه عمق نوری هواویزها در ایران نام برد. در فصل زمستان بر اساس داده‌های بلندمدت ماهواره Aqua شهر اهواز (شکل ۴-ت سری زمانی AOD و پوشش گیاهی) در جنوب غربی ایران، شهر بوشهر در سواحل خلیج فارس و شهر چابهار (شکل ۴-ج) در جنوب شرق ایران در سواحل دریای عمان بیشینه مقدار AOD در ایران دارند. پژوهش‌هایی بسیاری مقدار AOD زمستانی را به‌دلیل شرایط خاص هواشناسی آن، کانون توجه خود قرار داده‌اند؛ لذا آنچه در خصوص AOD زمستانه ایران می‌توان اذعان داشت الگوی نسبتاً غیر متناوب آن است. همچنین هسو و همکاران (۲۰۱۲) نیز با تأیید سطوح غیر متناوب اشاره به گردوغباری بودن اجزای هواویزها کردند که عمدتاً مسئول دگرگونی متعدد AOD است. همچنین توده‌های هوای رسیده به ایران نیز در تغییرات مقدار AOD نقش دارند به‌طوری‌که آرکیان و نیکلسون (۲۰۱۸) ابراز داشته‌اند که چون توده‌های هوا رسیده به ایران در فصل زمستان از مناطق اروپا و دریای مدیترانه به ایران می‌رسند بارندگی‌های زیادی را برای ایران می‌آورند که باعث کاهش AOD می‌شود.

همچنین در تأیید نتیجه به‌دست آمده انصافی‌مقدم و

همکاران (۱۳۹۶) با مقایسه میانگین فصلی بارش و رخدادهای گردوغبار در جنوب غرب ایران، رابطه معکوس بین گردوغبار و بارش را به‌دست آوردند به گونه‌ای که کاستی بارش و افزایش گردوغبار در هر فصل با یکدیگر متناظرند. جنوب شرق ایران در سواحل دریای عمان نیز مقدار AOD بالایی در تمام فصول سال را نشان داده است. در طول فصل زمستان مقادیر AOD بالایی در حوزه سند در پاکستان و برخی از مناطق همچون عربستان و سیستان مشاهده می‌شود؛ که مقدار بالای منطقه اول را ناشی از هواویزهای مرتبط با عامل انسانی نسبت داد. لذا مقدار بالای AOD این منطقه را می‌توان به کانون‌های گردوغباری حوزه سند در پاکستان، دشت سیستان و بستر خشکیده دریاچه هامون مرتبط دانست. گودی میدلتون (۲۰۰۶) نیز با استفاده از شاخص هواویز (AI) داده‌های ماهواره TOMS چهار منطقه منشأ اصلی هواویز با شاخص هواویز بیش از ۸ را در شرق و جنوب شرق ایران معرفی کردند. این مناطق عبارت‌اند از: ۱- منطقه ساحلی مکران که در جنوب شرق ایران که به‌سمت پاکستان گسترش دارد. ۲- منطقه وسیعی در مرکز پاکستان. ۳- منطقه وسیعی در مرز ایران، افغانستان و پاکستان در حوضه سیستان. ۴- منطقه‌ای که تا حدودی با دشت سند در ارتباط است. تمامی این مناطق به‌عنوان کانون‌های مؤثر افزایش AOD و طوفان‌های گردوغباری فعال برای شرق، جنوب شرق و جنوب ایران هستند. در خصوص اینکه مکران در سواحل دریای عمان چرا به یکی از مناطق اصلی AOD ایران در تمام فصول سال تبدیل شده است باید عنوان کرد که مکران منطقه‌ای فراخشک متعلق به اواخر دوره کواترنر است. مواد کوه-های داخلی در قسمت نوار ساحل ذخیره می‌شود و مواد ریزه به‌اندازه سیلت از رودخانه موقتی و مخروط‌افکنه‌ها به‌طرف جنوب خلیج فارس منتقل شده و در ساحل رسوب می‌کنند که این مواد به‌راحتی قابل بلند شدن از سطح زمین هستند.



شکل ۳. عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm}) مبتنی بر سنجنده MODIS ماهواره Aqua (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷)، (الف) فصل زمستان، (ب) فصل بهار، (ج) فصل تابستان و (د) فصل پاییز.

غرب دریای خزر است. همان‌طور که پیداست رشت نزدیک به دریای خزر است، میانگین فصل زمستان نسبتاً بالای AOD آن می‌تواند ناشی از نمک دریایی معلق در جو باشد.

مقدار بالای AOD در دوره سرد سال (پاییز و زمستان) را می‌توان متأثر از منابع محلی گردوغبار و سرزمین‌های بیابانی عراق و سوریه دانست. در دوره سرد سال شیو فشاری که در دوره گرم سال مورد بحث واقع می‌شود را به آن شکل شاهد نیستیم. در عوض گاهی اوقات اصطلاحاً باد زمستانی شمال شکل می‌گیرد. همان‌طور که عزیزاده چوبیری و همکاران (۲۰۱۶) به تحلیل این سامانه پرداختند نشان دادند که این سامانه گاهی اوقات همراه با بارندگی است لذا اهمیت خود را به نسبت دوره گرم سال از دست

کانون مهم دیگر AOD زمستانه در منطقه‌ای بین شهرهای شیراز، یزد و اصفهان قرار دارد. این سه کلان‌شهر از شهرهای مهم صنعتی و پرجمعیت ایران نیز به‌شمار می‌روند از طرفی خشک شدن دریاچه‌های بختگان و پیرشان در استان فارس و خشک شدن تالاب گاوخونی در استان اصفهان و حتی خشک شدن مقطعی زاینده‌رود در سال‌های اخیر از عوامل افزایش هواویزها در این منطقه از ایران می‌باشد. لذا مقدار بالای AOD این شهرها می‌توان تا حدودی با عوامل انسان‌شناختی نیز در ارتباط باشد. همچنین شهرهای کرمانشاه (شکل ۴-ب)، سمنان، تهران، کرج و گرگان (شکل ۴-پ) نیز مقادیر بالایی از AOD را نشان داده‌اند. منطقه دیگری با AOD نسبتاً بالایی را نشان داده است شهر رشت (شکل ۴-د) در جنوب

طوفان‌های گردوغباری داشته باشند ناشی از سه الگوی همدید می‌باشد که خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) این سه سامانه را الگوی پویا، گرما پویا و گرمایی گروه‌بندی کردند.

در طول فصل تابستان (شکل ۳-ج) پرفشار آزر تقویت‌شده و با گسترش به سمت شرق باعث ترابرد گردوغبار می‌شود جیکاکس و همکاران (۲۰۱۳). جهت باد در ماه‌های گرم و خشک می‌تواند گردوغبار را از کشورهای عراق و سوریه به قسمت غربی ایران ترابرد کند. علیزاده چوبری و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که در اواسط بهار تا اواخر تابستان یک کم‌فشار حرارتی در داخل ایران و عربستان سعودی رشد می‌کند همچنین یک پرفشار روی منطقه مدیترانه شکل می‌گیرد و به سمت شمال عربستان سعودی گسترش می‌یابد. شیو فشار بالا ناشی از شکل‌گیری این پرفشار و کم‌فشار مسئول ایجاد باد شمال تابستانی با جهت‌گیری شمال غربی است. بادهای شمال تابستانی باعث انتشار گردوغبار از منابع بالقوه گردوغبار در منطقه می‌شود که می‌توان به منطقه بین‌النهرین، بیابان زبیر در عراق و سایر مناطق بیابانی در عراق و کویت اشاره کرد. گردوغبارهای ترابرد شده توسط باد تابستانی شمال در جنوب غربی ایران کیفیت هوا را به شدت کاهش داده و AOD را افزایش می‌دهند.

در فصل پاییز (شکل ۳-د) الگوهای مربوط به AOD ایران تقریباً همانند فصل تابستان می‌باشد. متوسط AOD ایران در فصل پاییز به کمترین مقدار خود در طول سال می‌رسد. به طوری که در صبح متوسط AOD ایران ۰/۱۰۱ محاسبه شد. دشت خوزستان واقع در جنوب غربی ایران، بیشترین میزان گردوغبار را دارا را تمامی فصول دارا می‌باشد خشک شدن هورالعظیم به دلیل استخراج نفت که یکی از تالاب‌های مهم در جنوب غربی ایران است، دلیل اصلی غلظت بالای هواویزها در استان خوزستان در تمامی فصول سال است. دلیل دوم این است که برخی منابع گردوغبار در خاورمیانه مانند عراق، سوریه و شبه‌جزیره عربستان به تولید گردوغبار در منطقه کمک می‌کنند. لذا

خواهد داد اما همچنان در بار ورودی غبار به جنوب غرب و غرب ایران نقش آفرینی می‌کند. نکته دیگری که برای AOD دوره سرد سال (فصل پاییز و زمستان) قابل‌بحث است در فصل زمستان مقدار AOD بیشتر از فصل پاییز است. علت اولی را که می‌توان برای این اختلاف عنوان کرد وجود مناطق پرجمعیت و صنعتی است که در زمستان باعث افزایش آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی است. همچنین دمای کم به همراه عمق کم لایه‌مرزی جوی (ABL) در زمستان به همراه همان‌طور که بحث شد با افزایش آلودگی‌های انسانی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی یک توده متمرکز از هواویزها در نزدیکی سطح زمین ایجاد شود که این امر تا حدودی به افزایش AOD فصل زمستان نسبت به فصل پاییز کمک می‌کند. تأثیر عمق کم لایه‌مرزی در افزایش AOD پیش‌تر توسط لو و همکاران (۲۰۱۴) و احمدی و داداشی رودباری (۲۰۱۷) و احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۸) مورد تأیید قرار گرفته است.

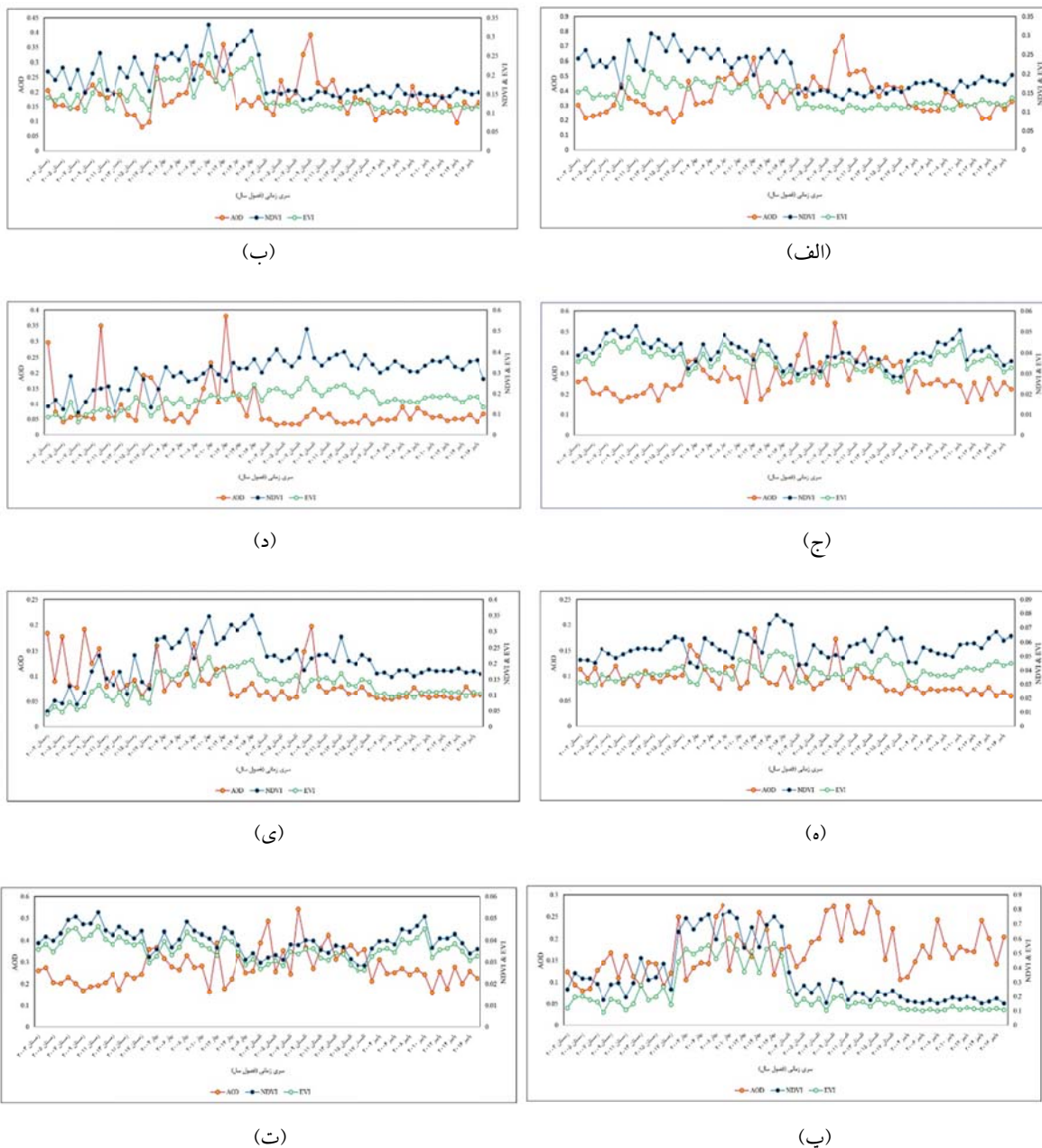
مقدار AOD فصل بهار در شکل ۳-ب نشان داده شد. همان‌طور که در شکل نیز پیداست بیشینه عمق نوری هواویزهای ایران در این فصل همانند سایر فصول در جنوب غرب ایران قرار دارد. مناطق داخلی ایران که در فصل زمستان جز کانون‌های بالا AOD ایران به شمار می‌رفتند در این فصل از شدت‌شان کاسته شده است. سواحل مکران در استان سیستان و بلوچستان نیز همانند فصل زمستان مقدار بیشینه را نشان داده‌اند. علاوه بر مناطق نام‌برده دو کانون عمده AOD دیگر نیز در ایران وجود دارند که تقریباً در تمامی فصول سال جزو مناطق بیشینه هستند. اولی بستر خشکیده هامون جازموریان در جنوب شرق ایران و دومی منطقه مرزی ایران، افغانستان و پاکستان می‌باشد که به دشت مارگو مشهور است. دوره فصل بهار بیشترین مقدار AOD در جنوب غرب ایران به‌ویژه استان خوزستان مشاهده می‌شود. بار هواویزهای ورودی به ایران از سوی مرزهای غربی و جنوب غربی در فصل بهار که می‌توانند پتانسیل بالایی برای ایجاد

عراق، ایران، شبه جزیره عربستان و جنوب غرب پاکستان در بهار و تابستان بیشتر از پاییز و زمستان است که به تبع آن مقدار AOD نیز بالاست. تفاوت در مقدار AOD را می‌توان به الگوهای انتشار، توپوگرافی و هواشناسی مرتبط دانست. دومین کانون بیشینه که در تمامی فصول AOD بالایی را نشان داده است سواحل خلیج فارس است این منطقه ساحلی از بوشهر تا بندرعباس را دربر می‌گیرد. AOD بالا این منطقه ساحلی را می‌توان با شرایط مطلوب باد، گردوغبارهای معدنی ترابرد شده به منطقه و نمک دریا مرتبط دانست از مناطق دیگر با مقدار AOD بالا می‌توان به منطقه ساحلی مکران در جنوب شرق ایران، دشت لوت و دشت مارگو اشاره کرد که با مطالعات پیشین که AOD را در جنوب شرق ایران مطالعه کرده‌اند (راشکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاسکاتیس و همکاران، ۲۰۱۶) همخوانی دارد. براتی و همکاران (۱۳۹۶) با ارزیابی روابط طوفان‌های غباری جنوب ایران با تأکید بر کم‌فشار سِند دریافتند که کم‌فشار جلگه سند طی طوفان‌های فراگیر، عمیق و متمرکز ظاهر می‌شود و «جنوب صحرا ← حجاز ← جنوب ایران» و «سوریه ← عراق ← جنوب ایران»، دو مسیر اصلی و «آسیای میانه ← جنوب ایران» مسیر فرعی مکش و ترابرد غبار طی طوفان‌های فراگیر به سمت جلگه سند هستند که نتایج این پژوهش مبنی بر بار ورودی گردوغبار در افزایش AOD جنوب شرق ایران را تأیید می‌کند. همچنین گودی و میدلتون (۲۰۰۶) بارزترین ویژگی این مناطق (جنوب شرق ایران) را اهمیت زهکشی درونی حوضه‌های بزرگ دانستند که به‌عنوان منشأ گردوغبار هستند که از منطقه سیستان نیز نام بردند. پرسپرو و همکاران (۲۰۰۲) نیز در تأیید نتایج گودی و میدلتون (۲۰۰۶) بیشتر منابع مرتبط با تولید گردوغبار را مربوط نهشته‌های آبرفتی وسیع و عمیق دانسته‌اند و تپه‌های شنی را منبع خوبی برای ایجاد گردوغبار دانه‌ریز نمی‌دانند.

استدلال ما مبنی بر اینکه AOD بالا در جنوب غربی ایران (اهواز و بوشهر) و بندرعباس مرتبط با بار غبار ورودی بالا در این منطقه است. منطقه مکران نیز یکی دیگر از مناطق عمده گردوغباری کشور است که در فصل پاییز از مناطق اصلی AOD ایران است. دگرگونی سالانه AOD در ایران به‌نوعی نشان‌دهنده شرایط آب‌وهوایی آن است. به‌طوری‌که مناطقی از ایران به‌خصوص در نوار جنوبی و غربی که فراوانی و شدت گردوغبار بالایی دارند با الگوهای آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک تطابق دارند. در تمامی فصول سال رشته‌کوه‌های ایران همچون زاگرس و البرز مقدار AOD پایینی را نشان دادند. علت این امر را می‌توان در پژوهش کلینگمولر و همکاران (۲۰۱۶) دریافت. آنان نشان دادند که به‌نظر می‌رسد که AOD به‌شدت تحت تأثیر بارش قرار دارد. این امر اشاره به نقش مهم مسیرهای ترابرد هواویزها به ایران دارد که از مسیرهایی با بارندگی قابل‌توجه عبور می‌کنند که به‌طور مثال می‌توان به رشته‌کوه زاگرس اشاره کرد. شکل ۴ سری زمانی مقادیر AOD، EVI و NDVI فصلی هشت پهنه کلان آب‌وهوایی ارائه داده است. نمودارهای ارائه‌شده برای ارزیابی بهتر توأمان شاخص‌های مورد ارزیابی ارائه شد. نتایج ارزیابی هر منطقه پیش‌تر ارائه شد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی AOD نشان داده است که بهار بیشینه و پاییز کمینه میانگین AOD ایران را دارد. علت این امر در فصل بهار ترکیبی از شرایط خشک و سرعت باد نسبتاً قوی است که موجب تشکیل طوفان‌های گردوغبار می‌شود و مقدار AOD افزایش می‌یابد. در مقابل مقدار بیشینه AOD ایران در فصل بهار با مقدار ۰/۴۸۰ در جنوب غرب ایران اتفاق می‌افتد. الام و همکاران (۲۰۱۴) نیز تأیید کردند که طوفان‌های گردوغبار در عربستان سعودی، خلیج فارس،



شکل ۴. سری زمانی فصلی AOD، EVI و NDVI به شکل فصلی در هشت پهنه کلان آب‌وهوایی؛ الف) اهواز، ب) ایلام، ج) چابهار، د) رشت، ه) زاهدان، ی) کرمانشاه، پ) گرگان و ت) مشهد.

مناطق خشک و نیمه و خشک عراق، سوریه، عربستان سعودی و شمال آفریقا)، ۲- فعالیت‌های شهری/صنعتی و سوزاندن فرآورده‌های مرتبط با زیست‌توده (عمدتاً در اصفهان، تبریز، تهران و حتی خوزستان) و ۳- محیط‌های دریایی (نمک دریا). نتایج نشان می‌دهد که AOD با افزایش فعالیت‌های صنعتی افزایش می‌یابد، اما افزایش

دگرگونی فصلی AOD ایران را می‌توان با انتقال بار ورودی گردوغبار به ایران در ارتباط دانست. بار ورودی گردوغباری که در حوزه وسیعی از ایران را در سال‌های اخیر متأثر کرده‌اند را می‌توان در سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد که به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: ۱- ترابرد گردوغبار مناطق بیابانی و نیمه‌خشک (عمدتاً

مناطق بیابانی بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی بسیار ضعیف همچون دشت کویر و لوت، به نظر نمی‌رسد مقدار هواویزها با پوشش گیاهی در ارتباط باشد لذا باید به نقش پارامترهای آب‌وهوایی اشاره کرد در همین راستا گونگ و همکاران (۲۰۰۴) شرایط هواشناسی را برای اندازه‌گیری دگرگونی پوشش گیاهی بر گردوغبار مورد ارزیابی قرار دادند؛ اما در مقابل ژائو و ژی (۲۰۰۴) ابراز داشته‌اند از آنجایی که بخش اعظم طوفان‌های گردوغباری در شرایط منطقه‌ای تا سیاره‌ای شکل می‌گیرند و بار گردوغبار باعث افزایش غلظت گردوغبار می‌شود لذا پوشش گیاهی در چنین شرایطی نمی‌تواند کارا عمل کند. نتایج این پژوهش برای چشمه‌های خارجی گردوغبار به پژوهش ژائو و ژی (۲۰۰۴) نزدیک‌تر است. کلینگمولر و همکاران (۲۰۱۶) فرض ژائو و ژی (۲۰۰۴) را برای AOD ایران در ارتباط با مؤلفه‌های هواشناسی اثبات کردند آنان نشان دادند که AOD ایران به شدت تحت تأثیر بارش قرار دارد. همچنین درجه‌حرارت بالا آشکارا می‌تواند فرآیند تبدیل گاز به ذرات را ایجاد کند اما بارش به راحتی می‌تواند هواویزهای جوی را حذف کند (لی و همکاران، ۲۰۰۳). لذا پژوهش لی و همکاران (۲۰۰۳) را می‌توان برای تأیید نتایج پژوهش کلینگمولر و همکاران (۲۰۱۶) برای AOD ایران مورد استناد قرار داد. احمدی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی RCP4.5 و RCP8.5 با مدل HadGEM2-ES در منطقه غرب ایران به آشکارسازی دگرگونی آب‌وهوایی از طریق دمای هوا بر پدیده ریزگرد پرداختند و با گزارش دما در دوره آینده میانی و دور دریافتند که افزایش دما طی فرآیند تبدیل گاز به ذرات موجب تشدید پدیده گردوغبار در غرب کشور می‌شود.

در خصوص ارتباط پوشش گیاهی و دگرگونی هواویزها باید به دو نکته اساسی توجه داشت: ۱- شرایط هواشناسی که بر روابط گیاهی و گردوغبار تأثیر می‌گذارد. ۲- سهم پوشش گیاهی به دگرگونی تراپرد گردوغبار در وردسپهر پایینی. لازم به ذکر است که پوشش گیاهی در ارتباط با

هواویزهای ناشی از تخریب زمین و بیابانزایی در ایران بسیار قوی است. میانگین مقادیر AOD سالانه در سایر نقاط ایران به طور قابل توجهی پایین‌تر از جنوب غرب، جنوب شرق و غرب است، به طور مثال زنجان در شمال غرب ایران یکی از مناطقی است که پایین‌ترین میانگین سالانه AOD را دارد این مکان علاوه بر پرجمعیت نبودن، دور از منابع اصلی گردوغبار است. باید توجه داشت که ماهواره نمی‌تواند تفاوت‌های بین هواویزهای طبیعی و انسان‌شناختی را به دلیل فرآیند اختلاط در جو تشخیص دهد؛ اما از آنجاکه دگرگونی بلندمدت در هواویزهای طبیعی نسبتاً کوچک است، روند رو به افزایش و کاهش مشاهده شده می‌تواند با دگرگونی در هواویزهای انسانی شناختی در ارتباط باشد.

بر اساس توزیع آب‌وهوایی شاخص پوشش گیاهی EVI و NDVI و دگرگونی زمانی-مکانی فصلی هواویزها، مشخص شده است که کارایی پوشش گیاهی بر انتشار هواویزها به صورت منطقه‌ای و فصلی متفاوت است. این اختلاف منطقه‌ای به علت دگرگونی پوشش گیاهی-هواویز-انتشار و جفت‌شدگی دوبه‌دو یا چندگانه موارد نام‌برده می‌باشد؛ بنابراین پوشش گیاهی به شکل چشمگیری می‌تواند در فراوری طوفان‌های گردوغباری با منشأ داخلی در کشور و کاهش هواویزها کارا باشد. بیشینه همبستگی با مؤلفه‌های جغرافیایی مکان با عمق نوری هواویزهای ایران متعلق با ارتفاع و پس‌از آن عرض جغرافیایی و سپس طول جغرافیایی است همبستگی AOD با ارتفاع و عرض جغرافیایی منفی و در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. معصومی و همکاران (۲۰۱۳) نیز اثبات کرده‌اند که رشته‌کوه‌های البرز در شمال ایران و زاگرس در غرب ایران که به عنوان مانع در برابر توده‌های هوا عمل می‌کنند و باعث افزایش مقدار هواویزها در مناطق پیش به باد می‌شوند. همبستگی منفی معنی‌دار نشان داده است که در هر دگرگونی جزئی در افزایش پوشش گیاهی می‌تواند منجر به سرکوب رویدادهای گردوغباری و کاهش مقدار هواویزهای موجود در جو ایران شود؛ اما در

شرایط هواشناسی خاص (همانند سامانه‌های درهم آمیخته) باعث به وجود آمدن انتشار گردوغبار می‌شود. در برخی از شرایط آب‌وهوایی فرین ممکن است تأثیر پوشش گیاهی برای فعالیت‌های گردوغباری تضعیف شود، اما باید توجه داشت کارایی پوشش گیاهی تحت شرایط هوای ملایم به عنوان پارامتری قوی عمل خواهد کرد. برای اندازه‌گیری اثر خالص پوشش گیاهی پیشنهاد می‌شود در پژوهشی مستقل فعالیت‌های گردوغباری با تعیین شرایط هواشناسی فعالیت گردوغباری تحت دگرگونی مختلف پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل‌های دینامیکی RegCM4 و WRF-Chem در پژوهشی مستقل برای اثبات کارایی پوشش گیاهی در رخدادهای گردوغباری بررسی شود.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری آب‌وهواشناسی (گرایش شهری) دانشگاه «شهید بهشتی» با عنوان «واکاوی وردایی زمانی-مکانی الگوهای قائم و افقی ریزگردها و ارزیابی بازخوردهای آب‌وهوایی آن در ایران» است که با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (بنیاد ملی علم ایران) (INSF) با کد ۹۶۰۰۹۹۳ انجام شد.

مراجع

احمدی، ح.، احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۷، آشکارسازی اثرات تغییر اقلیم از طریق دمای هوا بر پدیده ریزگرد بر اساس سناریوهای واداشت تابشی RCP (مطالعه موردی: منطقه غرب ایران، استان ایلام)، دومین همایش بین‌المللی گردوغبار، ۵ تا ۷ اردیبهشت ۱۳۹۷ دانشگاه ایلام.

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع. و جعفری، م.، ۱۳۹۸، تاثیر ارتفاع لایه مرزی در توفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران (مطالعه موردی ۲۱ تا ۲۴ فوریه ۲۰۱۶)، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۹(۸)، ۱۵۱-۱۷۴.

احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۷ الف، ارزیابی

عمق نوری هواویزهای (AOD_{550nm}) فصلی ایران مبتنی بر برون‌داد مدل پایشگر ترکیبات جوی و آب‌وهوایی (MACC)، دومین همایش بین‌المللی گردوغبار، ۵ تا ۷ اردیبهشت ۱۳۹۷ دانشگاه ایلام.

احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۷ ب، پایش فصلی روند عمق نوری هواویزها (AOD_{550nm}) در ایران مبتنی بر الگوریتم Deep Blue سنجنده MODIS، دومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران، ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۷، دانشگاه فردوسی مشهد. انصافی‌مقدم، ط.، خوش اخلاق، ف.، شمسی پور، ع.، اخوان، ر.، صفرراد، ط. و امیراصلاتی، ف.، ۱۳۹۶، پایش و ارزیابی اثرات گردوغبار بر تغییرات بارش در جنوب غرب ایران | استفاده از سنجنش از دور و GIS، سنجنش از دور و GIS ایران، ۹(۲)، ۹۸-۷۹.

براتی، غ.، مرادی، م.، شامخی، ع. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۶، تحلیل روابط طوفان‌های غباری جنوب ایران با کم‌فشار سبند، مخاطرات محیط طبیعی، ۶(۱۳)، ۹۱-۱۰۸.

برتینا، ه.، صیاد، غ.، متین فر، ح. و حجتی، س.، ۱۳۹۳، توزیع زمانی-مکانی ذرات معلق اتمسفری در غرب کشور بر مبنای داده‌های طیفی سنجنده MODIS، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۴)، ۱۳۷-۱۱۹.

بهرامی، ح. ع.، جلالی، م.، درویشی بلورانی، ع. و عزیزی، ر.، ۱۳۹۲، مدل‌سازی مکانی-زمانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان، سنجنش‌ازدور و GIS ایران، ۵(۲)، ۹۵-۱۱۴.

بیات، ر.، جعفری، سمیه، قرمز چشمه، ب. و چرخابی، ا. م.، ۱۳۹۵، مطالعه تأثیر ریزگردها بر تغییرات پوشش گیاهی (مطالعه موردی: تالاب شادگان، خوزستان)، سنجنش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۲)، ۱۷-۳۲.

بیات، ع.، ۱۳۹۲، دسته بندی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیدی، پایان نامه

- کاویانی‌راد، م.، ۱۳۸۹، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی و بحران‌های بوم‌شناسی در ایران، فصلنامه مطالعات راهبردی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، ۳۳-۵۸.
- مسعودیان، ا.، ۱۳۹۰، آب‌وهوای ایران، انتشارات شریعه توس مشهد، چاپ اول، مشهد، ۲۸۸ ص.
- معصومی، ا.، ۱۳۹۱، مطالعه پارامترهای فیزیکی هواویزهای جو زنجان با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی، داده‌های ماهواره‌ای، مدل هواشناسی HYSPLIT و داده‌های NCEP/NCAR، پایان نامه دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- نصر آزادانی، آ.، ۱۳۹۴، بررسی تغییرات رطوبت خاک و بارش و تأثیر آنها بر تولید غبار در منطقه بین‌النهرین با استفاده از داده‌های سامانه MODIS، سیستم GLDAS و ماهواره TRMM در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- Ahmadi, M. and DadashiRoudbari, A., 2017, Regional modeling of dust storm of February 8, 2015 in the southwest of Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 10(21), 459.
- Ahmadi, M., Kashki, A. and Dadashi Roudbari, A., 2018, Spatial modeling of seasonal precipitation-elevation in Iran based on aphrodite database, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 619-633.
- Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T. and Subhan, F., 2014, Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia, *Remote Sensing of Environment*, 143, 216-227.
- Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P. and Oowlad, E., 2016, Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations, *International Journal of Climatology*, 36(4), 2050-2062.
- Arkian, F. and Nicholson, S. E., 2018, Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data, *Environmental monitoring and assessment*, 190(1), 1.
- Bangert, M., Nenes, A., Vogel, B., Vogel, H., Barahona, D., Karydis, V. A., Kumar, P., Kottmeier, C. and Blahak, U., 2012, Saharan dust event impacts on cloud formation and radiation over Western Europe, *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(9), 4045.
- Bellouin, N., Boucher, O., Haywood, J. and Reddy, M. S., 2005, Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements, *Nature*, 438(7071), 1138.
- Charlton, M., Fotheringham, S. and Brunson, C., 2009, geographically weighted regression. White paper. National Centre for Geocomputation, National University of Ireland Maynooth.
- Engelstaedter, S., Kohfeld, K. E., Tegen, I. and Harrison, S. P., 2003, Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data, *Geophysical Research Letters*, 30(6).
- Fallah Ghalhari, G. F. and Dadashi Roudbari, A. D., 2018, an investigation on thermal patterns in Iran based on spatial autocorrelation, *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3-4), 865-876.
- Floutsi, A. A., Korras-Carraca, M. B., Matsoukas, C., Hatzianastassiou, N. and Biskos, G., 2016, Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002-2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data, *Science of the Total Environment*, 551, 292-303.
- Fotheringham, A. S., Crespo, R. and Yao, J.,
- دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- خوش سیما، س.، علی اکبری بیدختی، ع. و احمدی‌گیوی، ف.، ۱۳۹۲، تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور در دو منطقه شهری در ایران، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۹(۱)، ۱۶۳-۱۷۴.
- خوش‌اخلاق، ف.، نجفی، م. و صمدی، م.، ۱۳۹۱، واکاوی همدید رخداد گردوغبار بهاره در غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۲)، ۹۹-۱۲۴.
- زارعی، ف.، قریلو، م. و علیزاده چوبری، ا.، ۱۳۹۶، تأثیر هواویزها بر بارش در شرایط رطوبت‌های نسبی متفاوت: مطالعه موردی، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱(۲)، ۱۳۵-۱۵۵.
- عساکره، ح.، ۱۳۹۰، مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه زنجان، زنجان-ایران.

- 2015, Geographical and temporal weighted regression (GTWR), *Geographical Analysis*, 47(4), 431-452.
- Gallo, K., Ji, L., Reed, B., Eidenshink, J. and Dwyer, J., 2005, Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data, *Remote Sensing of Environment*, 99(3), 221-231.
- Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Katsoulis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X. and Torres, O. 2013, The regime of desert dust episodes in the Mediterranean based on contemporary satellite observations and ground measurements, *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 13, 16247-16299.
- Gong, S. L., Zhang, X. Y., Zhao, T. L. and Barrie, L. A., 2004, Sensitivity of Asian dust storm to natural and anthropogenic factors, *Geophysical Research Letters*, 31(7).
- Goudie, A. S. and Middleton, N. J., 2006, *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
- Guo, Y., Hong, S., Feng, N., Zhuang, Y. and Zhang, L., 2012, Spatial distributions and temporal variations of atmospheric aerosols and the affecting factors: a case study for a region in central China, *International journal of remote sensing*, 33(12), 3672-3692.
- Hsu, N. C., Gautam, R., Sayer, A. M., Bettenhausen, C., Li, C., Jeong, M. J., Tsay, S.C. and Holben, B.N., 2012, Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(17), 8037.
- IPCC 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Working Group I Contribution to the IPSS 5th Assessment Report – Changes to the underlying Scientific/Technical Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, UK & New York, USA.
- Ji, L. and Peters, A. J., 2003, Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98.
- Kaskaoutis, D. G., Houssos, E. E., Rashki, A., Francois, P., Legrand, M., Goto, D., Bartzokas, A., Kambezidis, H. D. and Takemura, T., 2016, The Caspian Sea–Hindu Kush Index (CashKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia, *Global and Planetary Change*, 137, 10-23.
- Klingmüller, K., Pozzer, A., Metzger, S., Stenchikov, G. L. and Lelieveld, J., 2016, Aerosol optical depth trend over the Middle East, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(8), 5063-5073.
- Kumar, R., Barth, M. C., Pfister, G. G., Naja, M. and Brasseur, G. P., 2014, WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(5), 2431-2446.
- Kuniyal, J. C., Thakur, A., Thakur, H. K., Sharma, S., Pant, P., Rawat, P. S. and Moorthy, K. K., 2009, Aerosol optical depths at Mohal-Kullu in the northwestern Indian Himalayan high altitude station during ICARB. *Journal of Earth System Science*, 118(1), 41-48.
- Lee, E. H. and Sohn, B. J., 2009, Examining the impact of wind and surface vegetation on the Asian dust occurrence over three classified source regions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D6).
- Li, C., Mao, J., Lau, K. H. A., Chen, J. C., Yuan, Z., Liu, X. and Liu, G., 2003, Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products, *Chinese Science Bulletin*, 48(22), 2488-2495.
- Li, R., Min, Q. L. and Harrison, L. C., 2010, A case study: The indirect aerosol effects of mineral dust on warm clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(3), 805-816.
- Li, Z., Xia, X., Cribb, M., Mi, W., Holben, B., Wang, P., Chen, H., Tsay, S. C., Eck, T. F., Zhao, F. and Dutton, E. G., 2007, Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D22).
- Luo, T., Yuan, R. and Wang, Z., 2014, On factors controlling marine boundary layer aerosol optical depth, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6), 3321-3334.
- Mahowald, N. M., Kloster, S., Engelstaedter, S., Moore, J. K., Mukhopadhyay, S., McConnell, J. R., Albani, S., Doney, S. C., Bhattacharya, A., Curran, M. A. J. and Flanner, M. G., 2010, Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22), 10875-10893.
- Mao, K. B., Ma, Y., Xia, L., Chen, W. Y., Shen, X. Y., He, T. J. and Xu, T. R., 2014, Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data, *Atmospheric environment*, 94, 680-686.
- Mao, R., Ho, C. H., Feng, S., Gong, D. Y. and Shao, Y., 2013, the influence of vegetation variation on Northeast Asian dust activity, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*,

- 49(1), 87-94.
- Masoumi, A., Khaledifard, H. R., Bayat, A. and Moradhaseli, R., 2013, Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran, *Atmospheric research*, 120, 343-355.
- Nakaya, T., 2014, GWR4 user manual. WWW Document. Available online: http://www.st-andrews.ac.uk/geoinformatics/wp-content/uploads/GWR4manual_201311.Pdf (accessed on 4 November 2013).
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E. and Gill, T. E., 2002, Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust derived from the nimbus7 toms absorbing aerosol product, rev, In *Reviews of Geophysics*.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Eriksson, P. G., Rautenbach, C. D. W., Flamant, C. and Vishkaee, F. A., 2014, Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations, *Natural hazards*, 71(1), 563-585.
- Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., Li, R. R., Ichoku, C., Levy, R. C., Kleidman, R. G. and Eck, T. F., 2005, The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, *Journal of the atmospheric sciences*, 62(4), 947-973.
- Sayer, A. M., Munchak, L. A., Hsu, N. C., Levy, R. C., Bettenhausen, C., and Jeong, M. J., 2014, MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e□Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24).
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., 2016, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, John Wiley & Sons.
- Shinoda, M., Gillies, J. A., Mikami, M. and Shao, Y., 2011, temperate grasslands as a dust source: Knowledge, uncertainties, and challenges, *Aeolian Research*, 3(3), 271-293.
- Tokunaga, M. and Thug, V. T., 2002, Finding the relationship between vegetation index and coherence signature to utilize the product of radar interferometry in land cover application. *Asian Association on Remote Sensing*.
- Wardlow, B. D., Egbert, S. L. and Kastens, J. H., 2007, Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the US Central Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 290-310.
- Wiggs, G. F. S., Livingstone, I., Thomas, D. S. G. and Bullard, J. E., 1994, Effect of vegetation removal on airflow patterns and dune dynamics in the southwest Kalahari Desert, *Land Degradation & Development*, 5(1), 13-24.
- Zhang, J. and Reid, J. S., 2009, an analysis of clear sky and contextual biases using an operational over ocean MODIS aerosol product, *Geophysical Research Letters*, 36(15).
- Zhang, J. and Reid, J. S., 2010, A decadal regional and global trend analysis of the aerosol optical depth using a data-assimilation grade over-water MODIS and Level 2 MISR aerosol products, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22), 10949-10963.
- Zou, X. K. and Zhai, P. M., 2004, Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D3).

Investigating the role of vegetation indices and geographic components on seasonal aerosol optical depth over Iran

Ahmadi, M.^{1*}, Shakiba, A. R.² and Dadashi Roudbari, A. A.³

1. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Ph.D. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 1 July 2018, Accepted: 25 Sep 2018)

Summary

Investigation of the role of vegetation indices and geographic components on seasonal aerosol optical depth (AOD) over the Iranian region is carried out. Aerosols are suspended particles in an air that have diameters between 0.001 and 100 micrometers. Aerosols play an important role in the radiation properties of atmosphere and hence affect the earth climate system. Vegetation cover can impede surface erosion by wind and hence, has a close relationship with the emission. Dust emission leading to dust events in urban area can have an adverse effect on human health as well as human activities, for example by reduction in visibility. This research aims to seasonally evaluate the roles of geographical locations and vegetation indices on AOD over Iran, based on satellite data. This includes the evaluations the role of each of these components in AOD550 nm variations.

In this study, the daily data of the 6-level 3 products (MYD08_M3_6) including AOD550 nm, Deep Blue Algorithm, MODIS sensor data, Aqua satellite data, are used. Pixel data were downloaded over the Iranian region from 2003 to 2017 with a spatial resolution of 1×1 arc. Two indicators, namely the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the Aqua Satellite, for the study period with AOD data were used. The optical sensitivity of aerosols data was verified using the Aqua Satellite data from the Aerosol Robotic Network (AERONET). The GWR and OLS methods were used to find the spatial relationships of aerial photo sensor optical depths with geographic location and vegetation indices.

The average values of AOD over Iran, based on the data of the Aqua, are between (0.11 for spring) and (0.16 for autumn) respectively. The average AOD value in the spring indicates the enhancement of dust events in the region. In winter, the average AOD value over Iran is 0.12, with the lowest standard deviation. In the summer, according to Aqua satellite data, this value is 0.133, with the maximum scatters and deviation from the largest mean observed value. Based on the EVI and NDVI indexes, the maximum statistical values, including the range of changes, maximum, average, scatter level and deviation from the typical values of both indicators were observed in the warm season of the year. The maximum EVI index peaked in the summer with 0.478 and the lowest of 0.043 in the winter. The maximum NDVI index, like the EVI index, was obtained for the summer with 0.777 and its lowest value is -0.69 for the spring.

The maximum correlation between the atmospheric optical depth and geographic components of the area is for the altitude and then the latitude and then the longitude. The correlation between the AOD with the altitude and latitude of location of the area is negative and significant, and the correlation of the AOD with longitude is not significant in any seasons. There is a negative correlation between AOD and NDVI, and also EVI index in all seasons, although it is 0.039 in winter, which is relatively low.

The results of the AOD assessment show that the maximum spring and autumn has the lowest average AOD over the Iranian area. This is due to the combination of dry conditions and relatively strong wind speeds in the spring those results in dust storms that increase the amount of AOD. In contrast, the maximum AOD over Iran is for the spring with a value of 0.48 that occurs in southwestern part of Iran. The second largest focal point, highlighted in all AOD seasons, is for the Persian Gulf coast area between Bushehr and Bandar Abbas. AOD over this coastal area can be associated with favorable wind conditions in mineral dust deposition which transported to the area and sea salt. Other areas with high AOD can be found in the Makran coastal area in the southeast of Iran, between the plain of Lut and the Mangrove plain, as pervious AOD study in southeastern Iran indicted. Based on the climate distribution of the EVI and NDVI vegetation indices and the seasonal spatial variation of aerosols, it is shown that vegetation factor in dust emission efficiency varies from one region to another with season. This regional disparity is due to the variation of vegetation-humus-release and the coupling of two or more of these factors; therefore, vegetation can significantly improve the treatment of dusty storm areas with the internal sources in the country. The maximum correlations with the geographic components of the location with the optical depth over the Iranian area are for the elevation and then the latitude and then the longitude. The correlation between the AOD with height and latitude is negative and with 5% level.

Keywords: Aerosol optical depth, Vegetation Indices, MODIS Sensor, Iran.

* Corresponding author:

ma_ahmadi@sbu.ac.ir