



پهنه‌بندی کانون‌های غبار ایران و بررسی عوامل شکل‌گیری آن‌ها

سارا مهندس سامانی، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف*
مسعود تجریشی، استاد تمام و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران گروه آب و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف

*پست الکترونیکی: samani.cv91@gmail.com

چکیده

ارائه‌ی روشی نوین در شناسایی پهنه‌های کانون غبار معدنی در مقیاس کشوری از ملاحظات این مطالعه است. به کمک سه آماره‌ی مهم عمق اپتیکی آئروسول به دست آمده از الگوریتم یک کیلومتری MAIAC سنجنده MODIS، آماده‌سازی آن‌ها در سامانه‌ی متن‌باز Earth Engine و سپس اعمال روش مکان‌یابی فازی در نرم‌افزار ArcGIS، رتبه‌ عضویت پهنه‌های کانونی در مجموعه کانون‌های مخاطره‌آمیز برای کشور ایران ارائه شده است. کانون‌های با رتبه عضویت متوسط در نواحی جنوب شرقی و جنوب غربی ایران با توجه به الگوی فعالیت‌شان گروه‌بندی شده و کلاس‌های کاربری اراضی برای هر گروه استخراج گردید. به کمک روش تحلیل مؤلفه اصلی از بین ۷ پارامتر شامل دمای سطح زمین، رطوبت سطحی خاک، شاخص پوشش گیاهی NDVI، بارش، دمای هوا، سرعت باد و شار تبخیر-تعرق، دو متغیر دمای سطح زمین و رطوبت سطحی خاک از سایر عوامل در توضیح پراکندگی مکانی فراوانی و میانگین AOD مهم‌تر شناخته شدند. توالی زمانی این دو متغیر به همراه فراوانی وقوع AzOD، وجود وقفه در رویدادهای غبار و لزوم بررسی توأم عوامل محیط‌زیستی جهت توضیح بهتر شکل‌گیری رویداد غبار را نتیجه داد. کلید واژه‌ها: رویداد غبار، پهنه‌بندی کانون غبار، MODIS، عمق اپتیکی، رطوبت.

۱- مقدمه

کانون‌یابی طوفان‌های غبار علاوه بر آنکه به شناخت بهتر فرآیند تولید غبار و محیط‌های مخاطره‌آمیز جهت هدفمندی بهتر اقدامات کنترلی کمک می‌کند، در مطالعات مربوط به اقلیم و سیستم اتمسفر نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. تا به حال روش‌های زیادی شامل برداشت اطلاعات شبکه‌های هواشناسی نظیر دید افقی و مقدار غلظت غبار، روش‌های دنبال کردن لاگراژی مسیر جریان توده‌ی هوای طوفانی به زمان عقب و سنجش از دور ذرات در باندهای فرابنفش و مرئی برای مطالعات کانون‌یابی استفاده شده است. روش‌های برداشت اطلاعات زمینی برای مطالعات محلی و تا مقیاس کشور استفاده شده‌اند، چرا که حجم داده‌های آن زیاد و نیازمند آماده‌سازی، برطرف نمودن داده‌های پرت^۱ و خلأهای درون آن است. روش‌های لاگراژی بازگشت به عقب برای مطالعات موردی طوفان مناسب هستند و روش‌های سنجش از دور نیز با دریافت تصاویر حجم بالای



ماهواره‌ای و سپس رؤیت چشمی طوفان‌ها و شناسایی همراه با خطای ناشی از نظارت دستی همراه هستند. در تحقیق حاضر سعی شده است بدون استفاده از روش‌های زمان‌بر جهت دریافت، پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، با اعمال دستورات برنامه‌نویسی بر روی تصاویر موجود در سرور سامانه‌ی قدرتمند ارت انجین^۲ نقشه‌ای با دقت مکانی بالا (یک کیلومتر) از فراوانی وقوع عمق اپتیکی مشاهده شده بالای ۰/۳ ایجاد شود. سپس با هم‌افزایی دو آماره‌ی میانگین و ضریب تغییرات مقادیر عمق اپتیکی، نقشه‌ی کانون‌های مخاطره‌آمیز کشور ایران ایجاد شود. اهداف مورد انتظار برآورده شده از این تحقیق به شرح زیر هستند:

۱. تعیین محدوده‌ی نواحی با میزان بالای فعالیت انتشار غبار به عنوان کانون‌های مخاطره‌آمیز.
۲. شناسایی عوامل مهم دخیل در پیدایش کانون‌ها از بین مجموعه پارامترهای آب‌وهوایی و شرایط زمین از جمله تغییرات کاربری‌ها در طی دوره زمانی مورد مطالعه.
۳. مشاهده روند تغییرات عوامل مهم شناخته شده در مرحله قبل در دو فصل تابستان و بهار برای کانون‌های مخاطره‌آمیز کشور.

فرضیات تحقیق

فرضیاتی که در این مطالعه به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شده و نتایج از آن بدست آمده‌اند، به شرح زیر هستند:

- ۱) شاخص عمق اپتیکی آئروسول بالای ۰/۳ به عنوان هوای غبارآلود در نظر گرفته شده است [۱]، [۲].
- ۲) غلظت ابر غبار در محل کانون‌ها بیشینه است و با دورشدن از محل کانون از غلظت آن کاسته می‌شود.
- ۳) از آنجایی که تصویربرداری ماهواره‌ای در ساعات مشخصی از شبانه‌روز صورت می‌گیرد و ممکن است در لحظه‌ی ثبت اطلاعات توسط سنجنده چندین ساعت از زمان شروع طوفان گذشته باشد، بنابراین فرض می‌شود با به حساب آوردن پارامتر میانگین عمق اپتیکی آئروسول سلول‌هایی از تصویر که علاوه بر فراوانی وقوع عمق اپتیکی بالای ۰/۳، میانگین عمق اپتیکی بالاتری نیز دارند به عنوان کانون در نظر گرفته شوند. در این صورت با وجود تأخیر زمانی بین ساعت تصویربرداری و زمان شروع طوفان، باز هم می‌توان گفت سلول در نظر گرفته شده به عنوان کانون تا حد زیادی درست انتخاب شده است؛ چون محل غلظت بیشینه به عنوان مرکز توده به موقعیت کانون نسبت داده می‌شود.
- ۴) در بررسی همبستگی مکانی بین موقعیت کانون‌های انتشار غبار و عوامل آب‌وهوایی موثر دخیل، ارتباطات به صورت خطی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین بررسی هماهنگی بین توالی زمانی این عوامل و فراوانی وقوع عمق اپتیکی آئروسول بالای حد آستانه، با فرض خطی بودن اثر این عوامل بر روی رویداد غبار انجام می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در بخش کاربری اراضی برای ارتقای آن از دقت تفکیک مکانی ۵۰۰ متری به ۳۰ متر، نقشه‌ی موجود در سامانه‌ی ارت انجین (Earth Engine) مربوط به سنجنده‌ی MODIS به عنوان نمونه‌ی آموزشی در الگوریتم جنگل تصادفی^۳ استفاده شده و تصاویر رزولوشن بالای لندست ۷ تحت طبقه‌بندی قرار گرفتند.

^۲ Earth Engine

^۳ Random Forest



جدول ۱- معرفی داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر.

نام داده	محصول	سنجنده	دقت تفکیک زمانی-مکانی	دسترسی زمانی
عمق اپتیکی آتروسل	MCD19A2	الگوریتم MAIAC سنجنده MODIS (هر دو ماهواره Terra و Aqua)	روزانه - ۱ کیلومتر	۲۰۰۰ میلادی تا کنون.
	MCD12Q1	MODIS (نمونه‌ی آموزشی)	سالانه - ۵۰۰ متری	۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ میلادی.
کاربری اراضی	USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1	سنجنده‌ی ETM+ / ماهواره‌ی LANDSAT 7 (نمونه‌ی تحت طبقه‌بندی)	۳۰ متری	۱۹۹۹ میلادی تا کنون.
دمای سطح زمین در روز	MYD11A1.006	MODIS (ماهواره‌ی Aqua)	روزانه - ۱ کیلومتری	۲۰۰۲ تا کنون.
بارش	PERSIANN-CDR ^۴	مدل PERSIANN	روزانه - ۰/۲۵ درجه	۱۹۸۳ میلادی تا کنون.
دمای هوا، شار تبخیر تعرق، رطوبت سطحی خاک	GLDAS2_1	داده‌ی شبیه‌سازی جهانی GLDAS ^۵	سه ساعته - ۰/۲۵ درجه	۲۰۰۰ میلادی تا کنون.
شاخص NDVI بین باند فرسوخ نزدیک و قرمز مرئی.	USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1	سنجنده‌ی ETM+ / ماهواره‌ی LANDSAT 7	۳۰ متری	۱۹۹۹ میلادی تا کنون.

برای تعیین کانون‌های واقع در منطقه به کمک داده‌ی عمق اپتیکی آتروسل استخراج شده از الگوریتم MAIAC سنجنده‌ی MODIS، الگوریتم‌های استخراج پارامتر فراوانی، میانگین مقادیر و ضریب تغییرات اعمال گردیده و سپس به کمک مفاهیم فازی در محیط ArcGIS نقشه‌ی نهایی بیانگر درصد مطلوبیت مکان‌ها برای انتخاب کانون غیر بدست آمده است. محصول AOD یک کیلومتری الگوریتم MAIAC در سامانه‌ی ارت انجین به صورت تصاویر روزانه با ۱۴ باند تعریف شده است، که باند دوم آن یعنی عمق اپتیکی آتروسل در طول موج ۰/۵۵ نانومتر جهت اعمال سه آماره‌ی موردنظر (فراوانی، میانگین و ضریب تغییرات)، انتخاب گردید. بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، دهه‌ی اخیر یعنی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ میلادی بوده و پارامتر فراوانی بیانگر درصد روزهایی از این ده سال می‌باشد که مقدار عمق اپتیکی آتروسل بالای حد آستانه‌ی ۰/۳ است. در توضیح آماره‌ی ضریب تغییرات می‌توان گفت که چون با خلاصه‌سازی داده‌ها به کمک شاخص گرایش به مرکز یعنی میانگین، قسمتی

^۴Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks- Climate Data Record

^۵ Global Land Data Assimilation System



از داده‌ها حذف شده و پراکندگی آن‌ها حول این شاخص به خوبی نشان داده نمی‌شود، بنابراین توزیع داده‌ها با لحاظ کردن شاخص پراکندگی بهتر مشخص می‌گردد.

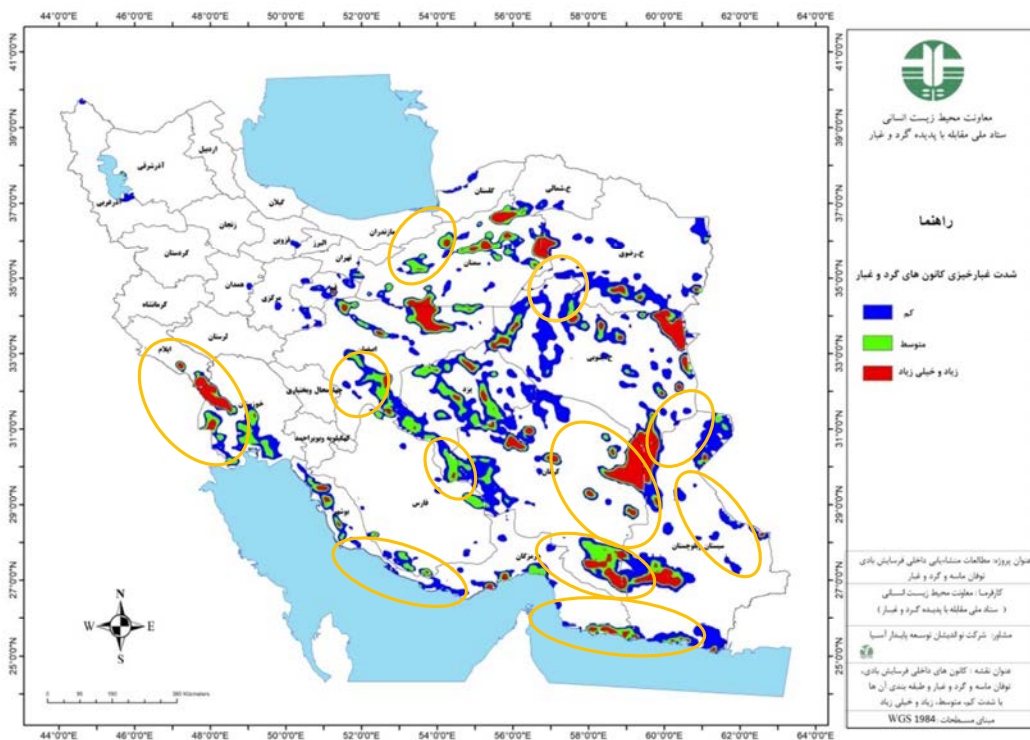
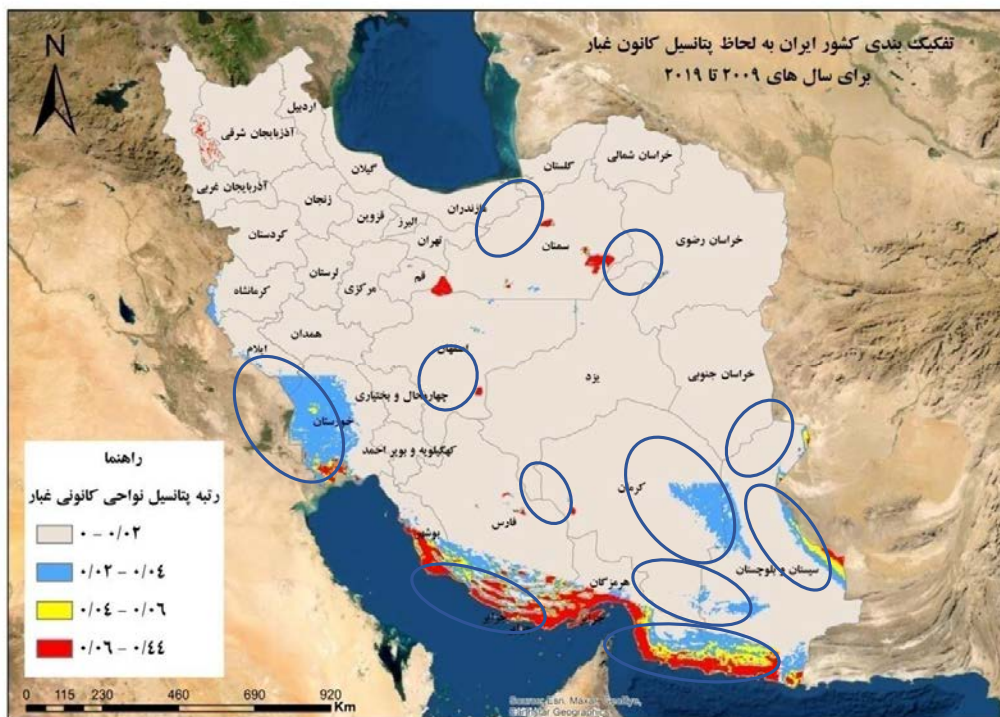
پس از آماده‌سازی لایه‌های مکانی سه آماری موردنظر در سامانه‌ی ارت انجین، توابع فازی در نرم‌افزار GIS آن‌ها را به بازه‌ی صفر تا یک نگاشت داده و در نهایت پس از برهم نهی فازی تصویری که در آن هر پیکسل یک کیلومتری درجه عضویت کانونی خود را نمایش می‌دهد، به عنوان نقشه‌ی کانون‌های کشور معرفی گردید. تابع مورد استفاده در بخش تغییر مقیاس لایه‌ها و برهم نهی آن‌ها به ترتیب توابع Large و Gamma است. تابع Large عضویت دهی را به این صورت انجام می‌دهد که هر چه مقادیر ارزش‌های پیکسلی فراوانی وقوع یا میانگین و ضریب تغییرات بالاتر باشد درجه عضویت آن‌ها در مجموعه کانون‌های غبار افزایش می‌یابد. تابع فازی Gamma که برای روی هم گذاری لایه‌ها استفاده شده است، یک قابلیت تعدیل در انتخاب مقادیر عضویت دهی ایجاد می‌کند؛ بدین صورت که اگر از تابع فازی And یا Or استفاده کنیم خروجی به ترتیب مقادیر عضویتی از بین این سه لایه است که کم‌ترین یا بیشترین مقدار را نسبت به لایه‌های دیگر داشته‌اند. اگر از تابع Sum یا Product استفاده شود حاصل آن به ترتیب یک نتیجه‌ی افزایشی و کاهشی از مقادیر عضویت سه لایه است. تابع گاما با ایجاد حاصل ضرب بین دو تابع اخیر، هر دو اثر کاهشی و افزایشی را اعمال می‌نماید. در رابطه ۱ فرمول‌بندی عملکرد این تابع ارائه شده است، که مقدار گاما در این مطالعه عدد ۰/۷ به دلیل تاکید بیشتر بر روی انتخاب مقادیر بالاتر عضویت مربوط به هر سه لایه انتخاب گردید، همچنین اعداد بزرگتر از این عدد تفاوتی در خروجی ایجاد نمی‌کنند.

$$Gamma = (FuzzySum)^{\gamma} (FuzzyProduct)^{1-\gamma} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در بخش شناسایی پارامترهای آب‌وهوایی اصلی و مؤثر بر روی رویداد غبار، روش تحلیل مؤلفه اساسی (PCA)^۶ با محاسبه‌ی نوعی ترکیب خطی متغیرها به مؤلفه‌های اصلی می‌رسد؛ به طوری که در مؤلفه‌ی اصلی اول، مجموع مربعات فواصل نمونه‌های تصویر شده بر روی این خط (خط PCI) تا مرکز حداکثر می‌شود. در این حالت نمونه‌ها در امتداد خط مربوط به مؤلفه‌ی اصلی اول بیشترین فاصله و جدایی را از هم داشته و نمونه‌های نزدیک به هم به معنای شباهت و قرارگیری آن‌ها در یک گروه تلقی می‌گردد. برای بهبود و کاهش زمان بررسی متغیرهای آب‌وهوایی و از آنجایی که این متغیرها ذاتاً از یکدیگر تأثیر می‌گیرند و وابسته‌ی یکدیگرند، این تحلیل بر روی هفت متغیر موردنظر در محیط ArcGIS اعمال گردید. هفت متغیر ورودی به صورت نقشه‌های میانگین فصلی ده ساله برای هر ناحیه‌ی کانونی کشور موردنظر انتخاب شده‌اند. جهت انتخاب تعداد مؤلفه‌ی اصلی موردنیاز به عنوان خروجی از این تحلیل، از آنجایی که ملاک استفاده از خروجی به دست آمده برای ادامه‌ی بررسی‌ها بر اساس درصد مقادیر ویژه مؤلفه‌ها خواهد بود، بنابراین پس از امتحان هر سه گزینه‌ی ۲، ۳ و ۴ مؤلفه‌ی خروجی، در نهایت از ۳ عدد استفاده شد. با اجرای PCA بر روی ورودی‌ها، ابعاد یا ویژگی‌های توصیف کننده‌ی هر سلول از تصویر ناحیه‌ی کانونی موردنظر از ۷ به ۳ کاهش می‌یابد و از بین سه مؤلفه‌ی به دست آمده برای هر ناحیه‌ی کانونی مورد بررسی، مؤلفه‌ای که بیشترین همبستگی را با دو پارامتر بیانگر غبار آلودی (میانگین و فراوانی وقوع AOD) دارد برای بررسی علت پیدایش کانون‌ها در مقیاس فصلی در نظر گرفته می‌شود. همبستگی مؤلفه‌ی انتخاب شده با ۷ متغیر اولیه نشان می‌دهد که کدام پارامتر آب‌وهوایی در ایجاد ترکیب این مؤلفه مؤثرتر بوده و بیشتر می‌تواند آن را توضیح دهد.

۴- نتایج و بحث

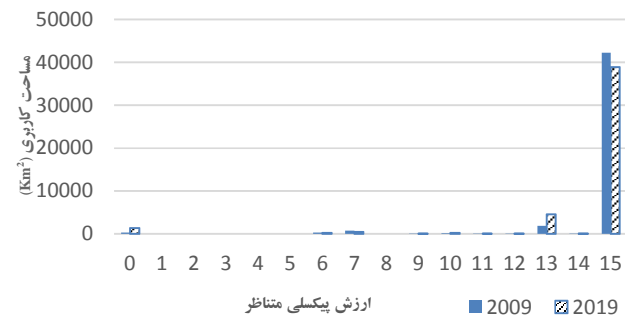
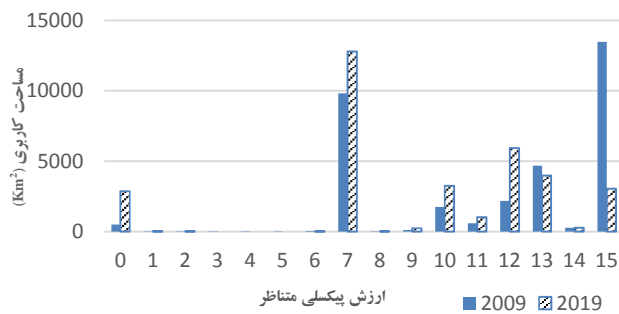
^۶ Principal Component Analysis



شکل ۱- تفکیک بندی کشور به لحاظ پتانسیل کانون غبار برای سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ میلادی، خروجی تحقیق حاضر، (تصویر ردیف بالا) و نقشه طبقه بندی کانون های داخلی با شدت های کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، مطالعه ای سازمان محیط زیست که برای ارزیابی نتایج تحقیق حاضر مورد استفاده قرار می گیرد، (تصویر ردیف پایین [۳]).



تغییر کاربری‌ها از سال ۲۰۰۹ به ۲۰۱۹ میلادی برای گروه کانونی جنوب شرق در نمودار ۱ و برای جنوب غرب در نمودار ۲ ارائه گردیده است. کاربری‌های غالب حال حاضر برای گروه کانونی جنوب شرق و جنوب غرب ایران به ترتیب به صورت بایر و بوته‌زار-مزارع-شهری است. در هر دو گروه زمین‌های بایر کاهش یافته‌اند و گاهی افزایش پوشش گیاهی در غالب افزایش سطح چمن‌زار و یا مزارع ظاهر شده است، که می‌توان گفت به عامل انسانی ربط دارد. نواحی شهری به جز قسمت‌های جنوب شرقی ایران، در گروه کانونی دیگر از مساحت سطح آن‌ها کاسته شده و پیکره‌های آبی در سال ۲۰۱۹ در هر دو گروه افزایش سطح داشته‌اند. رویش گیاهان خودرو مثل بوته‌زار و همچنین پدید آمدن بدنه‌های آبی به افزایش بارش مربوط می‌شود و می‌توان گفت نشانه‌های ظاهری خشکسالی در این کانون‌ها دیده نمی‌شود. کلاس کاربری مربوط به هر ارزش پیکسلی در نمودارهای تغییر کاربری در جدول ۲ ارائه شده است.



نمودار ۱- تغییر کاربری‌های کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران، از سال ۲۰۰۹ به ۲۰۱۹ میلادی. نمودار ۲- تغییر کاربری‌های کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران، از سال ۲۰۰۹ به ۲۰۱۹ میلادی.

جدول ۲- کلاس‌های کاربری متناظر با ارزش‌های پیکسلی [۴].

۰	پیکره آبی	۴	جنگل پهن برگ، برگ‌ریز	۸	دشت ساوانا با پوشش درختی بین ۳۰-۶۰٪	۱۲	مزارع
۱	جنگل سوزنی همیشه سبز	۵	جنگل ترکیبی	۹	دشت ساوانا با پوشش درختی بین ۱۰-۳۰٪	۱۳	شهری و ساختگی
۲	جنگل پهن برگ همیشه سبز	۶	بوته‌زار بسته (<۶۰٪)	۱۰	چمن‌زار	۱۴	ترکیب پوشش گیاهی طبیعی و مزارع
۳	جنگل سوزنی برگ‌ریز	۷	بوته‌زار باز (۶۰-۱۰٪)	۱۱	تالاب دائمی	۱۵	زمین بایر

پس از اجرای PCA برای دو فصل بهار و تابستان، خروجی‌های حاصل به‌طور نمونه تنها برای فصل بهار ارائه می‌گردد و نتایج مربوط به فصل تابستان به صورت تشریحی توضیح داده می‌شود. در فصل بهار گروه کانونی جنوب شرق ایران، مؤلفه‌ی اول به واسطه‌ی بیشتر بودن درصد مقدار ویژه‌ی آن نسبت به مؤلفه‌های دیگر از اهمیت بالاتری برخوردار بوده و بیشترین پراکندگی داده‌ها، یعنی ۷ پارامتر هواشناسی، در آن جای گرفته است (جدول ۳)؛ از طرفی مؤلفه‌ی سوم با مقدار ویژه‌ی ۹/۷ درصد، به عنوان جزء کوچکی از پراکندگی داده‌ها، همبستگی بالاتری با آماره‌های آتروسل دارد (جدول ۵). بنابر دو موضوع ذکر شده، هر دو مؤلفه‌ی اول و سوم (PC1 و PC3) جهت شناسایی پارامترهای آب‌وهوایی موثر مورد توجه قرار می‌گیرند، که در نهایت سه پارامتر دمای سطح زمین، رطوبت سطحی خاک و دمای هوا را نتیجه می‌دهد (جدول ۷). بر اساس همین منطق، این سه پارامتر برای



فصل بهار گروه کانونی جنوب غرب ایران نیز به عنوان تأثیر گذارترین عوامل محیط زیستی از بین ۷ پارامتر مدنظر این مطالعه بر روی توزیع مکانی آماره های غبارخیزی این نواحی شناخته شده اند (جدول ۴، ۶ و ۸). در فصل تابستان همبستگی مؤلفه ی اول برای کانون جنوب شرقی و مؤلفه های اول و دوم برای کانون جنوب غربی با آماره های غبارخیزی بیشتر بوده که این مؤلفه ها برای هر دو گروه کانونی به دو پارامتر دمای سطح زمین و رطوبت سطحی خاک اشاره می کنند. مطابق این توضیحات می توان گفت این دو پارامتر از جمله عوامل هواشناسی اصلی موثر بر فعالیت کانون های مورد مطالعه به شمار می آیند.

جدول ۳- درصد پراکندگی مؤلفه های اصلی، کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران، فصل بهار.
جدول ۴- درصد پراکندگی مؤلفه های اصلی، کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران، فصل بهار.

مقدار ویژه	درصد مقادیر ویژه	درصد تجمعی مقادیر ویژه	
۲/۱	۶۷/۳	۶۷/۳	PC1
۰/۷	۲۳/۰	۹۰/۳	PC2
۰/۳	۹/۷	۱۰۰/۰	PC3

مقدار ویژه	درصد مقادیر ویژه	درصد تجمعی مقادیر ویژه	
۲/۳	۵۵/۳	۵۵/۳	PC1
۱/۷	۴۰/۵	۹۵/۸	PC2
۰/۲	۴/۲	۱۰۰/۰	PC3

جدول ۵- همبستگی بین ۳ مؤلفه اصلی با مقادیر متوسط و فراوانی وقوع، کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران، فصل بهار.
جدول ۶- همبستگی بین ۳ مؤلفه اصلی با مقادیر متوسط و فراوانی وقوع، کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران، فصل بهار.

PC3	PC2	PC1	
۰/۵۲	-۰/۰۷	۰/۰۴	متوسط AOD
۰/۶۰	-۰/۱۳	-۰/۰۶	فراوانی وقوع AOD > ۰/۳

PC3	PC2	PC1	
۰/۴۷	-۰/۱۹	-۰/۱۳	متوسط AOD
۰/۵۸	-۰/۱۵	۰/۰۲	فراوانی وقوع AOD > ۰/۳

جدول ۷- همبستگی بین ۳ مؤلفه اصلی با پارامترهای قبلی، کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران، فصل بهار.

Air_T	precip	wind	NDVI	moist	ET	LST	
۰/۵۵	-۰/۱۲	۰/۰۷	-۰/۰۱	-۰/۶۹	-۰/۲۸	۰/۹۳	PC1
۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۲۶	-۰/۱۲	۰/۷۴	۰/۱۷	۰/۲۸	PC2
۰/۸۳	۰/۰۷	-۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۰۰۲	-۰/۲۰	-۰/۰۹	PC3

جدول ۸- همبستگی بین ۳ مؤلفه اصلی با پارامترهای قبلی، کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران، فصل بهار.

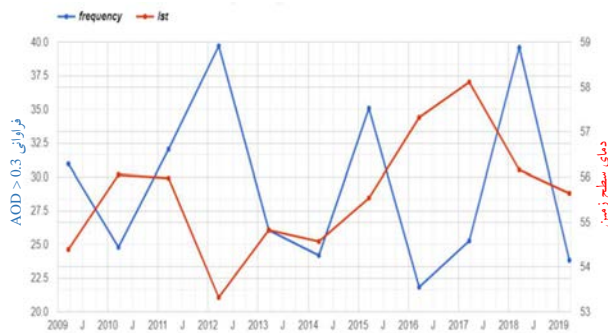
Air_T	precip	wind	NDVI	moist	ET	LST	
-۰/۰۴	۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۶۰	-۰/۱۹	-۰/۱۱	۰/۹۸	PC1
-۰/۱۲	۰/۲۱	-۰/۳۶	-۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۱۴	PC2
۰/۹۷	-۰/۸۷	۰/۸۳	-۰/۲۵	۰/۰۲	-۰/۸۳	۰/۰۱	PC3

سری های زمانی مربوط به دو پارامتر مهم شناخته شده ی دمای سطح زمین و رطوبت سطحی خاک برای گروه کانونی جنوب شرق ایران در فصل بهار و تابستان، در برخی سالها رابطه ی خطی خوبی را به طور معکوس با فراوانی وقوع AOD بالای حد آستانه را نشان می دهد. برای مثال مقادیر متوسط رطوبت سطحی خاک در فصل بهار طی سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ میلادی همزمان با بیشترین تغییر از ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع در سال ۲۰۱۸ به ۱۴ کیلوگرم بر مترمربع در سال ۲۰۱۹، میزان فراوانی وقوع

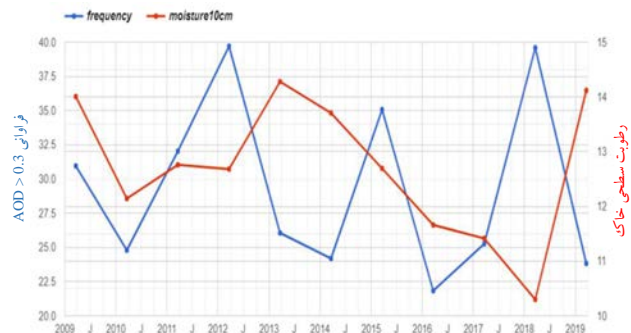


عمق اپتیکی آتروسل از عددی معادل با ۴۰ درصد روزهای بهار به ۲۸ درصد رسیده است (نمودار ۳). تغییرات دمای سطح زمین نیز برای این گروه کانونی به گونه‌ای است که در اکثر سال‌های دارای بیشترین فراوانی رویداد فصل بهار، دمای سطح زمین در بهار آن سال کاهش یافته است (نمودار ۴). در فصل تابستان این کانون‌ها برای رطوبت سطح زمین مشاهده می‌شود که قله و قعر نمودار فراوانی به ترتیب با یک قعر و قله در نمودار رطوبت همراه است، اما برای دمای سطح زمین ارتباط خطی قوی مشاهده نشد (خروجی‌های مربوط به فصل تابستان به جهت اختصار ارائه نمی‌گردد).

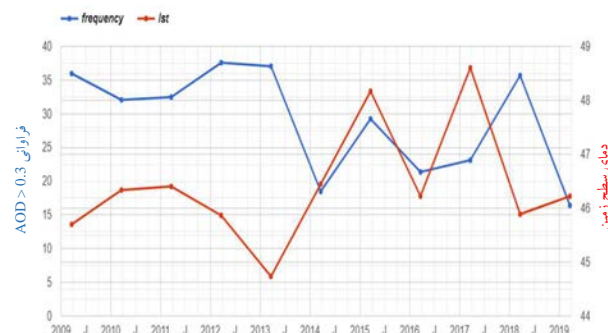
در گروه کانونی جنوب غرب نیز هر دو پارامتر آب و هوایی شناسایی شده ارتباط خطی خوبی را به صورت عکس با آماره‌ی فراوانی عمق اپتیکی آتروسل بالای حد آستانه نشان داده‌اند؛ به عنوان مثال در نمودار ۵، کمترین مقدار رطوبت خاک در بهار سال ۲۰۱۲ معادل ۱۷/۴ کیلوگرم بر مترمربع همزمان با فراوانی رویداد ۳۷/۶ درصدی یعنی بیشترین مقدار آن در این بازه‌ی ده ساله است و کمترین فراوانی رویداد برابر با ۱۶/۴ درصد در بهار سال ۲۰۱۹ می‌باشد، که رطوبت خاک به بیشترین مقدار خود (۲۰ کیلوگرم بر مترمربع) در دوره‌ی ده ساله‌ی ۲۰۱۹-۲۰۰۹ رسیده است. تقعر و تحدب سری زمانی دمای سطح زمین (نمودار ۶) نیز برای این کانون‌ها به ترتیب با برآمدگی و فرورفتگی‌های نمودار فراوانی AOD هماهنگ است. اما در فصل تابستان کانون‌های جنوب غرب شرایط کمی متفاوت بوده و سری زمانی فراوانی عمق اپتیکی آتروسل بالای حد آستانه از پیچیدگی بیشتری برخوردار است؛ چرا که ارتباطات خطی خوبی مشاهده نگردید.



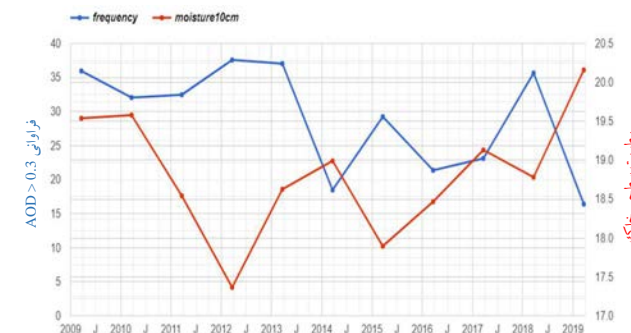
نمودار ۴- سری زمانی متوسط فصلی دمای سطح زمین، فصل بهار، کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران.



نمودار ۳- سری زمانی متوسط فصلی رطوبت سطحی خاک، فصل بهار، کانون رتبه متوسط در جنوب شرق ایران.



نمودار ۶- سری زمانی متوسط فصلی دمای سطح زمین، فصل بهار، کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران.



نمودار ۵- سری زمانی متوسط فصلی رطوبت سطحی خاک، فصل بهار، کانون رتبه متوسط در جنوب غرب ایران.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری



با استفاده از رابط برنامه نویسی جاوا در سامانه‌ی قدرتمند Earth Engine بدون نیاز به بارگیری تصاویر حجم بالای ماهواره‌ای و انجام محاسبات زمان‌بر تصحیحاتی، محاسبات آماری بر روی تمامی داده‌های این سامانه صورت پذیرفت. مقایسه‌ی بین پهنه‌های کانونی به دست آمده از این روش با نقاط کانونی معرفی شده توسط مطالعه‌ی مرجع این تحقیق نشان داد که نواحی کانونی مرزی به خوبی توسط این روش شناسایی شده‌اند و کانون‌های شناسایی شده در داخل و مرکز ایران نیز بیشتر به محل بیابان‌ها، تالاب‌ها و دریاچه‌های خشک شده اشاره دارند، اما تمامی کانون‌های استان‌های یزد، خراسان، اصفهان و سمنان را شناسایی نکرده و بنابراین، این روش برای شناسایی سریع و اولیه‌ی کانون‌ها در مطالعات بزرگ مقیاس مناسب است. تغییرات ده ساله‌ی کاربری اراضی برای این نواحی کانونی، نشانه‌ای از خشکسالی را نشان نداد، همچنین نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌ی اصلی دو عامل رطوبت سطحی خاک و دمای سطح زمین را در پیدایش کانون‌ها به عنوان عواملی کلیدی در توضیح پراکندگی مکانی کانون‌های ایران در مقیاس فصلی معرفی نمود. بررسی سری زمانی این دو پارامتر نکات زیر را به دست می‌دهد:

۱. فرض خطی بودن در مورد ارتباط بین پارامترهای مهم آب‌وهوایی موثر و آماره‌های غبارخیزی نواحی کانونی تا حدی جهت ساده‌سازی روابط و توضیح آن‌ها مناسب است، اما باید پیچیدگی رفتار فعالیتی کانون‌ها در تولید غبار نیز مورد توجه قرار گیرد.
۲. جهت تفسیر بهتر در مورد ارتباط بین پارامترهای غبارخیزی نظیر عمق اپتیکی آئروسل و پارامترهای اقلیمی، لازم است تا وضعیت غبارخیزی با مجموعه‌ای از عوامل آب‌وهوایی مدنظر قرار گرفته و یک عامل به تنهایی دیده نشود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود این مورد با ایجاد یک شاخص در برگیرنده‌ی این عوامل لحاظ گردد.
۳. به منظور جست‌وجوی نشانه‌هایی از اثر تغییر عوامل آب‌وهوایی بر روی تغییر آماره‌های غبارخیزی، این نکته باید مدنظر قرار گیرد که تغییرات پیش‌آمده در رویدادهای غبار با تأخیر همراه هستند؛ بنابراین انتظار هم‌زمانی آن‌ها با تغییرات عوامل اقلیمی نمی‌رود و ممکن است اثر تغییر عوامل جوی بر روی رویدادهای غبار در فصل و یا سال بعد مشاهده گردد.

۶- مراجع

- [1] A. Moridnejad, N. Karimi, and P. A. Ariya, "A new inventory for middle east dust source points," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, no. 9, p. 582, 2015.
- [2] P. Ginoux, J. M. Prospero, T. E. Gill, N. C. Hsu, and M. Zhao, "Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products," *Rev. Geophys.*, vol. 50, no. 3, pp. 1–36, 2012, doi: 10.1029/2012RG000388.
- [۳] سازمان حفاظت محیط زیست (معاونت محیط زیست انسانی و ستاد ملی مقابله با پدیده گردوغبار), "مطالعات منشأ یابی داخلی فرسایش بادی، توفان‌های ماسه و گرد و غبار کشور (خلاصه گزارش کشوری)", "۱۳۹۸.
- [4] D. Sulla-menashe and M. A. Friedl, "User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product," no. Figure 1, pp. 1–18, 2018.