

پیش‌بینی توزیع مکانی فصلی و سالانه گردوغبار در ایران

با استفاده از مدل جفت‌شده RegCM4

فاطمه درگاهیان^{۱*}، علیرضا بالان‌فرد^۲، سمیه حیدرنژاد^۳، طاهره آقازاده^۴، سید جعفر سید اخلاقی^۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

چکیده

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی توزیع مکانی فصلی و سالانه گردوغبار در ایران با استفاده از مدل جفت‌شده RegCM4 تحت سناریوی اقلیمی RCP4.5 برای افق‌های ۲۰۳۰-۲۰۴۰ و ۲۰۵۰-۲۰۶۰ انجام شد. به این منظور، داده‌های شرایط مرزی برگرفته از مدل پیش‌بینی اقلیمی RegCM با قدرت تفکیک زمانی ۶ ساعت و پوشش زمانی تا سال ۲۱۰۰، به عنوان ورودی به مدل منطقه‌ای RegCM4 با تفکیک افقی ۴۰ کیلومتر جهت انجام پیش‌بینی‌های بلندمدت معرفی گردید. بر اساس یافته‌ها، کانون‌های داخلی گردوغبار در استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، خراسان جنوبی، خراسان رضوی، خوزستان، بوشهر، هرمزگان و اصفهان و کانون‌های خارجی مؤثر در شمال عربستان (مرز عراق، کویت و ایران) و شمال شرق ایران (مرز ترکمنستان) شناسایی شدند. الگوهای فصلی نشان داد کانون سیستان و بلوچستان در تمام فصول فعال بوده و در پاییز و زمستان بر حجم ذرات آن افزوده می‌شود و کانون خوزستان با غبار دائمی، بیشترین غلظت را در بهار دارد. نتایج مدل‌سازی حاکی از افزایش میزان غبار تولیدی و تعداد رخدادهای گردوغبار در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ نسبت به شرایط فعلی است و کانون‌های جدیدی در ترکمنستان و نزدیکی مرزهای ایران شکل گرفته‌اند. با توجه به تفکیک ۴۰ کیلومتری مدل، تنها کانون‌هایی با مساحت بیش از ۱۶۰۰ کیلومتر مربع قابل آشکارسازی هستند. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت منطقه‌ای گردوغبار با تأکید بر کانون‌های فرامرزی و تغییرات اقلیمی آتی را آشکار می‌سازد.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی گردوغبار، RegCM، RCP4.5، توزیع فصلی، ریزمقیاس نمایی، کانون گردوغبار.

۱. دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات بیابان موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: fatemeh.dargahian@gmail.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، هواشناسی اداره کل هواشناسی استان البرز، کرج، ایران.

۳. محقق بیابان‌زدایی، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، پردیس تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی بروجرد.

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران.

۵. استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران.

مقدمه

مدل منطقه‌ای اقلیم RegCM^۱ که توسط مرکز بین‌المللی فیزیک نظری (ICTP) توسعه یافته است، به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های منطقه‌ای، نقشی محوری در شبیه‌سازی پدیده‌های اقلیمی ازجمله گردوغبار ایفا می‌کند (زاکی^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). این مدل با فعال‌سازی ماژول شیمی (RegCM-Chem) قابلیت شبیه‌سازی چرخه کامل ذرات غبار معدنی شامل گسیل، انتقال و ته‌نشینی را داراست (سالمن^۳ و همکاران، ۲۰۰۹) و فرآیندهایی نظیر سرعت باد آستانه، رطوبت خاک، بافت خاک و ته‌نشینی تر و خشک را پوشش می‌دهد (تسکریدیکیس^۴ و همکاران، ۲۰۱۷). در سطح بین‌المللی، پژوهش‌های متعددی به بهبود طرح‌واره‌های گسیل و ارزیابی حساسیت مدل به شرایط مرزی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، کوزو و یاووز^۵ (۲۰۲۱) با مقایسه طرح‌واره‌های زاکی و کاک^۶ در بیابان صحرا نشان دادند که طرح زاکی مقادیر نزدیک‌تری به اندازه‌گیری‌های میدانی ارائه می‌دهد، هرچند این نزدیکی ناشی از بیش‌برآوردی ذرات ریزتر از یک میکرومتر است؛ درحالی‌که طرح کاک از نظر قطر میانه جرمی به واقعیت نزدیک‌تر بود. همچنین، تحقیقات در جنوب غرب آسیا حاکی از آن است که اعمال شرایط مرزی واقعی برای غلظت گردوخاک می‌تواند عمق نوری آئروسول را تا ۳۰ درصد در ماه‌های تابستان افزایش داده و نتایج مدل را به مشاهدات ماهواره‌ای نزدیک‌تر کند (مارسلا و التاهیر^۷، ۲۰۱۰). در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا نیز مشخص شده است که استفاده از داده‌های باز تحلیل ERA-Interim به‌جای داده‌های پیش‌بینی GFS از بیش‌برآوردی گردوخاک جلوگیری می‌کند و افزایش ضریب فرسایش‌پذیری خاک از یک به ۵/۵، خطای مدل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد

(مصطفی و همکاران، ۲۰۲۳). در داخل ایران، مطالعات متعددی کارایی مدل RegCM را در شبیه‌سازی گردوغبار تأیید کرده‌اند. یک مطالعه با تفکیک افقی ۴۰ کیلومتر در جنوب و جنوب شرق ایران نشان داد که مدل قادر به شناسایی نقاط پرخطر بوده و بیشترین فراوانی گردوغبار به ترتیب در استان‌های سیستان و بلوچستان (۴۸ درصد)، هرمزگان (۲۷ درصد) و فارس (۱۶ درصد) رخ داده است (مفیدی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک پاییزی در حوضه دریاچه ارومیه حاکی از همبستگی ۰/۸۴ میان نتایج مدل با تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های MERRA-2 بود (گلزاری پرتو، ۲۰۱۵). مرور منابع نشان می‌دهد که مدل RegCM ابزاری قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای شناسایی کانون‌های غبار محلی و فرامرزی است (زرگری^۸ و همکاران، ۲۰۲۴)، با این حال چالش اصلی آن، حساسیت بالا به پارامترهای ورودی و تمایل به بیش‌برآوردی مقادیر غبار است که از طریق کالیبراسیون ضریب فرسایش‌پذیری و استفاده از داده‌های مرزی مناسب قابل اصلاح است (خوزو و یاووز، ۲۰۲۱). باوجود کارایی مذکور، در ایران تاکنون پیش‌بینی دینامیکی گردوغبار با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی توسط یک مدل منطقه انجام نشده است و رویکرد غالب، مبتنی بر اخذ نقشه از مدل‌های جهانی یا پیش‌پردازش آماری خروجی مراکز بین‌المللی می‌باشد که امکان تغییر پیکربندی و انتخاب طرحواره‌های متناسب با اقلیم محلی ایران را فراهم نمی‌سازد. هرچند مطالعاتی محدود و موردی مانند شناسایی ساختار و چشمه‌های گردوخاک استان خراسان شمالی با استفاده از مدل RegCM برای شرایط موجود و نه آینده انجام شده است (فاروقی و همکاران، ۲۰۱۷)؛

1 Regional Climate Model

2 Zakey

3 Solmon

4 Tsikerdekis

5 Kuzu & Yavuz

6 Kok

7 Marcella & Eltahir

8 Zargari

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی توزیع مکانی فصلی و سالانه گردوغبار در ایران و نواحی اطراف با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی انجام شد تا از طریق یک مدل منطقه‌ای با تفکیک مکانی بالا، فرآیندهای محلی مؤثر بر تولید، حمل و ته‌نشینی گردوغبار را با دقت بیشتری شبیه‌سازی نماید.

مواد و روش‌ها

۱- داده‌های شرایط مرزی

داده‌های شرایط مرزی موردنیاز برای اجرای مدل منطقه‌ای از پایگاه داده پیش‌بینی اقلیمی عبدالسلام تهیه شد. این داده‌ها دارای قدرت تفکیک زمانی شش ساعته بوده و بازه زمانی آن تا سال ۲۱۰۰ ادامه می‌یابد. کلیه متغیرهای هواشناسی موردنیاز از جمله دما، بارش، رطوبت، باد، فشار سطح دریا و شارهای تشعشعی در این پایگاه داده موجود است. داده‌های مذکور جهت ریزمقیاس‌نمایی به مدل منطقه‌ای RegCM4 معرفی گردیدند.

۲- مدل منطقه‌ای RegCM4

مدل منطقه‌ای اقلیمی RegCM4 که نسخه چهارم این مدل می‌باشد، توسط مرکز بین‌المللی فیزیک نظری (ICTP) در ایتالیا توسعه یافته است. این مدل یکی از پرکاربردترین مدل‌های منطقه‌ای برای شبیه‌سازی اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. در این پژوهش از مدل RegCM4 با تفکیک افقی ۴۰ کیلومتر استفاده شد. این تفکیک حاصل تعادل بین دقت مکانی موردنیاز برای آشکارسازی کانون‌های گردوغبار و هزینه محاسباتی اجرای مدل است. مدل دارای ۲۳ تراز قائم از نوع سیگما-فشار است که تروپوسفر تحتانی و میانی را به‌خوبی پوشش می‌دهد. منطقه مورد مطالعه شامل ایران و نواحی همجوار یعنی محدوده عرض‌های ۲۵ تا ۴۵ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی در نظر گرفته شد تا پوشش کاملی از کانون‌های داخلی و خارجی مؤثر بر ایران فراهم آید. گام زمانی مدل ۱۲۰ ثانیه انتخاب گردید تا شرایط پایداری عددی رعایت شود. برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی جو از

طرحواره همرفت Emanuel استفاده شد که برای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مناسب است. طرحواره لایه مرزی از نوع Holtslag انتخاب گردید که دقت مناسبی در شبیه‌سازی تلاطم جوی دارد. طرحواره تشعشع از نوع جامعه آماری اصلاح‌شده مرکز ملی تحقیقات جوی آمریکا بود و برای شبیه‌سازی فرایندهای سطح زمین نیز از طرحواره BATS نسخه e۱ استفاده شد. مؤلفه جوی مورد استفاده در سیستم پیش‌بینی RegCM4 برگرفته از مدل GFS یا سیستم پیش‌بینی جهانی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا (NCEP) است. این مؤلفه دارای تفکیک افقی طیفی به‌صورت برش مثلثی با ۱۲۶ موج بوده و در راستای قائم دارای ۶۴ تراز هیبریدی فشار-سیگما از سطح زمین تا حدود ۱۰ هکتوپاسکال می‌باشد. مختصات قائم آن مشابه سیستم داده‌گذاری اقلیمی CDAS است.

۳- مدل جفت‌شده اقیانوس-جو

یکی از نوآوری‌های اساسی این پژوهش استفاده از مدل جفت‌شده اقیانوس-جو به‌جای مدل صرفاً جوی بود. چراکه مدل‌های پیش‌بینی عددی جفت‌شده جوی-اقیانوسی (MOM3) برای پیش‌بینی‌های بلندمدت به‌کار می‌روند (براکي و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش از مدل اقیانوسی MOM3 استفاده شد که نسخه سوم مدل مدولار اقیانوس است. این مدل جایگزین نسخه اول MOM شده است. تفکیک افقی مدل اقیانوسی یک درجه بود با این تفاوت که در نواحی استوایی تا یک‌سوم درجه تشدید می‌شد. مدل اقیانوسی دارای ۴۰ تراز عمودی بوده و ناحیه تحت پوشش آن به‌جای محدود شدن به اقیانوس آرام، به‌صورت جهانی در نظر گرفته شد. همچنین جفت‌شدگی جو و اقیانوس، تقریباً به‌صورت جهانی هر ۲۴ ساعت یک‌بار اعمال گردید.

۴- سناریوهای اقلیمی

در این پژوهش از سناریوی RCP4.5 استفاده شد. این سناریو که توسط هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC 2021) تعریف شده است، محتمل‌ترین سناریو برای اجرا و رخداد اقلیمی، انتشار گازهای گلخانه‌ای است. سناریوی RCP4.5 با اندکی تعدیل نسبت به سناریوی RCP2.6 واقع‌بینانه‌تر ارزیابی می‌شود. رخداد این سناریو منوط به آن است که تمامی ۱۹۵ کشور عضو اجلاس کنوانسیون تغییرات آب و هوایی که در دسامبر ۲۰۱۵ در پاریس تشکیل شد، به تعهدات خود مبنی بر کاهش گازهای گلخانه‌ای عمل نمایند.

فرآیند اجرای مدل

فرآیند اجرای مدل در این پژوهش شامل چندین گام متوالی بود. در گام اول، داده‌های شرایط مرزی جهانی با تفکیک زمانی شش ساعته از پایگاه داده عبدالسلام برای دو دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ تا ۲۰۶۰ دانلود شد. برای تثبیت مدل و حذف اثر شرایط اولیه، یک دوره واسنجی سه‌ماهه در نظر گرفته شد. در گام دوم که پیش‌پردازش داده‌ها نام دارد، داده‌های جهانی با تفکیک تقریبی ۱۰۰ کیلومتر به تفکیک ۴۰ کیلومتری مدل منطقه‌ای درون‌یابی شدند. متغیرهای موردنیاز از جمله دما، رطوبت، بادهای تراز پایین و شار غبار از داده‌های اصلی استخراج گردید و کنترل کیفی و بررسی مرزهای دامنه انجام شد.

در گام سوم، پیکربندی مدل منطقه‌ای انجام گرفت. دامنه محاسباتی به صورت یک مستطیل به ابعاد ۱۵۰ سلول در جهت طول جغرافیایی و ۱۲۰ سلول در جهت عرض جغرافیایی تعریف شد. پارامترهای فیزیک مدل مطابق با مقادیر بهینه برای اقلیم ایران تنظیم گردید. همچنین متغیرهای خروجی موردنظر شامل میدان غبار، باد، دما و بارش تعیین شدند.

گام چهارم شامل اجرای اصلی مدل بود. مدل برای هر یک از دو دوره ۱۰ ساله به صورت جداگانه اجرا شد. برای اطمینان

از پایداری نتایج، هر دوره دو بار و با شرایط اولیه متفاوت اجرا گردید. خروجی‌های مدل به صورت میانگین ماهانه، فصلی و سالانه ذخیره شدند.

در گام پنجم، پس‌پردازش و تحلیل نتایج انجام گرفت. میانگین ۱۰ ساله برای هر یک از چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان محاسبه شد. نقشه‌های توزیع مکانی غبار برحسب کیلوگرم بر مترمربع تولید گردید. در نهایت، کانون‌های غبار داخلی و خارجی بر اساس نقشه‌های تولید شده شناسایی و طبقه‌بندی شدند.

این پژوهش با چند محدودیت روش شناختی اساسی مواجه بود. نخستین محدودیت مربوط به تفکیک مکانی مدل می‌باشد. با توجه به تفکیک افقی ۴۰ کیلومتری مدل RegCM4، کوچک‌ترین کانون قابل آشکارسازی دارای مساحت یک سلول مدل یعنی ۱۶۰۰ کیلومترمربع خواهد بود. دومین محدودیت مربوط به افق زمانی پیش‌بینی است. هرچه از زمان اجرای صفر به سمت آینده فاصله بگیریم، مقادیر عددی خروجی‌های پیش‌یابی شده با زمان دچار خطای بیشتری می‌شود. به عبارت دیگر، خطای پیش‌بینی به صورت غیرخطی با افزایش سن پیش‌بینی افزایش می‌یابد.

متغیر اصلی خروجی در این پژوهش، شار غبار تولید شده برحسب کیلوگرم بر مترمربع بود. این متغیر برای چندین بازه زمانی متفاوت محاسبه گردید. میانگین فصلی که بر اساس میانگین سه‌ماهه محاسبه شده است، برای شناسایی الگوی فصلی فعالیت کانون‌های غبار مورد استفاده قرار گرفت. میانگین سالانه که بر اساس میانگین ۱۰ ساله محاسبه شد. مدل برای دو دوره ۱۰ ساله ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ تا ۲۰۶۰ اجرا شد و میانگین‌های فصلی و سالانه استخراج شدند. در نهایت، با پس‌پردازش و تحلیل الگوهای مکانی- زمانی غبار، کانون‌های داخلی و خارجی گردوغبار شناسایی شد.

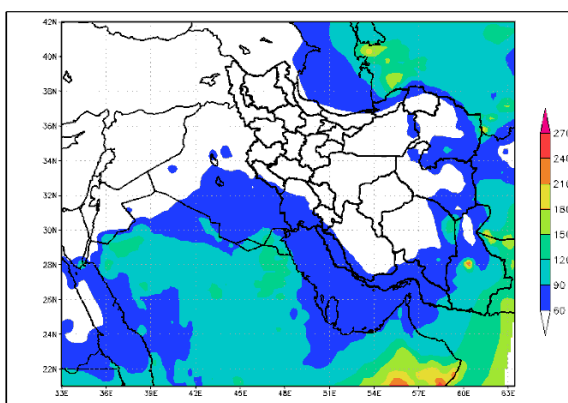
نتایج

الگوهای غبار به صورت فصلی سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰

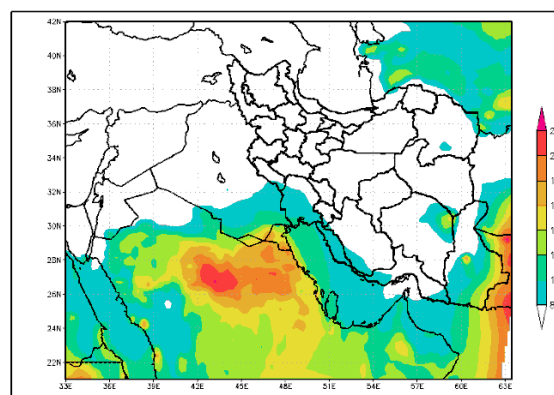
الگوهای غبار میانگین فصل‌های مختلف از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ در شکل ۱ تا ۴ آمده است. با توجه به الگوی میانگین فصل‌ها می‌توان به خرد کانون‌های داخلی و استانی اشاره کرد که در تمام فصل‌ها به صورت مشترک و با اندکی شدت و ضعف قابل مشاهده است از جمله: کانون کوچکی در استان سیستان و بلوچستان مشاهده شد که در تمام فصول وجود داشت و در فصل پاییز و زمستان بر حجم ذرات آن افزوده شده است (شکل ۳ و ۴). کانون خرد دیگری که باز هم در تمام فصل‌ها دیده شده در شمال غربی استان سیستان واقع شده است و مرز مشترک با جنوب استان خراسان جنوبی و کرمان و سیستان دارد که با توجه به مقادیر گسیل و فعالیت آن و محدوده اثر آن دارای قدرت بیشتر از کانون قبلی است. کانون بعدی تقریباً در جنوب استان

خراسان رضوی مشاهده شد که به تازگی تشکیل شده و در حال بلوغ است و وضعیت آن تنها در فصل بهار قابل اعتنا است. کانون‌های واقع در استان خوزستان به دلیل غبارآلود بودن، دائمی هستند اما در فصل بهار (شکل ۱) بیشتر از فصول دیگر غلظت دارد. کانون‌های واقع در استان بوشهر، هرمزگان و نیمه غربی استان فارس که باز به دلیل مشابه می‌تواند موجب غبار محلی شود.

از کانون‌های خارجی اثرگذار در کانونی واقع در نیمه شمالی عربستان است که گاه خود را بالا کشیده و هسته‌های فعال آن روی مرز عراق و کویت و عربستان و ایران قرار می‌گیرد. کانون خارجی و اثرگذار دیگر مربوط به منطقه شمال شرق ایران و نواحی مرزی و داخلی کشور ترکمنستان با ایران و دارای یک یا چند کانون فعال است.



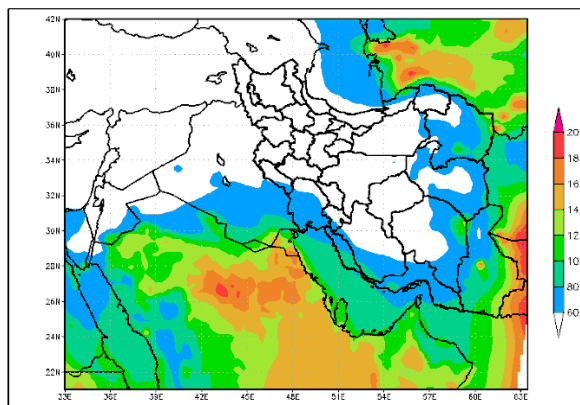
شکل ۲- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در فصل تابستان سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۴۰ [kg/m²]



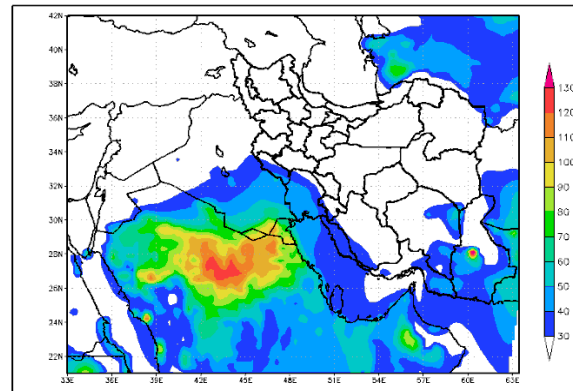
شکل ۱- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در فصل بهار سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۴۰ [kg/m²]

محدوده بیشتر از کانون سیستان است. کانون‌های واقع در استان خوزستان به دلیل غبارآلود بودن دائمی آن کل استان را آلوده نموده است و به این دلیل مرکز کانون قابل تشخیص و تفکیک افقی مدل به میزان کافی نیست (شکل ۵ تا ۸). مطابق شکل میانگین کانون‌های واقع در استان بوشهر که باز به دلیل مشابه می‌تواند موجب غبار محلی شود و به این دلیل کانون اصلی در این استان دیده نمی‌شود، زیرا تفکیک افقی ۴۰ کیلومتر توان آشکار نمودن آن را ندارد. خرد کانون‌های شمال استان اصفهان که محدوده وسیعی از شمال تا شمال شرق استان کشیده شده و در فصول مختلف فعال می‌شود. کانون‌های غبار استان هرمزگان در بخش‌های غربی و شرقی استان دیده می‌شود. از کانون‌های خارجی اثرگذار در منطقه همان‌طوری که قبلاً گفته شد کانونی واقع در نیمه شمالی عربستان است که گاه خود را بالا کشیده و هسته‌های فعال آن روی مرز عراق و کویت و عربستان و ایران قرار می‌گیرد.

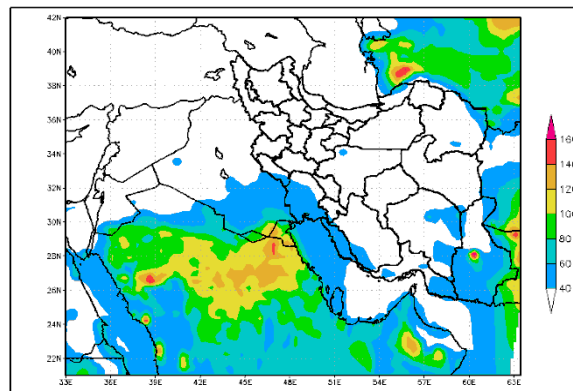
دیگر کانون خارجی و اثرگذار مربوط به منطقه شمال شرق ایران و نواحی مرزی و داخلی کشور ترکمنستان با ایران بوده که دارای یک یا چند کانون فعال است.



شکل ۵- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده فصل بهار سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۶۰ [kg/m²]



شکل ۳- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در فصل پاییز سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۴۰ [kg/m²]



شکل ۴- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در فصل زمستان سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۴۰ [kg/m²]

الگوهای غبار به صورت فصلی سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۶۰

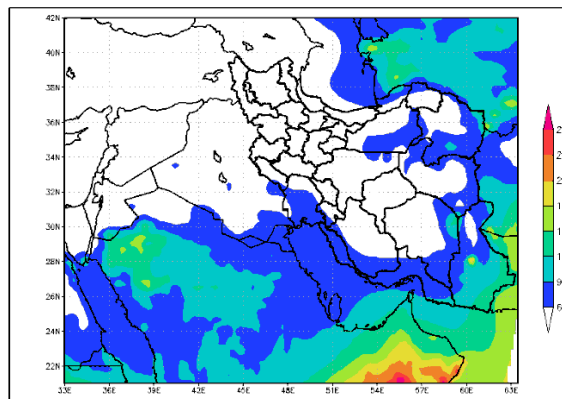
تحلیل فصلی غبار سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۶۰

همانند الگوهای سال‌های ۲۰۳۰ با توجه به الگوی میانگین فصل‌ها می‌تواند به خرد کانون‌های داخلی و استانی اشاره کرد که در تمام فصل‌ها همچنان فعال و به صورت مشترک و با اندکی شدت و ضعف قابل مشاهده هستند، از جمله آن: کانونی که در استان سیستان و بلوچستان مشاهده شده، همچنان در الگوی میانگین فصل‌های ۲۰۵۰ نیز دیده می‌شود. سه کانون خرد دیگری که در ماه‌های قبلی دیده شده واقع در استان کرمان است که با توجه به مقادیر گسیل و فعالیت آن و محدوده اثر آن دارای

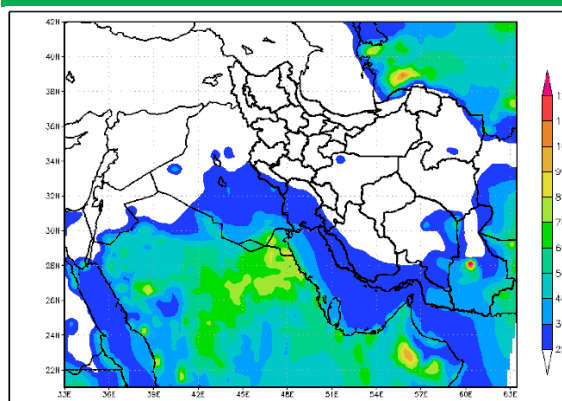
الگوهای سالیانه و بلند مدت غبار در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰

و در نهایت الگوی کانون‌های تولید غبار در منطقه با میانگین سالیانه که در پایین مشاهده می‌شود. این الگو یک میانگین بلندمدت از وضعیت نوسانی کانون‌های غبار منطقه است که تمامی کانون‌هایی که در بالا توضیح داده شد دارای فعالیت ماهیانه یا فصلی بوده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به الگوی توزیع این کانون‌ها و آلودگی‌های گردوغبار ۱۰ ساله در دو الگوی ذیل مشاهده می‌شود که تمام مناطق واقع در دشت‌های دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و دشت‌های واقع در دامنه‌های شرقی و غربی رشته‌کوه‌های زاگرس به دلیل کم بارشی در بالادست کوهستان و خشک‌سالی در دشت‌های پایین دست در حال خشک شدن و تبدیل به کانون غبار شدن است (شکل ۹ و ۱۰).

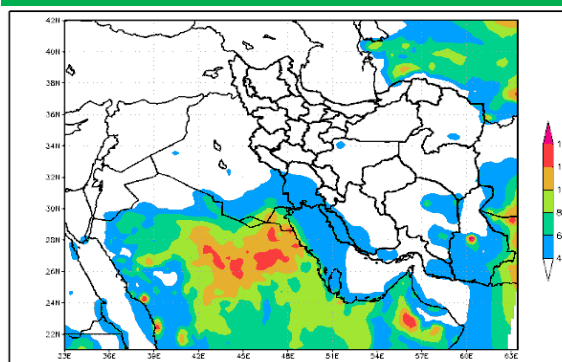
در تحلیل کانون‌های گردوغبار برای سال‌های آتی، می‌بایست در نظر داشت که به دلیل تفکیک افقی ۴۰ کیلومتری مدل‌سازی اقلیمی، تنها کانون‌هایی قابل آشکارسازی هستند که مساحتی فراتر از قدرت تفکیک مدل داشته باشند و در این تحقیق تنها کانون‌هایی قابل آشکارسازی هستند که مساحتی بیش از ۱۶۰۰ کیلومترمربع (معادل ابعاد تقریبی ۴۰ در ۴۰ کیلومتری) داشته باشند؛ به عبارت دیگر، کلیه کانون‌هایی با وسعت کمتر از ۱۶۰۰ کیلومترمربع، به دلیل محدودیت تفکیک مکانی مدل، قابلیت آشکارسازی مستقیم را ندارند. در چنین شرایطی، این مناطق در فرآیند درونیابی مدل به‌طور کامل حذف شده و به‌صورت مجزا شناسایی نمی‌گردند. باین‌حال، آثار و پیامدهای ناشی از غبار این کانون‌های کوچک‌مقیاس در نواحی پیرامونی آن‌ها به‌صورت افزایش غلظت گردوغبار قابل مشاهده و ردیابی است. الگوهای فصلی و سالانه ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استان خوزستان نمونه بارز از چنین رفتاری را در خروجی مدل از خود نشان داده است؛ بدین معنا که اگرچه ممکن است کانون‌های محلی بسیار کوچک در سطح



شکل ۶ - میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده فصل تابستان سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۶۰ [kg/m²]



شکل ۷ - میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده فصل پاییز سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۶۰ [kg/m²]



شکل ۸ - میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده فصل زمستان سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۶۰ [kg/m²]

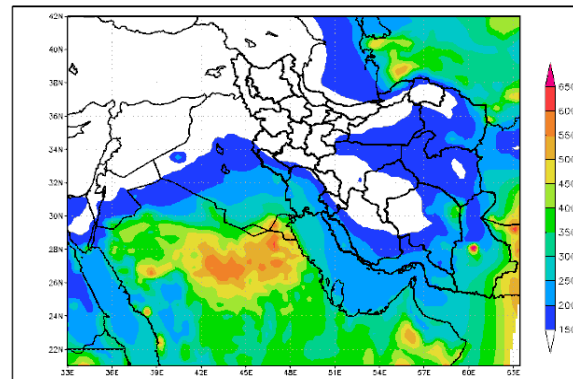
بحث

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی توزیع مکانی- زمانی (فصلی و سالانه) گردوغبار در ایران، با استفاده از مدل اقلیمی جفت‌شده RegCM4 تحت سناریوی RCP4.5 برای دو افق زمانی ۲۰۳۰-۲۰۴۰ و ۲۰۵۰-۲۰۶۰ انجام شد. این مطالعه از آن جهت حائز اهمیت است که در مقایسه با پژوهش‌های پیشین- که عمدتاً به شبیه‌سازی شرایط تاریخی محدود بوده یا تنها از خروجی مدل‌های جهانی بدون امکان بازنگری در پیکربندی متناسب با اقلیم ایران استفاده کرده‌اند- برای نخستین بار از رویکرد ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی (Dynamical Downscaling) جهت پیش‌بینی گردوغبار در سطح منطقه‌ای استفاده می‌کند.

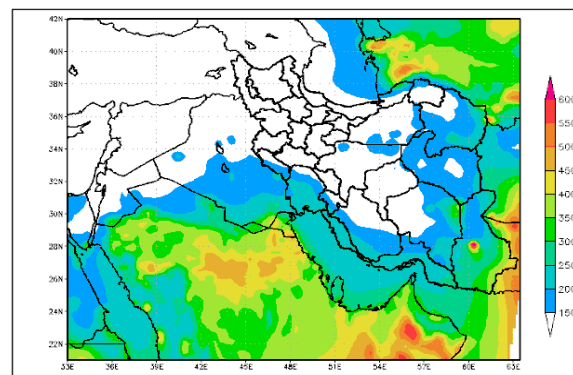
یافته‌های مدل‌سازی، وجود یک کانون گردوغبار پایدار در استان سیستان و بلوچستان را در تمام فصول سال تأیید کرد؛ با این تفاوت که برخلاف الگوی سستی «بادهای ۱۲۰ روزه سیستان» که عمدتاً پدیده‌ای تابستانی محسوب می‌شود، حجم ذرات غبار در این کانون در فصول پاییز و زمستان افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در الگوی فصلی سامانه‌های باد منطقه در دهه‌های آتی باشد. همچنین، کانون قدرتمند دیگری در مرز شمال غربی سیستان با استان‌های خراسان جنوبی و کرمان شناسایی شد. با توجه به موقعیت جغرافیایی این کانون و پتانسیل آن در تحت تأثیر قرار دادن هم‌زمان سه استان، اولویت‌بندی آن در راهبردهای مدیریت منطقه‌ای گردوغبار ضروری است. از سوی دیگر، شناسایی یک کانون نوظهور در جنوب استان خراسان رضوی که به‌ویژه در فصل بهار فعال است، از یافته‌های هشداردهنده این پژوهش به شمار می‌رود. با توجه به مجاورت این کانون با کلان‌شهر مشهد، پایش مستمر و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه در این ناحیه اهمیت بسزایی دارد.

این استان توسط مدل تفکیک نشده باشند، اما اثر تجمعی غبار از آن‌ها در الگوی توزیع مکانی خروجی مدل به‌وضوح قابل تشخیص است.

نکته بعدی آنکه، همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره گردید، به دلیل فاصله زمانی نسبتاً اندک بین دو افق مدل‌سازی اقلیمی (دهه ۲۰۳۰ و دهه ۲۰۵۰)، انتظار نمی‌رود تفاوت چشمگیری از لحاظ شناسایی و پیدایش کانون‌های جدید غبار میان این دو دوره وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، بازه زمانی ده تا بیست‌ساله برای شکل‌گیری و توسعه کانون‌ها و چشمه‌های نوین گردوغبار، زمانی کوتاه محسوب می‌گردد؛ بنابراین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دو دوره مذکور از نزدیکی قابل‌توجهی به یکدیگر برخوردار هستند و الگوهای مکانی کانون‌های غبار در این دو افق زمانی تفاوت معناداری نشان نمی‌دهند.



شکل ۹- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۳۰
[kg/m²]



شکل ۱۰- میانگین ۱۰ ساله غبار تولید شده در سال‌های ۲۰۶۰-۲۰۵۰
[kg/m²]

استان خوزستان به عنوان یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار در کشور شناخته می‌شود. بر اساس یافته‌های مدل، اگرچه این استان در تمام فصول سال با پدیده گردوغبار مواجه است، اما غلظت آن در فصل بهار به اوج می‌رسد. نکته حائز اهمیت در شبیه‌سازی‌های افق ۲۰۵۰-۲۰۶۰، گسترش قابل توجه الگوی غبار در خوزستان است، به گونه‌ای که تفکیک مرکز کانون دشوار بوده و کل استان تحت تأثیر غبار قرار می‌گیرد. این روند، تشدید بحران گردوغبار در این منطقه را در دهه‌های آینده نشان می‌دهد؛ هرچند بخشی از این گستردگی مشاهده شده می‌تواند ناشی از محدودیت تفکیک افقی ۴۰ کیلومتری مدل باشد که در بازنمایی جزئیات کانون‌های کوچک مقیاس، اثر هموارسازی (Smoothing) ایجاد می‌کند.

علاوه بر خوزستان، کانون‌های فعال دیگری در استان‌های بوشهر، هرمزگان، نیمه غربی فارس و همچنین شمال و شمال شرق اصفهان (با گستره فعالیت فصلی وسیع) و شمال شرق کرمان شناسایی شدند. در میان کانون‌های فرامرزی، کانون واقع در نیمه شمالی عربستان تأثیرگذارترین منشأ بر وضعیت گردوغبار ایران است. هسته‌های فعال این کانون با امتداد یافتن تا مرزهای عراق و کویت، منشأ بسیاری از توفان‌های گردوغبار شدید در جنوب غرب ایران (استان‌های خوزستان، ایلام، کرمانشاه و بوشهر) هستند. همچنین، کانون فرامرزی مهم دیگری در نواحی مرزی شمال شرق ایران و ترکمنستان شناسایی شد که تأثیرات آن بر استان‌های خراسان رضوی، شمالی، جنوبی و گلستان مشهود است.

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، عدم وجود تفاوت چشمگیر در الگوهای مکانی گردوغبار بین دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ است که از دو منظر قابل تفسیر است: نخست، بازه زمانی ۱۰ تا ۲۰ ساله برای تکامل ساختاری کانون‌های گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای نسبتاً کوتاه است؛ چراکه فرایندهایی نظیر خشکیدگی تالاب‌ها، بیابان‌زایی و فرسایش بادی برای تغییرات

ساختاری در منشأهای غبار، به بازه‌های زمانی طولانی‌تری (۳۰ تا ۵۰ سال) نیاز دارند. دوم، اگرچه مدل‌ها افزایش در کمیت و شدت فعالیت کانون‌های موجود را پیش‌بینی می‌کنند، اما تغییر قابل ملاحظه‌ای در تعداد کانون‌ها مشاهده نمی‌شود. این یافته بدین معناست که سیاست‌های مقابله با بیابان‌زایی و مدیریت منابع آب در دهه پیش‌رو می‌تواند از ظهور کانون‌های جدید جلوگیری کند، اما کاهش فعالیت کانون‌های فعلی مستلزم برنامه‌ریزی‌های کلان و بلندمدت (۳۰ تا ۵۰ ساله) است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که مدل جفت‌شده RegCM4 با تفکیک مکانی ۴۰ کیلومتر، از توانمندی مطلوبی برای شبیه‌سازی الگوهای فضایی و فصلی کانون‌های گردوغبار در ایران طی دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ برخوردار است. نتایج بیانگر تداوم و در مواردی تشدید فعالیت کانون‌های گردوغبار در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی، کرمان، خوزستان و اصفهان و همچنین پیدایش یک کانون نوظهور در جنوب استان خراسان رضوی است. علاوه بر کانون‌های داخلی، نقش کانون‌های فرامرزی در عربستان و ترکمنستان همچنان به عنوان عوامل کلیدی در تأمین حجم قابل توجهی از گردوغبار ورودی به ایران تأیید شد. با وجود محدودیت‌های ذاتی در تفکیک مکانی مدل‌های اقلیمی و عدم قطعیت‌های پیش‌بینی، روندهای استخراج شده از اعتبار کافی برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی‌های کلان منطقه‌ای برخوردارند. این مطالعه، به عنوان یکی از نخستین تلاش‌ها در حوزه پیش‌بینی دینامیکی گردوغبار در ایران، گامی کلیدی در جهت گذار از رویکردهای صرفاً توصیفی - پایشی به سمت مدیریت پیش‌دستانه و مبتنی بر شواهد در مقابله با بحران گردوغبار در کشور محسوب می‌شود.

منابع

- [9]. Mallet, M. Solmon, F. & Nabat, P. (2024). Development of dust emission parameterizations in RegCM-4 for Mediterranean basin simulations. HAL open archive.
- [10]. Marcella, M. P. & Eltahir, E. A. B. (2010). Effects of mineral aerosols on the summertime climate of southwest Asia: Incorporating subgrid variability in a dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research*, 115(D7).
- [11]. Mofidi, A. Kamali, S. & Zarrin, A. (2013). Evaluation of the capability of RegCM4 model coupled with a dust scheme in detecting the structure of summer dust storms in the Sistan Plain. *The First National Conference on Climatology*, Kerman, Iran.
- [12]. Mostafa, A. N. Zaakey, A. S. & Alfaro, S. C. (2023). Sensitivity Study of Daily Dust Forecast over the MENA Region Using the RegCM4.4 Model. *Environmental Sciences Proceedings*, 27 (1), 35.
- [13]. Saha, S. Moorthi, S. Wu, X. Wang, J. Nadiga, S. Tripp, P. Behringer, D. Hou, Y.T. Chuang, H.Y. Iredell, M. and Ek, M. 2014. The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), pp.2185-2208.
- [14]. Solmon, F. Mallet, M. & Zaakey, A. S. (2009). Regional modeling of Saharan dust events using the RegCM model. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 11, 610.
- [15]. Tsikerdekis, A. (2017). *Study of dust aerosol-climate interactions using a regional climate model* [Doctoral dissertation, Aristotle University of Thessaloniki].
- [16]. Tsikerdekis, A. Zanis, P. Steiner, A. L. Solmon, F. Amiridis, V. Marinou, E. Katragkou, E. Karacostas, T. & Foret, G. (2017). Impact of dust size parameterizations on aerosol burden and radiative forcing in RegCM4. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (2), 769-791.
- [17]. Zaakey, A. S. Solmon, F. & Giorgi, F. (2006). Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 6, 4687-4704.
- [18]. Zargari, M. Broughani, M. Entezari, A. Mofidi, A. & Baaghdeh, M. (2024). Dynamic modeling of spatial-temporal characteristics of dust in south and southeastern Iran with REG-CM4 model. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 24 (72), 115-137.
- [1]. Beraki, A. F. DeWitt, D. G. Landman, W. A. & Olivier, C. (2014). Dynamical seasonal climate prediction using an ocean-atmosphere coupled climate model developed in partnership between South Africa and the IRI. *Journal of Climate*, 27 (4), 1719-1741.
- [2]. Farooqhi, A. Kazemi, M. Jalali, M. Hashemiyan, S. & Nosrati, N. (2017). Evaluation of the RegCM4 model coupled with Dust module in Identification of dust storm features over the North Khorasan. *Nivar*, 41(98-99), 23-36. doi: 10.30467/nivar.2017.51890
- [3]. Golzari Partoo, L. (2015). Simulating the Consequences of Lake Urmia's Drying up on Downfall in Northwest of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(2), 137-147. doi: 10.22067/geo.v4i2.36160
- [4]. Hassan, E. M. Fattahi, E. & Habibi, M. (2023). Application of a regional climate model on autumn dust events over the Urmia Basin. *Atmospheric Pollution Research*, 14 (11), 101904. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104223002581#cebib0010>
- [5]. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- [6]. Kok, J.F., D.A. Ridley, Q. Zhou, R.L. Miller, C. Zhao, C.L. Heald, D.S. Ward, S. Albani, and K. Haustein, 2017: Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. *Nat. Geosci.*, 10, no. 4, 274-278,
- [7]. Khorshiddoust, A. M. Mofidi, A. Rasuly, A. A. & Azarm, K. (2017). Evaluating the sensitivity of RegCM4 model to types of convection parameterization schemes on the modeling of springtime precipitation in the North West of Iran (Case study: spring 2004). *Journal of the Earth and Space Physics*, *43*(3), 651-671. (In Persian)
- [8]. Kuzu, S. L. & Yavuz, E. (2021). Comparison of RegCM dust schemes by monitoring an aeolian dust transport episode. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14 (12), 2047-2057.

Spatiotemporal Projections of Dust Aerosol Dynamics over Iran Using the RegCM4 Model under RCP4.5: 2030–2060

Fatemeh Dargahian^{*1}, Alireza Balalan Fard², Somayeh Heydarnezhad³, Tahere Aghazadeh⁴, Seyed Jafar Seyedakhlaghi⁵

Receive: 10/05/2026

Accept: 29/06/2026

Extended Abstract

Introduction

This study provides a dynamic projection of seasonal and annual dust aerosol distributions over Iran using the coupled RegCM4 regional climate model under the RCP4.5 emission scenario for the 2030–2040 and 2050–2060 horizons. This research addresses a critical knowledge gap, as previous assessments in Iran have largely relied on global model outputs or simulations of historical conditions without the benefit of dynamical downscaling. By employing a high-resolution regional climate model (RCM) capable of resolving local-scale physical processes, this study captures the complexities of dust emission, atmospheric transport, and deposition, offering a more nuanced understanding of future dust dynamics in the region.

Methodology

The study utilized boundary conditions derived from global RegCM climate simulations, with 6-hourly temporal resolution extending to 2100. The RegCM4 model was configured with a 40-km horizontal grid resolution, balancing computational feasibility with the requirement to resolve major regional dust sources. Simulations were driven by the RCP4.5 scenarios—representing a moderate greenhouse gas emission pathway—covering the Iranian domain (25°N–45°N and 44°E–64°E). Key physical parameterizations included the Emanuel convection scheme, the Holtslag planetary boundary layer scheme, the NCAR-CCM3 radiation scheme, and the BATS1e land surface scheme. Following a 3-month spin-up period to ensure initialization stability, decadal averages for 2030–2040 and 2050–2060 were analyzed to determine dust trends.

Results

The modeling results successfully identified multiple internal and external dust hotspots. Internal sources were notably active in Sistan and Baluchestan, Kerman, South/Razavi Khorasan, Khuzestan, Bushehr, Hormozgan, and Isfahan provinces. Among these, the Sistan and Baluchestan and Khuzestan regions exhibited the highest frequency and intensity of dust events. External dust contribution was found to be significant from northern Saudi Arabia, the Iraq-Kuwait border, and northeastern regions adjacent to Turkmenistan. Seasonal analysis highlighted distinct behaviors: Sistan and Baluchestan remains active year-round, with peak intensities in autumn and winter linked to the

1. Fatemeh Dargahian: Associated Professor Research institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: fatemeh.dargahian@gmail.com

2. M.Sc. Student, Alborz Province Meteorological Department, Karaj, Iran.

3. Desertification Researcher, Borujerd Agricultural and Natural Resources Research and Education Campus, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research, Education and Extension Center (AREEO), Iran.

4. M.Sc. Graduate in Meteorology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.

5. Assistant Professor, Research institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

strengthening of the Levar wind system. Conversely, the Khuzestan source, characterized by extensive dry marshlands, exhibits peak mobilization in spring due to the Shamal wind system, which facilitates dust transport from the Tigris-Euphrates basin.

Discussion and conclusion

The projections indicate a clear intensification in both dust production volumes and event frequency throughout the 2030s and 2050s, driven by climate-change-induced declines in soil moisture, altered vegetation cover, and intensified wind patterns under RCP4.5. Furthermore, the identification of emerging dust sources in Turkmenistan poses a heightened risk to northeastern Iran. While the model successfully delineates regional hotspots, it is subject to spatial constraints; the 40-km resolution limits the detection of localized sources smaller than 1,600 km². Consequently, while the model provides a robust assessment of regional-scale dynamics, smaller sources may be underrepresented or smoothed. Despite this, the study's findings corroborate the urgent need for transboundary cooperation and localized dust mitigation strategies. These results suggest that by 2054, Iran will experience a shift toward significantly warmer and drier conditions, necessitating the integration of these projections into national water resource management and sustainable land-use planning.

Keywords: Dust prediction, RegCM4, RCP4.5, Dynamical downscaling, Iran, Dust hotspots, Seasonal distribution