

نقش جت تراز پایین در رخداد پدیده گردوخاک تابستانه استان خوزستان در جنوب غرب ایران

سکینه خان سالاری^{۱*} و ابراهیم فتاحی^۲

^۱استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲استاد، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳)

چکیده

گردوخاک یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیط‌زیستی در جنوب غرب ایران است که تحت تأثیر پویایی‌های بادی لایه‌های پایین جو تشدید می‌شود. در این میان، جت تراز پایین (LLJ) به عنوان یک سازوکار دینامیکی مؤثر، می‌تواند نقش مهمی در برداشت و انتقال گردوخاک ایفا کند، اما پیوند کمی آن با شاخص‌های گردوخاک در استان خوزستان تاکنون به طور نظام‌مند بررسی نشده است. در این پژوهش، نقش فعالیت جت تراز پایین در کنترل رفتار گردوخاک تابستانه‌ی خوزستان طی دوره‌ی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA-2 بررسی شد. رخدادهای LLJ بر اساس قیود دینامیکی شناسایی و ارتباط زمانی و مکانی آن‌ها با شاخص‌های نوری (DUEXTTAU) و جرمی (DUSMASS) گردوخاک تحلیل گردید. نتایج نشان می‌دهد که در ساعات دارای LLJ، جرم گردوخاک سطحی به طور معناداری افزایش می‌یابد؛ به طوری که نسبت میانگین DUSMASS در شرایط دارای LLJ همواره بزرگ‌تر از مقدار متناظر برای DUEXTTAU است. به طور مشخص، نسبت میانگین جرم گردوخاک سطحی (DUSMASS) در ساعات دارای LLJ به شرایط بدون LLJ در تابستان‌های مورد بررسی حدود ۱/۸۵ به دست آمده است. تحلیل مکانی نشان داد که کانون‌های فعال گردوخاک تنها بخش محدودی از دامنه‌ی مکانی استان را شامل می‌شوند و همانطور که انتظار می‌رود همبستگی فضایی بین گردوخاک و سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال برای شاخص جرمی گردوخاک قوی‌تر و گسترده‌تر از شاخص نوری است و این نسبت برابر با ۱/۸۳ است. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جت‌های تراز پایین نقش کلیدی در تشدید برداشت و انتقال جرم گردوخاک در خوزستان دارند و اثر آن‌ها به صورت مکانی ناهمگن و وابسته به نوع شاخص گردوخاک بروز می‌کند.

کلمه‌های کلیدی: جت تراز پایین، گردوخاک، استان خوزستان، ERA5، DUSMASS، DUEXTTAU

۱ مقدمه

در کمربند خشک و نیمه خشک جهان، به ویژه در گستره‌ی شمال آفریقا تا خاورمیانه، گردوخاک یکی از مهم ترین مؤلفه‌های سامانه اقلیمی به شمار می‌رود که بر توازن تابشی، چرخه انرژی سطح زمین و فرآیندهای میکروفیزیکی ابرها اثر می‌گذارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این پدیده نه تنها پیامد شرایط اقلیمی است، بلکه خود می‌تواند به عنوان یک عامل بازخوردی در سامانه اقلیم عمل کند و بر دما، تابش و بارش منطقه‌ای اثرگذار باشد (ماه‌والد و همکاران، ۲۰۱۴؛ هَنسن و همکاران، ۱۹۹۷؛ پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲؛ گودی و میدلتون، ۲۰۰۶؛ ژینوکس و همکاران، ۲۰۱۲؛ کوک و همکاران، ۲۰۱۷؛ ریدلی و همکاران، ۲۰۱۴). با وجود آن که مطالعات متعددی به بررسی فعالیت گردوخاک در خاورمیانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات زمینی و شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته‌اند، سهم اندکی از این پژوهش‌ها به‌طور مشخص بر پویایی‌های بادی مؤثر بر گسیل گردوخاک در شرایط حاکمیت جت تراز پایین (LLJ: Low-Level Jet) متمرکز بوده‌اند. استان خوزستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود در جنوب غرب ایران و همجواری با بیابان‌های فعال عراق، سوریه و عربستان یکی از مناطق به شدت آسیب‌پذیر در برابر طوفان‌های گردوخاک در خاورمیانه محسوب می‌شود. این منطقه در چارچوب کمربند فعال گردوخاک خاورمیانه قرار دارد که از شمال آفریقا تا غرب آسیا امتداد یافته و یکی از کانون‌های اصلی تولید و انتقال گردوخاک در مقیاس جهانی محسوب می‌شود (نوتارو و همکاران، ۲۰۱۳؛ یو و همکاران، ۲۰۱۵). این استان علاوه بر تأثیرپذیری از منابع خارجی گردوخاک، دارای منابع داخلی فعالی نیز هست که در نتیجه‌ی خشک شدن تالاب‌ها، افت سطح آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش پوشش گیاهی تشدید شده‌اند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش پوشش گیاهی و تغییرات کاربری زمین در این ناحیه، به ویژه در فصل تابستان، با افزایش شاخص‌های اپتیکی گردوخاک و افت شدید کیفیت هوا همراه بوده است (حمزه و همکاران، ۲۰۲۱؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ رهنما و همکاران، ۲۰۲۳؛ عزیزاده‌چوبری و همکاران، ۲۰۱۶؛ علی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵). از جمله عوامل کلیدی تشدید گردوخاک در خوزستان می‌توان به خشک شدن تالاب‌های مهمی نظیر هورالعظیم و شادگان اشاره کرد که در پی خشکسالی‌های متوالی، کاهش ورودی آب و بهره‌برداری‌های ناپایدار دچار افت شدید سطح آب شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که کاهش سطح این تالاب‌ها با افزایش تعداد روزهای آلوده و رشد غلظت ذرات معلق نظیر PM_{10} و $PM_{2.5}$ همراه بوده و نقش مهمی در فعال شدن منابع محلی گردوخاک ایفا می‌کند (مالکی و همکاران، ۲۰۱۶؛ یوسفی کبریا و همکاران، ۲۰۲۵). در چنین بستری، میدان باد لایه‌های پایین جو نقش تعیین‌کننده‌ای در فعال‌سازی، برداشت و انتقال ذرات گردوخاک ایفا می‌کند. تغییرات همدیدی، گردادیان‌های فشار سطحی و تشدید بادهای شمال غربی می‌توانند شرایط لازم برای انتقال تکانه به سطح زمین را فراهم کرده و زمینه را برای شکل‌گیری جریان‌های بادی قوی در لایه‌های پایین‌تر جو مهیا سازند؛ سازوکاری که در بسیاری از رخداد‌های گردوخاک جنوب غرب ایران به عنوان یک عامل کلیدی مطرح شده است (هاشمی دوین و همکاران، ۲۰۲۲). پژوهش‌های اخیر در ایران نیز بر نقش الگوهای دینامیکی و ساختارهای بادی در رخداد‌های گردوخاک منطقه‌ای تأکید دارند (قصابی و کرمی، ۲۰۲۵). استان خوزستان، واقع در محل تلاقی دشت‌های بین‌النهرین و دامنه‌های زاگرس، یکی از پایدارترین و فعال‌ترین کانون‌های تولید گردوخاک در جنوب غرب آسیا به شمار می‌رود. این منطقه به دلیل

داده‌های بازتحلیل چندساله ERA5 (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰) و MERRA-2 (جلارو و همکاران، ۲۰۱۷) به صورت ترکیبی به کار گرفته شده‌اند تا رخداد‌های جت تراز پایین شناسایی، شدت آن‌ها ارزیابی و تغییرات متناظر در پارامترهای نوری و جرمی گردوخاک کمی‌سازی شود. با استفاده از تحلیل‌های آماری و ترکیبی، روابط مکانی و زمانی میان فعالیت جت تراز پایین و بارگذاری گردوخاک مورد واکاوی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این پژوهش در کمی‌سازی هم‌زمان پیوند زمانی و مکانی میان رخداد‌های جت تراز پایین و شاخص‌های نوری و جرمی گردوخاک، با استفاده از ترکیب داده‌های ERA5 و MERRA-2 و در مقیاس یک کانون بحرانی گردوخاک در خاورمیانه است. نتایج این مطالعه با روشن‌سازی سازوکارهای بادی پیونددهنده پویایی لایه مرزی و گسیل گردوخاک، درک تازه‌ای از نقش منطقه خوزستان در تغذیه چرخه گردوخاک خاورمیانه و حتی مقیاس‌های فرامنطقه‌ای ارائه می‌دهد. در ادامه، ابتدا رخداد‌های جت تراز پایین شناسایی و ویژگی‌های آماری آن‌ها بررسی می‌شود؛ سپس پیوند زمانی و مکانی این رخدادها با شاخص‌های نوری و جرمی گردوخاک تحلیل شده در ادامه، ابتدا رخداد‌های جت تراز پایین شناسایی و ویژگی‌های آماری آن‌ها بررسی می‌شود؛ سپس پیوند زمانی و مکانی این رخدادها با شاخص‌های نوری و جرمی گردوخاک تحلیل می‌شود و در نهایت، دلالت‌های دینامیکی این نتایج برای نقش جت تراز پایین در سامانه گردوخاک خوزستان تفسیر می‌شود.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱ منطقه‌ی مورد مطالعه

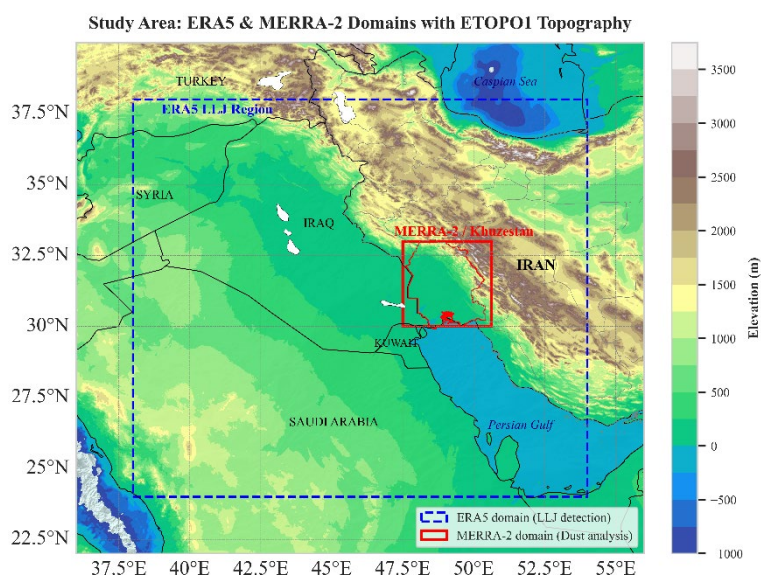
این پژوهش بر استان خوزستان در جنوب غرب ایران متمرکز است؛ منطقه‌ای که یکی از فعال‌ترین کانون‌های گردوخاک در خاورمیانه محسوب می‌شود. دشت‌های

موقعیت جغرافیایی خاص، توپوگرافی گذار از دشت به کوهستان، و مجاورت با بیابان‌های وسیع عراق، نقش کلیدی در چرخه منطقه‌ای گردوخاک ایفا می‌کند. در فصل گرم سال، گرمایش شدید سطح زمین و شکل‌گیری گرادیان‌های فشار قوی، به استقرار بادهای غالب شمال‌غربی منجر می‌شود که در بسیاری از موارد به صورت جت‌های تراز پایین شبانه تکامل می‌یابند. این جت‌ها با افزایش تنش برشی نزدیک سطح، شرایط لازم برای برداشت، خیزش و انتقال مقادیر قابل توجهی از ذرات گردوخاک را فراهم کرده و مسیر انتقال آن‌ها را به سوی خلیج فارس و نواحی مجاور تسهیل می‌کنند. مطالعات منطقه‌ای و جهانی نشان داده‌اند که جت‌های تراز پایین می‌توانند با تقویت شار تکانه به سطح، نقش تعیین‌کننده‌ای در گسیل گردوخاک ایفا کنند، به‌ویژه در نواحی خشک خاورمیانه و شمال آفریقا (فیدلر و همکاران، ۲۰۱۳؛ پو و ژینوکس، ۲۰۱۸). با این حال، علی‌رغم اهمیت بالای این سازوکار، پیوند کمی میان تغییرپذیری جت‌های تراز پایین و شاخص‌های نوری و جرمی گردوخاک در این کانون بحرانی تاکنون به‌طور نظام‌مند و دقیق بررسی نشده است. جت تراز پایین (LLJ) به جریان‌های شدید باد در لایه‌های پایین‌تر تروپوسفر، معمولاً در ترازهای ۹۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال، اطلاق می‌شود که به صورت افقی در قالب هسته‌هایی از باد قوی ظاهر می‌شوند. این جریان‌ها نقش کلیدی در انتقال رطوبت، حرارت و گردوخاک دارند و در مناطق خشک مانند جنوب غرب آسیا، عامل اصلی بروز طوفان‌های گردوخاک به‌شمار می‌آیند (بونر، ۱۹۶۸؛ رایف و همکاران، ۲۰۱۰؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۲۲).

در این پژوهش، نقش فعالیت جت تراز پایین در کنترل گسیل و انتقال گردوخاک در استان خوزستان طی ماه‌های گرم سال (ژوئن تا اوت) در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور،

جنوبی بین‌النهرین را که محل پیدایش جت‌های شمال‌غربی هستند در بر می‌گیرد و مسیر گسترش آن‌ها را از مرز عراق به داخل خوزستان دنبال می‌کند. درون این دامنه، زیرناحیه‌ای متناظر با استان خوزستان ($47/5-50/6$ درجه طول شرقی و $30-33$ درجه عرض شمالی) برای تحلیل گردو خاک بر پایه‌ی داده‌های MERRA-2 در نظر گرفته شد. بنابراین دامنه‌ی بزرگ‌تر برای شناسایی و بررسی دینامیکی جت و دامنه‌ی داخلی برای مطالعه‌ی تأثیرات آن بر گردو خاک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).

کم‌ارتفاع خوزستان در شمال‌شرق به رشته‌کوه زاگرس و در جنوب‌غرب به دشت بین‌النهرین و شمال خلیج فارس محدود می‌شوند. این پیکربندی توپوگرافی، گرادیان شدید حرارتی و فشاری میان کوهستان و دشت را پدید می‌آورد و باعث هدایت بادهای شمال‌غربی شمال می‌شود که در ماه‌های گرم سال به‌طور مکرر به شکل جت‌های تراز پایین (LLJ) ظاهر می‌گردند. برای پوشش کامل منطقه‌ی شکل‌گیری و مسیر نفوذ جت، دامنه‌ی تحلیلی داده‌های ERA5 به محدوده‌ی وسیع‌تری شامل 22 تا 40 درجه عرض شمالی و 36 تا 56 درجه طول شرقی گسترش داده شد. این ناحیه‌ی وسیع‌تر، دشت‌های



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه بر اساس دامنه‌ی تحلیلی داده‌های ERA5 (مستطیل نقطه‌چین آبی‌رنگ) و بر پایه‌ی داده‌های MERRA-2 (مستطیل قرمز رنگ).

۲-۲ داده‌ها

و 12 تراز فشاری از 1000 تا 700 هکتوپاسکال (1000 ، 975 ، 950 ، 925 ، 900 ، 875 ، 850 ، 825 ، 800 ، 775 ، 750 و 700 هکتوپاسکال) هستند. متغیرهای به‌کاررفته شامل مؤلفه‌های افقی باد (u و v) هستند که امکان تحلیل ساختار دینامیکی جت را فراهم می‌سازند. برای بررسی گردو خاک از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 تولیدشده توسط مرکز مدل‌سازی و هم‌جوشی داده‌های ناسا (GMAO) استفاده شد. این

برای بررسی ویژگی‌های دینامیکی جت تراز پایین از داده‌های بازتحلیل ساعتی ERA5 (هرباش و همکاران، ۲۰۲۰) متعلق به مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت (ECMWF) در محدوده مشخص شده در شکل ۱ استفاده شد. این داده‌ها ماه‌های تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) در بازه‌ی زمانی پنج‌ساله‌ی 2021 تا 2025 را دربرمی‌گیرند و دارای تفکیک افقی 25×25 درجه

ساعتی، تراز هسته‌ی جت به صورت پویا و مستقل تعیین شده است. برای هر گام زمانی ساعتی، به منظور تعیین تراز هسته‌ی جت تراز پایین، دو معیار مکمل شامل (۱) میانگین مکانی سرعت باد در هر تراز فشاری و (۲) سهم سطحی ناحیه‌ای که سرعت باد در آن از آستانه‌ی ۱۲ متر بر ثانیه فراتر می‌رود، محاسبه شده است. به منظور امکان مقایسه و ترکیب این دو معیار با مقیاس‌های متفاوت، هر یک به صورت نسبی نسبت به بیشینه‌ی همان معیار در میان ترازهای فشاری نرمال‌سازی گردیده است. در قسمت اول این مرحله شاخص ترکیبی تعیین تراز هسته جت برای هر تراز فشاری به صورت رابطه (۱) تعریف شده است.

$$I(p) = \frac{\bar{V}(p)}{[\bar{V}]_{max}} + \frac{A_{V>12}(p)}{\max[A_{V>12}]} \quad (1)$$

که در آن $\bar{V}(p)$ میانگین مکانی سرعت باد افقی و $A_{V>12}(p)$ سهم سطحی ناحیه با سرعت باد فراتر از ۱۲ متر بر ثانیه در تراز فشاری p است. در این شاخص، مقادیر مخرج به ترتیب نمایان گر بیشترین مقدار میانگین مکانی سرعت باد و بیشترین سهم سطحی ناحیه با سرعت باد فراتر از ۱۲ متر بر ثانیه در میان تمام ترازهای فشاری مورد بررسی در همان گام زمانی ساعتی هستند و صرفاً به منظور نرمال‌سازی نسبی دو معیار و قابل مقایسه کردن آن‌ها در فرآیند تعیین تراز هسته‌ی جت تراز پایین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تراز‌ی که بیشترین مقدار شاخص $I(p)$ را دارا باشد به عنوان تراز هسته‌ی جت تراز پایین در آن ساعت در صورت برقرار شدن شرط قسمت دوم انتخاب گردیده است. این شاخص مبتنی بر منطق فیزیکی فرآیند جت تراز پایین تعریف شده است و هدف آن صرفاً شناسایی پویا و ساعتی تراز هسته جت بر اساس هم‌زمانی بیشینه‌ی شدت باد و گستردگی مکانی آن بوده است. به منظور جلوگیری از بروز خطا در شرایط داده‌های ناقص یا غیرمعتبر، کنترل صریح مقادیر تهی (NaN) در تمام مراحل انجام شده است. در قسمت دوم مرحله نخست، پس از تعیین تراز بیشینه شاخص $I(p)$ ، شدت جت

داده‌ها با تفکیک مکانی $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ درجه و تفکیک زمانی ساعتی برای محدوده‌ی خوزستان (شکل ۱) استخراج شدند. دو شاخص مرتبط با گردوخاک شامل عمق نوری خاموشی گردوخاک (DUEXTTAU: Dust Extinction Optical Depth) و غلظت جرم سطحی گردوخاک (DUSMASS: Dust Surface Mass Concentration) مورد تحلیل قرار گرفتند. این شاخص‌ها به ترتیب بیانگر بار گردوخاک ستونی و سطحی بوده و در مجموع نمایی جامع از تغییرات گردوخاک تحت تأثیر جت تراز پایین ارائه می‌دهند.

۳-۲ روش کار

چارچوب تحلیلی این پژوهش در قالب چهار مرحله متوالی طراحی شده است تا ارتباط دینامیکی و آماری میان فعالیت جت تراز پایین و تغییرات گردوخاک در خوزستان بررسی شود.

۳-۲-۱ شناسایی جت تراز پایین

در مرحله نخست، تشخیص جت تراز پایین به صورت پویا و ساعتی با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 انجام شده است که این مرحله شناسایی جت تراز پایین، شامل دو قسمت است. در این مرحله از داده‌های بازتحلیل ERA5 مؤلفه‌های افقی باد (u و v) در ترازهای فشاری استاندارد برای ماه‌های ژوئن تا اوت طی دوره‌ی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ استخراج گردیده است. دامنه‌ی مکانی تحلیل شامل بخش وسیعی از جنوب غرب ایران و نواحی پیرامونی است تا ساختار جت تراز پایین به طور کامل در نظر گرفته شوند (شکل ۱). ابتدا سرعت باد در هر تراز فشاری به صورت ریشه مجموع مربعات مؤلفه‌های u و v محاسبه شده است. تحلیل تنها به ترازهای فشاری پایین تر از ۷۰۰ هکتوپاسکال محدود گردیده است تا تمرکز بر جت‌های تراز پایین حفظ شود. برای هر گام زمانی

احتمالی با استفاده از اختلاف سرعت باد بین تراز بیشینه شاخص $I(p)$ و تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال محاسبه گردیده است و رخداد جت تراز پایین تنها در صورتی ثبت شده است که این اختلاف سرعت حداقل ۳ متر بر ثانیه باشد. در نهایت، خروجی‌های ساعتی شامل تراز هسته‌ی جت تراز پایین، ماسک رخداد LLJ و سری‌های زمانی مربوطه برای هر ماه استخراج شده است. تراز هسته‌ی جت در این مرحله به‌عنوان ابزار پشتیبان برای تفسیر فیزیکی و کنترل کیفیت الگوریتم تشخیص LLJ مورد استفاده قرار گرفته است، در حالی که تشخیص رخدادهای واقعی جت تراز پایین در مراحل بعدی تحلیل بر پایه‌ی ماسک رخداد و قیود دینامیکی تعریف شده انجام شده است. فراوانی رخدادهای LLJ نیز به‌منظور خلاصه‌سازی کمی رفتار زمانی و مکانی جت تراز پایین در قالب شاخص‌ها و جداول آماری استخراج گردیده است.

۲-۳-۲ ارتباط کمی بین رخدادهای جت تراز پایین و شاخص‌های گردو خاک

در مرحله دوم، به‌منظور بررسی ارتباط کمی بین رخدادهای جت تراز پایین (LLJ) و شاخص‌های گردو خاک، از ترکیب داده‌های بازتحلیل ERA5 و مجموعه داده‌ی MERRA-2 استفاده شده است. ابتدا خروجی مرحله دوم شامل نقشه‌ی دودویی رخداد جت تراز پایین (LLJ_mask)، برای هر ساعت در دامنه‌ی ERA5 تهیه گردیده است و سپس این خروجی بر روی شبکه‌ی مکانی MERRA-2 میان‌یابی شده است تا هر دو مجموعه داده از نظر شبکه‌ی مکانی یکسان شوند. در ادامه، برای هم‌زمان‌سازی زمانی، از روش نزدیک‌ترین همسایه با تلورانس ۴۵ دقیقه استفاده شده است تا رکوردهای LLJ و گردو خاک به یک زمان مرجع مشترک نگاشت شوند و از ایجاد جابه‌جایی زمانی مصنوعی جلوگیری شود. با توجه به این‌که داده‌های

MERRA-2 از نوع میانگین‌گیری ساعتی بوده و برچسب زمانی آن‌ها در مرکز بازه‌ی یک‌ساعته (نیم‌ساعت) قرار دارد، تلورانس زمانی ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شد تا هم‌ترازسازی زمانی سازگار و بدون حذف غیرضروری داده‌ها انجام شود. پس از هم‌ترازسازی مکانی و زمانی، برای هر گام زمانی ساعتی، یک شاخص دودویی وقوع LLJ با میانگین‌گیری مکانی از ماسک LLJ و تبدیل آن به مقدار صفر و یک تعریف شده است، به‌گونه‌ای که وجود حداقل یک سلول مکانی دارای رخداد LLJ به‌عنوان وقوع LLJ در آن زمان لحاظ شود. همچنین، دو متغیر گردو خاک شامل DUEXTTAU و DUSMASS به‌صورت میانگین مکانی بر روی دامنه‌ی تحلیل گردو خاک محاسبه شده‌اند و سپس برای هر متغیر، میانگین مقدار گردو خاک در روزهای دارای LLJ و روزهای فاقد LLJ استخراج گردیده است. برای سنجش شدت وابستگی، نسبت میانگین گردو خاک در شرایط LLJ به شرایط بدون LLJ به‌عنوان شاخص تقویت گردو خاک توسط LLJ محاسبه شد. این شاخص به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$R_D = \frac{D|LLJ=1}{D|LLJ=0} \quad (2)$$

که در آن D نماینده‌ی شاخص گردو خاک (DUEXTTAU یا DUSMASS) و میانگین نشان‌دهنده‌ی میانگین‌گیری زمانی بر روی نمونه‌های ساعتی متناظر است.

۲-۳-۳ بررسی رفتار چندساله و تغییرات بین‌سالی پیوند میان جت تراز پایین و گردو خاک

در مرحله سوم به‌منظور بررسی رفتار چندساله و تغییرات بین‌سالی پیوند میان جت تراز پایین و گردو خاک، خروجی‌های آماری مرحله دوم برای تمامی ماه‌های تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) در دوره‌ی زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ به‌صورت یک مجموعه‌ی واحد تجمیع شدند. در

این راستا، فایل‌های خلاصه‌ی ماهانه‌ی مرحله دوم که شامل نسبت میانگین گردوخاک در شرایط دارای LLJ به شرایط بدون LLJ بودند، به صورت خودکار خوانده شده و اطلاعات مربوط به سال و ماه به هر رکورد افزوده شد. سپس تمامی ماه‌ها و سال‌ها در یک جدول یکپارچه ادغام گردید تا امکان بررسی و مقایسه کمی بین سالی فراهم شود. به منظور استخراج و کمی‌سازی الگوی مکانی هم‌تغییری بین رخدادهای جت تراز پایین و متغیرهای گردوخاک، تحلیل کمی هم‌تغییری مکانی انجام شد. برای این منظور، از فایل‌های ترکیبی ماهانه حاصل از مرحله دوم استفاده گردید که شامل فراوانی رخداد جت تراز پایین و میانگین ماهانه شاخص‌های گردوخاک بر روی شبکه‌ای یکسان بودند. ابتدا فراوانی رخداد جت تراز پایین (LLJ_frequency) که در مرحله قبل از مجموع زمانی ماسک دودویی LLJ برای هر سلول شبکه محاسبه شده بود، از فایل‌های ترکیبی ماهانه استخراج شد. هم‌زمان، میدان میانگین ماهانه متغیرهای گردوخاک منتخب شامل DUEXTTAU و DUSMASS استخراج گردید. به منظور امکان مقایسه‌ی مستقیم الگوهای مکانی و حذف اثر تفاوت مقیاس عددی و واحدهای فیزیکی میان متغیرها، هر دو میدان فراوانی LLJ و گردوخاک به صورت نرمال شده فضایی تبدیل شدند؛ به طوری که از هر میدان، میانگین فضایی آن کسر و سپس بر انحراف معیار فضایی همان میدان تقسیم شد. بر این اساس، ناهنجاری‌های نرمال شده‌ی فضایی فراوانی جت تراز پایین و شاخص گردوخاک و همچنین شاخص هم‌تغییری مکانی بین آن‌ها به ترتیب بر اساس روابط (۳) تا (۵) محاسبه شدند.

$$Z_{LLJ}(i) = \frac{F_{LLJ}(i) - \mu_{F_{LLJ}}}{\sigma_{F_{LLJ}}} \quad (3)$$

$$Z_D(i) = \frac{D(i) - \mu_D}{\sigma_D} \quad (4)$$

$$C(i) = Z_{LLJ}(i) \times Z_D(i) \quad (5)$$

در روابط (۳) تا (۵)، $F_{LLJ}(i)$ فراوانی رخداد جت تراز پایین در سلول مکانی i و $D(i)$ مقدار میانگین ماهانه‌ی شاخص گردوخاک (DUEXTTAU یا DUSMASS) در همان سلول است. نمادهای μ و σ به ترتیب بیان گر میانگین فضایی و انحراف معیار فضایی هر میدان در دامنه‌ی مورد مطالعه و در همان ماه هستند. بر این اساس، مقادیر $Z_{LLJ}(i)$ و $Z_D(i)$ نمایان گر ناهنجاری‌های نرمال شده‌ی فضایی فراوانی جت تراز پایین و گردوخاک بوده و شاخص $C(i)$ به صورت حاصل ضرب این دو ناهنجاری، به عنوان معیاری برای سنجش هم‌تغییری مکانی بین جت تراز پایین و گردوخاک در هر سلول شبکه تعریف می‌شود. این شاخص نشان دهنده‌ی مناطقی است که در آن‌ها انحراف مثبت یا منفی فراوانی رخداد LLJ به طور هم‌زمان با انحراف مثبت یا منفی مقادیر گردوخاک همراه بوده است. مقادیر شاخص هم‌تغییری محاسبه شده در تمام سلول‌های شبکه‌ی تحلیل، برای هر ماه از دوره‌ی مورد بررسی (ژوئن، ژوئیه و اوت در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵) استخراج و به صورت آماری خلاصه شدند. در این راستا، شاخص‌هایی نظیر میانگین، انحراف معیار، میانه، صدک‌های ۱۰ و ۹۰، درصد سلول‌های دارای هم‌تغییری مثبت و نیز سهم سلول‌هایی با هم‌تغییری قوی (قدر مطلق شاخص نرمال شده برابر یا بزرگ‌تر از ۱) محاسبه و در قالب یک جدول تجمیعی (جدول ۴) ارائه شد. برای خلاصه‌سازی چندساله، آماره‌های ماهانه‌ی محاسبه شده برای هر متغیر در کل ماه‌ها و سال‌ها میانگین گیری شدند. این رویکرد امکان توصیف کمی ناهمگنی مکانی و مقایسه‌ی شدت و پایداری ارتباط مکانی بین جت تراز پایین و گردوخاک را بدون اتکا به نمایش‌های تصویری فراهم می‌سازد و زمینه‌ی ورود منسجم به تحلیل منبع‌یابی گردوخاک در مرحله بعدی را مهیا می‌کند.

۴-۳-۲ میانگین نسبت LLJ-گردو خاک برای هر

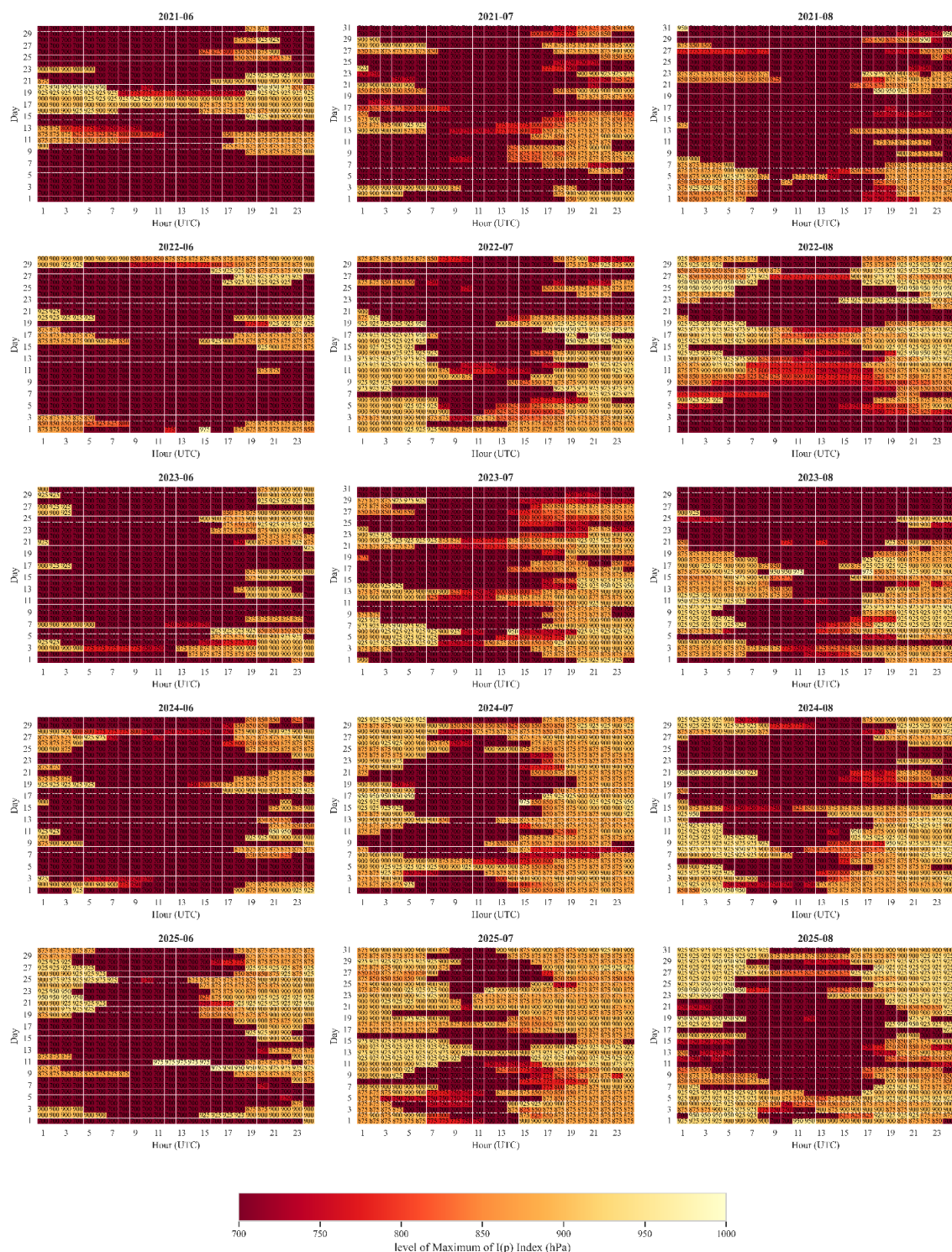
سال

در بخش اول مرحله چهارم برای حذف نوسانات کوتاه مدت ماهانه و تمرکز بر سیگنال بین سالی، میانگین نسبت LLJ-گردو خاک برای هر سال به صورت جداگانه محاسبه شد. این محاسبه بر اساس میانگین گیری از ماه های تابستان هر سال انجام گرفت و تنها متغیرهای منتخب گردو خاک شامل DUEXTTA و DUSMASS در تحلیل لحاظ شدند. علاوه بر میانگین، انحراف معیار سالانه نیز محاسبه شد تا میزان تغییر پذیری درون سالی هر شاخص مشخص گردد. در گام نهایی، برای توصیف تغییرات بین سالی، مقادیر میانگین و انحراف معیار سالانه-ی نسبت LLJ-گردو خاک محاسبه و در قالب جدول ۵ ارائه شد که امکان مقایسه ی نسبی شدت پیوند LLJ و گردو خاک را در سال های مختلف فراهم می کند. در حالی که مراحل پیشین بر شناسایی الگوهای هم تغییری مکانی بین جت تراز پایین و گردو خاک مبتنی بودند، در بخش دوم مرحله چهارم به منظور تقویت تفسیر نتایج و ارائه ی شواهد آماری مستقل، همبستگی فضایی پیرسون بین ناهنجاری های ماهانه ی گردو خاک و میدان باد لایه ی پایین جو محاسبه شد. بدین منظور، در بخش دوم مرحله چهارم یک تحلیل مکانی ترکیبی بر پایه ی داده های MERRA-2 و ERA5 انجام گرفت. ابتدا برای ماه های تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) در بازه ی زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵، میانگین های ماهانه ی شاخص های گردو خاک DUEXTTAU و DUSMASS از داده های ساعتی/روزانه ی MERRA-2 محاسبه و به عنوان نماینده ی الگوی مکانی گردو خاک در مقیاس ماهانه استفاده شد. هم زمان، از باز تحلیل ERA5 مؤلفه های افقی باد در تراز فشاری ۹۲۵ هکتوپاسکال استخراج و سرعت باد افقی در این تراز محاسبه و سپس میانگین ماهانه ی آن به دست آمد. برای امکان مقایسه ی مکانی مستقیم،

میدان های باد ERA5 پس از یک دست سازی مختصات و مرتب سازی عرض جغرافیایی، به صورت درون یابی خطی بر روی شبکه ی مکانی MERRA-2 منتقل شدند و یک دیتاست ماهانه ی ترکیبی شامل گردو خاک و باد لایه ی پایین جو روی شبکه ی یک نواخت MERRA-2 ایجاد گردید. برای شناسایی کانون های گردو خاک، آستانه ی صدک ۹۰ توزیع مکانی میانگین تابستانه (JJA climatology) برای هر متغیر گردو خاک، به گونه ای که سلول های فراتر از این آستانه به عنوان کانون های نسبی گردو خاک تعریف شدند. در ادامه، برای بررسی رابطه ی آماری مکانی میان گردو خاک و باد لایه ی پایین، ناهنجاری های ماهانه ی گردو خاک و سرعت باد ۹۲۵ هکتوپاسکال (با کسر میانگین زمانی هر سلول) محاسبه شد و سپس ضریب همبستگی پیرسون به صورت مستقل برای هر سلول مکانی بین سری زمانی ناهنجاری ها برآورد گردید. این تحلیل با هدف شناسایی نواحی با هم زمانی نسبی قوی تر بین نوسانات گردو خاک و باد تراز پایین انجام شده و نتایج آن ماهیت توصیفی-تحلیلی دارند. نتایج این مرحله به صورت شاخص ها و آماره های خلاصه ی جدولی (از جمله آستانه ها، سهم کانون ها، و آمار مکانی همبستگی) گزارش شد تا امکان مقایسه ی کمی فراهم گردد.

۴-۲ نتایج و بحث

نتایج قسمت اول مرحله نخست پژوهش که تراز بیشینه شاخص $I(p)$ را نشان می دهد و مربوط به بخش اول الگوریتم تشخیص جت تراز پایین است در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل در ساعات مختلف روزهای سه ماه ژوئن، ژوئیه و اوت سالهای ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ مقدار فشار تراز بیشینه شاخص $I(p)$ نشان داده شده است. بر اساس شکل مشاهده می شود که عموماً در ساعات ابتدایی و انتهایی هر روز تراز بیشینه شاخص $I(p)$ مقدار بیشتری



شکل ۲. نقشه‌های حرارتی روز-ساعت تراز بیشینه I(p) برای ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت در دوره‌ی ۲۰۲۱-۲۰۲۵ بر اساس داده‌های ERA5 (دامنه‌ی فشار: سطح زمین تا ۷۰۰ هکتوپاسکال).

دارد و این تراز به سطح زمین نزدیک تر است.

نتایج هر دو قسمت مرحله نخست این پژوهش که مربوط به الگوریتم تشخیص جت تراز پایین است در جدول های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در کل دوره ی مطالعه (جدول ۱)، مقدار مُد تراز هسته برابر با ۸۷۵ هکتوپاسکال بوده است. مقدار میانگین تراز هسته در کل دوره برابر با ۸۷۴ هکتوپاسکال بوده و صدک نودم توزیع

در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال قرار گرفته است که نشان دهنده ی وقوع دوره هایی با هسته های عمیق تر و نزدیک تر به سطح زمین است. سهم رخدادهای با تراز هسته ی برابر یا عمیق تر از ۹۰۰ هکتوپاسکال در کل دوره حدود ۶۷ درصد بوده، اما این سهم در برخی ماه ها افزایش یافته است.

جدول ۱. خلاصه آماری تراز فشار هسته جت تراز پایین در ماه های ژوئن، ژوئیه و اوت طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۵ بر اساس داده های بازتحلیل ERA5 (تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال). مقادیر شامل نما، میانگین، میانه، صدک های ۱۰ و ۹۰ و سهم رخدادهای نزدیک به سطح (≥ 900 hPa) و رخدادهای بالاتر از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال.

دوره زمانی	تعداد نمونه (n)	نما (hPa)	میانگین (hPa)	میانه (hPa)	صدک ۱۰ (hPa)	صدک ۹۰ (hPa)	سهم هسته ≤ 900 hPa (%)	سهم هسته < 700 hPa و ≤ 850 hPa سهم هسته (%)
۲۰۲۱-۲۰۲۵ (ژوئن، ژوئیه، اوت)	۲۵۷۴	۸۷۵	۸۷۴	۸۷۵	۷۷۵	۹۲۵	۶۷	۱۲

جدول ۲. ویژگی های توزیع ماهانه ی جت تراز پایین در ماه های تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) طی دوره ی ۲۰۲۱-۲۰۲۵ بر اساس داده های ERA5.

ماه	سال	سهم هسته < 700 hPa و ≤ 850 hPa سهم هسته (%)	سهم هسته ≤ 900 hPa (%)	صدک ۹۰ (hPa)	صدک ۱۰ (hPa)	میانه (hPa)	میانگین (hPa)	نما (hPa)	تعداد نمونه (n)
۶	۲۰۲۱	۱۶	۷۲	۹۲۵	۸۰۰	۹۰۰	۸۷۷/۷	۹۰۰	۱۷۰
۷	۲۰۲۱	۲۵	۵۷	۹۰۰	۷۵۰	۸۷۵	۸۵۲/۹	۸۷۵	۱۳۲
۸	۲۰۲۱	۲۹	۴۹	۹۰۰	۷۵۰	۸۷۵	۸۵۰/۴	۸۷۵	۳۷
۶	۲۰۲۲	۱۲	۶۱	۹۲۵	۸۵۰	۸۷۵	۸۷۸/۶	۸۷۵	۱۰۶
۷	۲۰۲۲	۱۷	۷۳	۹۲۵	۸۰۰	۹۰۰	۸۸۱/۳	۹۰۰	۲۳۱
۸	۲۰۲۲	۱۱	۵۶	۹۲۵	۷۵۰	۸۷۵	۸۶۳	۹۲۵	۱۲۵
۶	۲۰۲۳	۱۳	۶۹	۹۲۵	۸۵۰	۹۰۰	۸۸۱/۸	۹۰۰	۱۴۷
۷	۲۰۲۳	۱۱	۵۶	۹۲۵	۷۵۰	۸۷۵	۸۵۹/۱	۸۷۵	۲۱۱
۸	۲۰۲۳	۹	۶۶	۹۲۵	۸۰۰	۸۷۵	۸۷۶/۶	۸۷۵	۹۰
۶	۲۰۲۴	۱۰	۷۳	۹۲۵	۷۷۵	۸۷۵	۸۶۶/۹	۸۷۵	۷۹
۷	۲۰۲۴	۸	۷۱	۹۰۰	۸۲۵	۸۷۵	۸۷۴/۱	۸۷۵	۳۳۳
۸	۲۰۲۴	۸	۷۶	۹۲۵	۷۷۵	۹۰۰	۸۷۹/۵	۹۰۰	۲۰۸
۶	۲۰۲۵	۷	۶۹	۹۲۵	۸۷۵	۹۰۰	۸۹۲/۸	۸۷۵	۱۸۵
۷	۲۰۲۵	۶	۷۸	۹۲۵	۸۲۵	۸۷۵	۸۷۸/۴	۸۷۵	۳۲۸
۸	۲۰۲۵	۳	۸۴	۹۲۵	۸۲۵	۹۰۰	۸۸۷/۵	۹۲۵	۱۹۲

به طور مشخص، در تابستان سال های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ (جدول ۲)، افزایش محسوسی در تعداد ساعات همراه با

رخدادهای جت تراز پایین مشاهده می شود؛ به طوری که سهم قابل توجهی از این جتها مربوط به تراز هسته ای برابر یا

بزرگ‌تر از ۹۰۰ هکتوپاسکال بوده‌اند و سهم بسیار کمتری از جت‌های تراز پایین مربوط به ترازهای کوچک‌تر از ۷۰۰ هکتوپاسکال و بزرگ‌تر از ۸۵۰ هکتوپاسکال در این دوره‌ها مشاهده می‌شود که بیان‌گر پایین آمدن عمودی هسته‌ی جت در برخی تابستان‌هاست. در مجموع، نتایج مرحله نخست نشان می‌دهد که اگرچه ترازهای بزرگ‌تر از ۹۰۰ هکتوپاسکال به عنوان تراز غالب هسته‌ی جت در منطقه‌ی مورد مطالعه شناخته می‌شود، اما تغییرپذیری زمانی قابل توجهی وجود دارد که در برخی ماه‌ها و سال‌ها به شکل افزایش رخدادهای جت با هسته‌های عمیق‌تر بروز می‌کند. این ویژگی‌ها زمینه‌ی مناسبی برای بررسی نقش جت تراز پایین در انتقال و تشدید پدیده‌های گرد و غبار در فازهای بعدی مطالعه فراهم می‌سازد.

جدول ۳ (نتایج مرحله دوم) نشان می‌دهد که در کل دوره‌ی مورد بررسی، تنها حدود ۲۳/۶ درصد از نمونه‌های ساعتی گردوخاک با رخداد هم‌زمان جت تراز پایین همراه بوده‌اند، در حالی که بخش عمده‌ای از نمونه‌ها (۷۶/۴ درصد) در شرایط بدون LLJ ثبت شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که وقوع گردوخاک الزاماً هم‌زمان با حضور جت تراز پایین نیست و می‌تواند تحت

تأثیر فرآیندهای تجمعی، ماندگاری ذرات در جو، یا انتقال با تأخیر زمانی نسبت به رخداد جت باشد. با این وجود، نسبت میانگین شاخص‌ها نشان می‌دهد که حضور LLJ به طور معناداری با تقویت جرم گردوخاک سطحی همراه است؛ به گونه‌ای که نسبت میانگین DUSMASS در شرایط دارای LLJ به شرایط بدون LLJ برابر با ۱/۸۵۵ به دست آمده است. این مقدار بیانگر افزایش قابل توجه جرم گردوخاک در زمان‌هایی است که جت تراز پایین فعال بوده و نشان‌دهنده‌ی نقش بالقوه‌ی جت تراز پایین در تقویت فرآیندهای برداشت، بازتعلیق و انتقال افقی ذرات در لایه‌های نزدیک به سطح است. در مقابل، اثر LLJ بر شاخص نوری گردوخاک ضعیف‌تر است و نسبت میانگین DUEXTTAU تنها برابر با ۱/۰۸۶ محاسبه شده است. این تفاوت نشان می‌دهد که جت‌های تراز پایین بیش از آنکه باعث افزایش یکنواخت عمق نوری ستون هوا شوند، نقش مؤثرتری در افزایش جرم واقعی گردوخاک، به ویژه در نزدیکی سطح زمین، ایفا می‌کنند. همچنین باید توجه داشت که نسبت‌های ارائه شده در این جدول از مقایسه‌ی میانگین مقادیر شاخص‌ها در دو گروه زمانی (دارای LLJ و بدون LLJ) به دست آمده‌اند و نباید با نسبت تعداد نمونه‌ها اشتباه گرفته شوند.

جدول ۳. خلاصه آماری پیوند رخدادهای جت تراز پایین (LLJ) و شاخص‌های گردوخاک DUSMASS و DUEXTTAU بر اساس نمونه‌های ساعتی تابستان (JJA) طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۵. ستون «نسبت میانگین» LLJ/NoLLJ برابر با نسبت میانگین مقدار شاخص گردوخاک در ساعات دارای LLJ به میانگین آن در ساعات بدون LLJ است.

نسبت میانگین DUSMASS (LLJ/No LLJ)	نسبت میانگین DUEXTTAU (LLJ/No LLJ)	سهم LLJ از کل نمونه‌ها (%)	تعداد نمونه بدون LLJ	تعداد نمونه با LLJ
۱/۸۵۵	۱/۰۸۶	۲۳/۶	۸۳۴۶	۲۵۷۴

نتایج مرحله سوم (جدول ۴) نشان می‌دهد که در مقیاس مکانی استان خوزستان، بین فراوانی رخداد جت تراز پایین و شاخص‌های گردوخاک، به ویژه جرم

گردوخاک سطحی، یک هم‌تغییری مکانی مثبت و پایدار مشاهده می‌شود. برای شاخص DUEXTTAU، مقدار میانگین هم‌تغییری نرمال شده در کل دوره‌ی بررسی شده

(تابستان‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵) برابر با ۰/۷۱۴ به دست آمد که نشان‌دهنده ی غلبه ی هم تغییری مثبت در سطح منطقه است. سهم سلول‌های مکانی با هم تغییری مثبت برای این شاخص حدود ۸۱ درصد بوده و حدود یک سوم از سلول‌ها دارای هم تغییری قوی با قدر مطلق بزرگ‌تر یا مساوی ۱ هستند که بیانگر ناهمگنی مکانی اثر LLJ بر توزیع عمودی گردو خاک است. مقادیر صدک ۹۰ بالاتر از ۱/۵ نیز نشان می‌دهد که در بخش‌هایی از منطقه، هم‌زمانی فراوانی LLJ با افزایش قابل توجه به صورت یکنواخت در کل دامنه گسترش نیافته است. در مقابل، شاخص DUSMASS پاسخ قوی‌تری به تغییرات فراوانی جت تراز پایین نشان می‌دهد. میانگین هم تغییری نرمال‌شده ی این متغیر در کل دوره برابر با ۰/۸۳۵ بوده که به طور محسوسی بزرگ‌تر از مقدار متناظر برای DUEXTTAU است. بیش از ۸۷ درصد از سلول‌های مکانی دارای هم تغییری مثبت بین DUSMASS و فراوانی LLJ هستند و حدود یک چهارم از منطقه هم تغییری قوی را تجربه می‌کند. مقادیر صدک ۹۰ که در بسیاری از ماه‌ها به مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۶ می‌رسند، نشان

می‌دهد که در بخش‌های قابل توجهی از خوزستان، افزایش فراوانی جت تراز پایین با تشدید DUSMASS هم‌زمان است. این الگو حاکی از آن است که LLJ بیش از آنکه صرفاً بر ویژگی‌های نوری ستون هوا اثر بگذارد، با فرآیندهای برداشت، خیزش و انتقال ذرات در لایه‌های نزدیک به سطح زمین مرتبط است. بررسی تغییرات ماهانه و بین‌سالی نیز نشان می‌دهد که اگرچه شدت و گستره ی هم تغییری‌ها در سال‌ها و ماه‌های مختلف متفاوت است، اما الگوی کلی هم تغییری مثبت برای هر دو شاخص در تمام دوره حفظ می‌شود. این پایداری آماری، همراه با تعداد ثابت سلول‌های مکانی مورد بررسی، نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده تصادفی نبوده و بازتاب‌دهنده ی یک رابطه ی فیزیکی پایدار بین پویایی جت تراز پایین و توزیع گردو خاک در منطقه ی مطالعه هستند. به طور کلی، نتایج جدول تأیید می‌کند که جت تراز پایین نقش مهم‌تری در افزایش جرم گردو خاک سطحی نسبت به تغییر یکنواخت عمق نوری گردو خاک ایفا می‌کند و اثر آن به صورت مکانی ناهمگن در سطح استان خوزستان بروز می‌یابد.

جدول ۴. آمار مکانی هم تغییری نرمال‌شده بین فراوانی رخداد جت تراز پایین (LLJ) و شاخص‌های گردو خاک DUEXTTAU و DUSMASS در استان خوزستان طی ماه‌های تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) در دوره ی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵.

سال	ماه	شاخص	تعداد سلول مکانی	میانگین هم تغییری	انحراف معیار	میان	صدک ۱۰	صدک ۹۰	درصد هم تغییری قوی ($ Z \geq 1$) (%)
۲۰۲۱	۶	DUEXTTAU	۴۲	۰/۷۸۸	۰/۷۷۳	۰/۸۱	-۰/۲۰۵	۱/۴۴۲	۳۵/۷
۲۰۲۱	۷	DUEXTTAU	۴۲	۰/۷۵۵	۰/۶۴۵	۰/۸۷۹	-۰/۱۲۶	۱/۵۰۴	۴۰/۵
۲۰۲۱	۸	DUEXTTAU	۴۲	۰/۷۳۷	۰/۷۲۲	۰/۶۵۷	-۰/۰۴۲	۱/۷۱۵	۳۸/۱
۲۰۲۲	۶	DUEXTTAU	۴۲	۰/۷۲۸	۰/۷۲۱	۰/۷۴۶	-۰/۱۰۷	۱/۴۸۹	۳۳/۳
۲۰۲۲	۷	DUEXTTAU	۴۲	۰/۵۹۴	۰/۷۳۲	۰/۵۶۸	-۰/۲۲	۱/۳۲۷	۲۸/۶
۲۰۲۲	۸	DUEXTTAU	۴۲	۰/۴۹۳	۱/۰۴۹	۰/۲۵۷	-۰/۳۳۴	۰/۹۵۸	۹/۵
۲۰۲۳	۶	DUEXTTAU	۴۲	۰/۸۶۳	۰/۷۲۱	۰/۸۳۲	-۰/۰۱۲	۱/۷۰۳	۴۰/۵
۲۰۲۳	۷	DUEXTTAU	۴۲	۰/۶۱۳	۰/۶۱۸	۰/۶۹۵	-۰/۲۷۶	۱/۳۲۸	۳۱

۳۳/۳	۸۱	۱/۷۴	-۰/۰۶۶	۰/۶۱۸	۰/۷۷۳	۰/۷۳۸	۴۲	DUEXTTAU	۸	۲۰۲۳
۳۳/۳	۸۵/۷	۱/۸۰۶	-۰/۱۸۱	۰/۷۷۲	۰/۹۱۷	۰/۸۳۱	۴۲	DUEXTTAU	۶	۲۰۲۴
۳۸/۱	۸۳/۳	۱/۴۵۶	-۰/۰۴۹	۰/۷۸۸	۰/۷۴	۰/۷۹۶	۴۲	DUEXTTAU	۷	۲۰۲۴
۲۸/۶	۸۱	۱/۳۱۶	-۰/۳۶۴	۰/۷۷۸	۰/۶۴۴	۰/۶۲۲	۴۲	DUEXTTAU	۸	۲۰۲۴
۴۰/۵	۸۸/۱	۱/۶۷۱	-۰/۰۱	۰/۸۸	۰/۷۰۵	۰/۸۴۵	۴۲	DUEXTTAU	۶	۲۰۲۵
۴۰/۵	۷۸/۶	۱/۵۵۳	-۰/۱۶۹	۰/۶۷۲	۰/۶۸۸	۰/۶۹۲	۴۲	DUEXTTAU	۷	۲۰۲۵
۲۳/۸	۷۱/۴	۱/۵۵۳	-۰/۲۲۲	۰/۴۳۸	۰/۸۸۶	۰/۶۱	۴۲	DUEXTTAU	۸	۲۰۲۵
۳۳	۸۰/۶	۱/۵۰۴	-۰/۱۵۹	۰/۶۹۳	۰/۷۵۶	۰/۷۱۴	—	DUEXTTAU	۶	-۲۰۲۵
									۷/۸	۲۰۲۱
۱۹	۹۲/۹	۱/۸۴۵	۰/۰۰۸	۰/۷۷	۰/۹۱۵	۰/۸۷۱	۴۲	DUSMASS	۶	۲۰۲۱
۵۲/۴	۸۳/۳	۱/۳۹۳	-۰/۰۶۹	۱/۰۱	۰/۵۵۴	۰/۸۳۱	۴۲	DUSMASS	۷	۲۰۲۱
۳۸/۱	۹۰/۵	۱/۳۱۹	۰/۰۲۲	۰/۸۰۱	۰/۷۰۶	۰/۷۸	۴۲	DUSMASS	۸	۲۰۲۱
۲۱/۴	۹۰/۵	۱/۴۴۵	۰/۰۰۴	۰/۸۰۸	۰/۸۷۸	۰/۸۴۶	۴۲	DUSMASS	۶	۲۰۲۲
۱۱/۹	۸۱	۱/۳۷۴	-۰/۰۹۶	۰/۶۴۷	۱/۱۳۲	۰/۷۹۳	۴۲	DUSMASS	۷	۲۰۲۲
۱۱/۹	۷۳/۸	۱/۰۸۸	-۰/۲۴۳	۰/۳۴۹	۱/۶۶۷	۰/۶۷۹	۴۲	DUSMASS	۸	۲۰۲۲
۲۶/۲	۸۸/۱	۱/۷۳۹	۰/۰۰۱	۰/۸۶۶	۰/۷۰۹	۰/۸۶۸	۴۲	DUSMASS	۶	۲۰۲۳
۲۳/۸	۹۰/۵	۱/۶۱۴	۰/۰۱۷	۰/۸۴۸	۰/۷۹۵	۰/۸۳۸	۴۲	DUSMASS	۷	۲۰۲۳
۳۱	۸۸/۱	۱/۷۰۳	۰/۰۰۲	۰/۷۶	۰/۷۷۵	۰/۸۱۵	۴۲	DUSMASS	۸	۲۰۲۳
۱۶/۷	۸۸/۱	۱/۸۲۱	۰/۰۰۲	۰/۷۶۱	۱/۱۰۱	۰/۸۹۴	۴۲	DUSMASS	۶	۲۰۲۴
۳۱	۹۲/۹	۱/۶۴	۰/۰۴۱	۰/۸۳۹	۰/۹۰۴	۰/۸۸۵	۴۲	DUSMASS	۷	۲۰۲۴
۲۶/۲	۸۳/۳	۱/۷۸۱	-۰/۰۷۱	۰/۷۶۵	۰/۸۶۸	۰/۸۱۵	۴۲	DUSMASS	۸	۲۰۲۴
۲۱/۴	۹۰/۵	۱/۹۶۳	۰/۰۳۳	۰/۸۴۳	۰/۸۰۴	۰/۸۹۶	۴۲	DUSMASS	۶	۲۰۲۵
۲۸/۶	۹۰/۵	۲/۰۲۸	۰/۰۳۲	۰/۷۱۹	۰/۹۸	۰/۸۹۲	۴۲	DUSMASS	۷	۲۰۲۵
۱۶/۷	۸۱	۱/۵۹۵	-۰/۰۲۲	۰/۵۲۴	۱/۴۳۷	۰/۸۱۶	۴۲	DUSMASS	۸	۲۰۲۵
۲۵/۱	۸۷	۱/۶۲۳	-۰/۰۲۳	۰/۷۵۴	۰/۹۴۸	۰/۸۳۵	—	DUSMASS	۶	-۲۰۲۵
									۷/۸	۲۰۲۱

نتایج بخش اول مرحله چهارم نشان می‌دهد که اگرچه پیوند میان رخداد های جت تراز پایین و شاخص های گردو خاک در کل دوره ی مورد بررسی از پایداری نسبی برخوردار است، اما شدت این پیوند در مقیاس بین سالی دچار نوسانات قابل توجهی می‌شود. برخلاف نتایج مرحله دوم که بر مقایسه ی کلی شرایط دارای LLJ و بدون LLJ در کل دوره تمرکز داشت، در این مرحله تغییرات زمانی این نسبت در سطح سالانه بررسی شده است. بر اساس میانگین سالانه ی نسبت LLJ به بدون LLJ (جدول ۵)، مقدار این شاخص در سال ۲۰۲۱ نسبتاً بالا بوده و در سال های ۲۰۲۲ و به ویژه ۲۰۲۳ کاهش یافته

است. این کاهش می‌تواند بیانگر تضعیف نسبی نقش جت تراز پایین در تشدید گردو خاک در این سال ها یا تأثیر هم زمان سایر عوامل محیطی نظیر تغییرات شرایط سطحی، رطوبت خاک و وضعیت منابع گردو خاک باشد. در مقابل، سال ۲۰۲۴ بیشترین مقدار نسبت LLJ به بدون LLJ را در کل دوره نشان می‌دهد که بیانگر تقویت مجدد پیوند دینامیکی میان رخداد های جت تراز پایین و فرآیندهای برداشت، بازتعلیق و انتقال ذرات گردو خاک است. در سال ۲۰۲۵ نیز اگرچه این نسبت نسبت به سال ۲۰۲۴ اندکی کاهش یافته است، اما همچنان در مقایسه با سال های ابتدایی دوره در سطح نسبتاً بالایی

باقی مانده است. مقایسه‌ی دو شاخص گردوخاک نشان می‌دهد که نسبت-LLJ گردوخاک برای متغیر جرم گردوخاک سطحی (DUSMASS) به‌طور سیستماتیک بزرگ‌تر از مقدار متناظر برای شاخص نوری گردوخاک (DUEXTTAU) است. این تفاوت بیانگر آن است که جت تراز پایین بیش از آنکه باعث افزایش یکنواخت عمق نوری ستون هوا شود، نقش مؤثرتری در افزایش جرم واقعی گردوخاک، به‌ویژه در لایه‌های نزدیک به سطح زمین، ایفا می‌کند. مقادیر انحراف معیار درون‌تابستانی نیز نشان می‌دهد که تغییرپذیری ماهانه‌ی نسبت-LLJ گردوخاک برای DUSMASS در اغلب

سال‌ها بزرگ‌تر از DUEXTTAU است که می‌تواند بازتاب‌دهنده‌ی حساسیت بیشتر جرم گردوخاک به نوسانات دینامیکی کوتاه‌مدت باشد. در مجموع، نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که علی‌رغم نوسانات بین‌سالی، نسبت-LLJ گردوخاک در تمامی سال‌های بررسی‌شده بزرگ‌تر از یک باقی مانده است. این موضوع تأیید می‌کند که حضور جت تراز پایین در تمام دوره‌ی مطالعه به‌طور متوسط با افزایش گردوخاک همراه بوده و نقش آن به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های دینامیکی مؤثر در سامانه‌ی گردوخاک منطقه‌ی خوزستان پایدار اما متغیر در مقیاس چندساله است.

جدول ۵. خلاصه‌ی بین‌سالی و چندساله‌ی نسبت میانگین گردوخاک در شرایط دارای جت تراز پایین (LLJ) به شرایط بدون LLJ برای شاخص‌های DUEXTTAU و DUSMASS در تابستان (ژوئن-ژوئیه-اوت) طی دوره‌ی ۲۰۲۱-۲۰۲۵. مقادیر انحراف معیار بیانگر تغییرپذیری درون‌تابستانی (بین ماه‌های تابستان هر سال) هستند.

سال (ماه‌های ژوئن تا اوت)	نسبت میانگین DUEXTTAU (LLJ/No LLJ)	نسبت میانگین DUSMASS (LLJ/No LLJ)	انحراف معیار درون تابستانی DUEXTTAU	انحراف معیار درون تابستانی DUSMASS
۲۰۲۱	۱/۱۳۵	۱/۸۵۵	۰/۲۷۷	۰/۴۳۳
۲۰۲۲	۱/۰۵۰	۱/۸۷۳	۰/۰۵۳	۰/۱۷۶
۲۰۲۳	۱/۰۵۸	۱/۷۹۷	۰/۰۱۵	۰/۳۰۳
۲۰۲۴	۱/۱۱۱	۱/۸۹۲	۰/۰۶۱	۰/۱۱۷
۲۰۲۵	۱/۰۷۷	۱/۸۵۹	۰/۱۳۸	۰/۱۲۳
۲۰۲۵-۲۰۲۱	۱/۰۸۶	۱/۸۵۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶

نتایج بخش دوم مرحله چهارم نشان می‌دهد که توزیع مکانی گردوخاک در استان خوزستان دارای ناهمگنی قابل‌توجهی است و تنها بخش محدودی از دامنه‌ی مکانی، مقادیر بسیار بالای گردوخاک را تجربه می‌کند. بر اساس مقادیر آستانه‌ی صدک ۹۰ ارائه‌شده در جدول ۶، مقدار آستانه برای شاخص نوری DUEXTTAU

حدود ۰/۴۱ و برای شاخص جرمی DUSMASS برابر با $6/15 \times 10^{-7}$ به‌دست آمده است. اختلاف مرتبه‌ی عددی این آستانه‌ها بازتاب تفاوت ماهیت فیزیکی این دو شاخص و حساسیت متفاوت آن‌ها به فرآیندهای تولید، بازتعلیق و انتقال گردوخاک است.

جدول ۶. مقادیر آستانه‌ی صدک ۹۰ توزیع مکانی میانگین تابستانه شاخص‌های گردوخاک در استان خوزستان طی دوره‌ی ۲۰۲۱-۲۰۲۵.

شاخص گردوخاک	آستانه صدک ۹۰
DUEXTTAU	۰/۴۰۶
DUSMASS	$6/15 \times 10^{-7}$

مطابق نتایج جدول ۷، کانون‌های گردوخاک شناسایی شده تنها ۵ سلول از مجموع ۴۲ سلول مکانی استان خوزستان را شامل می‌شوند که معادل حدود ۱۲ درصد از کل دامنه‌ی مکانی است. این سهم محدود نشان می‌دهد که تشدید گردوخاک عمدتاً به نواحی خاص و متمرکز وابسته است و پدیده‌ی گردوخاک شدید

به صورت یکنواخت در سطح استان گسترش نیافته است. شباهت سهم مکانی کانون‌ها برای هر دو شاخص DUEXTTAU و DUSMASS بیانگر آن است که اگرچه این دو متغیر جنبه‌های متفاوتی از گردوخاک را توصیف می‌کنند، اما نواحی با فعالیت گردوخاکی شدید تا حد زیادی مشترک هستند.

جدول ۷. سهم مکانی کانون‌های گردوخاک شناسایی شده بر اساس صدک ۹۰ توزیع مکانی میانگین تابستانه در استان خوزستان طی دوره‌ی ۲۰۲۱-۲۰۲۵.

شاخص گردوخاک	درصد سلول‌های کانونی (%)	تعداد سلول‌های کانونی	کل سلول‌ها
DUEXTTAU	۱۱/۹	۵	۴۲
DUSMASS	۱۱/۹	۵	۴۲

نتایج همبستگی فضایی بین گردوخاک و باد لایه‌ی پایین جو (جدول ۸) تفاوت معناداری را در پاسخ شاخص‌های گردوخاک نشان می‌دهد. در این جدول، r برای هر سلول مکانی به طور مستقل بر اساس سری زمانی ناهنجاری‌های ماهانه طی JJA ۲۰۲۱-۲۰۲۵ محاسبه و سپس توزیع مکانی r در سطح سلول‌ها خلاصه شده است. برای شاخص DUEXTTAU، میانگین مکانی ضریب همبستگی پیرسون حدود 0.02 - بوده و تنها حدود ۴۳ درصد از سلول‌های مکانی دارای همبستگی مثبت هستند، در حالی که هیچ سلولی همبستگی قوی ($|r| \geq 0.7$) را نشان نمی‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که تغییرات نوری

گردوخاک الزاماً به طور مستقیم با نوسانات شدت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال کنترل نمی‌شوند. در مقابل، شاخص DUSMASS همبستگی مثبت قوی‌تر و گسترده‌تری با باد لایه‌ی پایین نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که میانگین مکانی ضریب همبستگی r حدود 0.45 بوده و حدود ۷۸ درصد از سلول‌های مکانی دارای همبستگی مثبت هستند. علاوه بر این، حدود ۳۸ درصد از دامنه‌ی مکانی همبستگی قوی ($|r| \geq 0.7$) را تجربه می‌کند. این الگو به وضوح نقش باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال را در تشدید برداشت، بازتعلیق و انتقال جرم واقعی گردوخاک در نزدیکی سطح زمین برجسته می‌سازد.

جدول ۸. خلاصه آماری توزیع مکانی ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین ناهنجاری‌های ماهانه شاخص‌های گردوخاک و ناهنجاری‌های سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در سلول‌های شبکه‌ی استان خوزستان طی تابستان‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۵.

شاخص گردوخاک	تعداد سلول	میانگین مکانی ضریب همبستگی (r)	انحراف معیار مکانی r	میان	صدک ۱۰	صدک ۹۰	درصد سلول‌های همبستگی مثبت (%)	درصد سلول‌های با همبستگی قوی ($ r \geq 0.7$) (%)
DUEXTTAU	۴۲	-۰/۰۲	۰/۳۰	-۰/۰۳	-۰/۴۱	۰/۳۴	۴۲/۹	۰
DUSMASS	۴۲	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۵۷	-۰/۱۲	۰/۹۲	۷۸/۶	۳۸/۱

در مجموع، نتایج این مرحله نشان می‌دهد که اگرچه همه‌ی ابعاد گردوخاک به یک اندازه به پویایی باد لایه‌ی پایین حساس نیستند، اما جرم گردوخاک سطحی به طور

معناداری با شدت باد در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال هم‌راستا است. این یافته‌ها نقش کلیدی جریان‌های پرسرعت لایه‌ی پایین جو، از جمله جت‌های تراز پایین، را در

تشدید فرآیندهای فیزیکی گردو خاک در خوزستان تأیید کرده و شواهد مکانی مستقلی برای نتایج مراحل پیشین فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی نقش جت تراز پایین در کنترل گسیل و انتقال گردو خاک در استان خوزستان طی فصل گرم سال انجام شد و برای نخستین بار پیوند زمانی و مکانی میان فعالیت جت‌های تراز پایین و شاخص‌های نوری و جرمی گردو خاک در این کانون بحرانی جنوب غرب ایران به صورت کمی و نظام‌مند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اگرچه جت‌های تراز پایین به عنوان یکی از سازوکارهای دینامیکی مهم در سامانه گردو خاک منطقه عمل می‌کنند، اما اثر آن‌ها یکنواخت، هم‌زمان و هم‌مقیاس با همه‌ی ابعاد گردو خاک نیست.

تحلیل ساختار عمودی جت‌ها نشان داد که سهم رخدادهای با هسته‌ی عمیق‌تر (≤ 900 هکتوپاسکال) در برخی ماه‌ها و سال‌ها، به ویژه در تابستان‌های اخیر، افزایش یافته است که با سازوکارهای شناخته شده‌ی جت‌های تراز پایین شبانه و نقش لایه مرزی پایدار سازگار است. این تغییرپذیری عمودی زمینه‌ی لازم برای بررسی اثرات بالقوه‌ی جت‌ها بر فرآیندهای سطحی گردو خاک را فراهم می‌کند. در مقیاس زمانی ساعتی، نتایج نشان داد که تنها حدود یک چهارم نمونه‌های گردو خاک هم‌زمان با رخداد جت تراز پایین ثبت شده‌اند که بیانگر آن است که وقوع گردو خاک الزاماً وابسته به حضور هم‌زمان LLJ نیست و فرآیندهایی نظیر ماندگاری ذرات در جو و انتقال با تأخیر زمانی نقش مهمی ایفا می‌کنند. با این حال، مقایسه‌ی کمی شرایط دارای LLJ و بدون LLJ آشکار ساخت که حضور جت تراز پایین به طور معناداری با افزایش جرم گردو خاک سطحی همراه است؛ به گونه‌ای

که نسبت میانگین DUSMASS در شرایط دارای LLJ حدود ۱/۸۵ به دست آمد، در حالی که این نسبت برای شاخص نوری DUEXTTAU تنها حدود ۱/۰۹ بود. این تفاوت نشان می‌دهد که جت‌های تراز پایین بیش از آنکه موجب افزایش یکنواخت عمق نوری ستون هوا شوند، نقش مؤثرتری در برداشت، بازتعلیق و افزایش جرم واقعی گردو خاک در لایه‌های نزدیک به سطح زمین دارند.

تحلیل هم‌تغییری مکانی نیز این نتیجه را تقویت کرد. فراوانی رخداد جت تراز پایین با شاخص جرمی گردو خاک هم‌نوسانی مثبت قوی‌تر و پایدارتر نسبت به شاخص نوری نشان داد و این هم‌تغییری در بخش قابل توجهی از دامنه‌ی مکانی مطالعه مشاهده شد. در مقابل، هم‌تغییری بین فراوانی LLJ و DUEXTTAU ضعیف‌تر و ناهمگن‌تر بود که بیانگر حساسیت بیشتر ویژگی‌های نوری گردو خاک به فرآیندهای ستونی، رطوبتی و انتقال دوربرد است. در مقیاس بین‌سالی، نتایج نشان داد که پیوند LLJ-گردو خاک علی‌رغم نوسانات قابل توجه، در کل دوره‌ی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ پایدار باقی مانده است. نسبت میانگین گردو خاک در شرایط دارای LLJ به بدون LLJ در تمامی سال‌ها بزرگ‌تر از یک بوده و بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۲۴ مشاهده شده است. همچنین، نسبت LLJ-گردو خاک برای DUSMASS در همه‌ی سال‌ها به طور سیستماتیک بزرگ‌تر از مقدار متناظر برای DUEXTTAU بوده است که بار دیگر بر نقش کلیدی جت‌های تراز پایین در کنترل جرم گردو خاک سطحی تأکید می‌کند. تحلیل مکانی مبتنی بر داده‌های ترکیبی ERA5 و MERRA-2 نشان داد که کانون‌های فعال گردو خاک تنها بخش محدودی از دامنه‌ی مکانی استان خوزستان را دربر می‌گیرند و حدود ۱۲ درصد از سلول‌های شبکه را شامل می‌شوند. این کانون‌ها برای هر دو شاخص نوری و جرمی تا حد زیادی هم‌مکان هستند که بیانگر وجود منابع سطحی مشترک و شرایط

فضایی بین گردوخاک و سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال برای شاخص جرمی گردوخاک و شاخص نوری برابر با ۱/۸۳ است که در این مطالعه مقدار عددی این نکته‌ی مورد انتظار، محاسبه شده است. نکته‌ای که در بسیاری از مطالعات پیشین به صورت کمی و مکانی مورد توجه قرار نگرفته بود. از این منظر، نتایج حاضر با تکمیل چارچوب مفهومی موجود، نشان می‌دهد که در قانون‌های فعال گردوخاک نظیر خوزستان، استفاده‌ی هم‌زمان از شاخص‌های جرمی و نوری برای ارزیابی نقش سازوکارهای دینامیکی لایه‌ی پایین ضروری است.

منابع

- Alaiejad, M., Goudarzi, G., Yengejeh, R. J., Davami, A. H., & Hassan, E. M. (2025). An investigation of long-term dust storms in western Iran: An insight into emission sources using HYSPLIT model and MERRA-2 data (2012–2018). *Natural Hazards*, 121(8), 9519-9542.
- Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P., & Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. *International Journal of Climatology*, 36(4).
- Bonner, W. D. (1968). Climatology of the low level jet. *Monthly Weather Review*, 96(12), 833–850.
- Fiedler, S., Schepanski, K., Heinold, B., Knippertz, P., & Tegen, I. (2013). Climatology of nocturnal low-level jets over North Africa and implications for modeling mineral dust emission. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6100-6121.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., & Wargan, K. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454.
- Ghassabi, Z., & Karami, S. (2025). Investigating the rare phenomenon of dust in the southern shores of the Caspian Sea. *Journal of Air Pollution and Health*, 10(2), 243–268.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale

دینامیکی مشابه است. علاوه بر این، همبستگی فضایی بین ناهنجاری‌های ماهانه‌ی گردوخاک و سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال نشان داد که جرم گردوخاک سطحی پاسخ قوی‌تری به تغییرات شدت باد لایه‌ی پایین دارد؛ به گونه‌ای که میانگین مکانی ضریب همبستگی برای DUSMASS مثبت و قابل توجه بوده، در حالی که برای DUEXTTAU نزدیک به صفر باقی مانده است.

در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که نقش جت‌های تراز پایین در گردوخاک خوزستان نه به صورت یک محرک یکنواخت، بلکه به عنوان یک سازوکار دینامیکی انتخابی و وابسته به شاخص فیزیکی گردوخاک عمل می‌کند. جت‌های تراز پایین بیش از آنکه ویژگی‌های نوری ستون هوا را کنترل کنند، در تشدید فرآیندهای برداشت، بازتعلیق و انتقال جرم واقعی گردوخاک در نزدیکی سطح زمین مؤثر هستند. این یافته‌ها ضمن تکمیل نتایج مطالعات پیشین، شواهد کمی و مکانی مستقلی برای نقش کلیدی جریان‌های پرسرعت لایه‌ی پایین جو در چرخه گردوخاک جنوب غرب ایران ارائه می‌دهند و می‌توانند مبنایی برای بهبود مدل‌سازی گردوخاک، پیش‌بینی رخدادهای شدید و طراحی راهبردهای مدیریت ریسک زیست‌محیطی در این منطقه حساس باشند.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین انجام‌شده در خاورمیانه و جنوب غرب آسیا که بر نقش بادهای لایه‌ی پایین و جریان‌های پرسرعت شبانه در تشدید گردوخاک تأکید کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (مانند بونر، ۱۹۶۸؛ رایف و همکاران، ۲۰۱۰؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، همان‌طور که انتظار می‌رود تمایز آشکار بین پاسخ شاخص جرمی گردوخاک (DUSMASS) و شاخص نوری (DUEXTTAU) به فعالیت جت تراز پایین، نشان می‌دهد که اثر LLJ بیش از آنکه بر ویژگی‌های ستونی گردوخاک مسلط باشد، به‌طور مستقیم با فرآیندهای نزدیک به سطح زمین مرتبط است؛ و نسبت همبستگی

- attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3).
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science and Business Media.
- Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., & Mohammadpour, K. (2021). Long-term variability of dust events in southwestern Iran and its relationship with drought. *Atmosphere*, 12(10), 1350.
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (1997). Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D6), 6831–6864.
- Hashemi Devin, M., Ranjbar SaadatAbadi, A., Fattahi, E., Karami, S., & Sehat Kashani, S. (2022). Study of the effect of low-level jets on genesis and transport of dust in the west and southwest of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(1), 1–19. <https://doi.org/10.30499/ijg.2021.278682.13>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Javadian, M., Behrangi, A., & Sorooshian, A. (2019). Impact of drought on dust storms: Case study over southwest Iran. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124029.
- Kok, J. F., Ridley, D. A., Zhou, Q., Miller, R. L., Zhao, C., Heald, C. L., Ward, D. S., Albani, S., & Haustein, K. (2017). Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. *Nature Geoscience*, 10(4), 274–278.
- Mahowald, N., Albani, S., Kok, J. F., Engelstaeder, S., Scanza, R., Ward, D. S., & Flanner, M. G. (2014). The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Research*, 15, 53–71.
- Maleki, H., Sorooshian, A., Goudarzi, G., Nikfal, A., & Baneshi, M. M. (2016). Temporal profile of PM10 and associated health effects in one of the most polluted cities of the world (Ahvaz, Iran) between 2009 and 2014. *Aeolian Research*, 22, 135–140.
- Notaro, M., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2013). Trajectory analysis of Saudi Arabian dust storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6028–6043.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2–1.
- Pu, B., & Ginoux, P. (2018). How reliable are CMIP5 models in simulating dust optical depth? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(16), 12491–12510.
- Rahnama, M., Sehat, S., Karami, S., Ranjbar, A., & Khoddam, N. (2023). Vegetation cover variation and dust frequency analysis over West of Asia. *Nivar*, 47(122–123), 17–36. <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.395654>
- Ridley, D. A., Heald, C. L., & Prospero, J. M. (2014). What controls the recent changes in African mineral dust aerosol across the Atlantic? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(11), 5735–5747.
- Rife, D. L., Pinto, J. O., Monaghan, A. J., Davis, C. A., & Hannan, J. R. (2010). Global distribution and characteristics of diurnally varying low-level jets. *Journal of Climate*, 23(19), 5041–5064.
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., & Sun, Z. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan Iran: Insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15(1), 13626.
- Yu, H., Chin, M., Bian, H., Yuan, T., Prospero, J. M., Omar, A. H., Remer, L. A., Winker, D. M., Yang, Y., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2015). Quantification of trans-Atlantic dust transport from seven-year (2007–2013) record of CALIPSO lidar measurements. *Remote Sensing of Environment*, 159, 232–249.

Role of the low-level jet in the occurrence of summer dust events in Khuzestan province, southwest Iran

Sakineh Khansalari^{1*} and Ebrahim Fattahi²

¹ Assistant Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

² Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

(Received: 12 February 2026, Accepted: 03 May 2026)

Summary

Dust storms represent one of the most critical environmental hazards in southwest Iran, particularly in Khuzestan Province, where both local and transboundary sources contribute to severe summertime air pollution. Among the atmospheric drivers of dust activity, the low-level jet (LLJ) is recognized as a key dynamical mechanism capable of enhancing surface wind stress, dust emission, and horizontal transport. Despite its importance, the quantitative linkage between LLJ variability and dust loading in this region has not been systematically investigated. In this study, the role of summertime low-level jets in modulating dust activity over Khuzestan during June–August (JJA) of 2021–2025 is examined using a combined analysis of ERA5 reanalysis and MERRA-2 aerosol products. LLJ events were identified based on dynamical constraints rather than sole reliance on wind speed maxima, ensuring discrimination between true low-level jets and background synoptic winds. Temporal and spatial relationships between LLJ occurrence and dust indicators were assessed using both optical (DUEXTTAU) and mass-based (DUSMASS) dust variables. Results show that LLJ frequently occurs at lower pressure levels (under 900hPa), 67% of these cases corresponds to dynamically meaningful LLJs penetrating toward the surface. On average, approximately 24% of summertime hourly dust observations coincide with LLJ events. Despite this limited temporal overlap, dust mass concentrations increase substantially during LLJ conditions: the mean DUSMASS under LLJ conditions is about 1.86 times higher than during non-LLJ periods, whereas the corresponding ratio for DUEXTTAU is notably smaller (~1.09). This contrast highlights the stronger sensitivity of near-surface dust mass to low-level dynamical forcing compared to column-integrated optical properties. Spatial analysis reveals pronounced heterogeneity in dust activity across the study domain. Dust hotspots identified using the 90th percentile of summer-mean dust distributions occupy only about 12% of the total spatial grid, indicating that severe dust activity is confined to limited source-prone areas rather than being spatially uniform. Furthermore, grid-cell-based spatial correlation analysis between monthly dust anomalies and 925 hPa wind speed anomalies demonstrates a marked difference between dust indicators. While DUEXTTAU exhibits near-zero mean spatial correlation with low-level wind speed and no areas of strong correlation, DUSMASS shows a moderate positive mean correlation ($r \approx 0.45$), with approximately 78% of grid cells displaying positive correlations and nearly 38% exhibiting strong correlations ($|r| \geq 0.7$). Overall, the results indicate that LLJs play a critical role in enhancing dust mass emission and transport in Khuzestan, while their influence on dust optical depth is weaker and more spatially variable. These findings emphasize the importance of low-level dynamical processes—particularly LLJs—in shaping the regional dust cycle and provide independent spatial and temporal evidence supporting the role of Khuzestan as a key contributor to dust activity in southwest Asia.

Keywords: Low-level jet, dust, Khuzestan province, ERA5, DUSMASS, DUEXTTAU

* Corresponding author:

khansalari@yahoo.com