مجله علمی‌پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان

دورهٔ ۱۴، شمارهٔ ۲ (پیاپی ۴۷)، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۸۱ـ۱۰۱

مقاله پژوهشی

تحلیل ارتباط الگوهای همدیدی ورودی به ایران بر رخدادهای خشکی استان لرستان (آئروسل‌های جوّی) با تأکید بر نقش کم‌فشار سودانی

آزاده پولادوند،[۱] غلامعلی مظفری،[۲*] حمیدرضا غفاریان،[۳] کمال امیدوار،[۴] احمد مزیدی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲**

چکیده

در این پژوهش به بررسی ارتباط بین الگوهای همدیدی ورودی به ایران، به‌ویژه سامانهٔ کم‌فشار سودانی، با رخدادهای خشکی و آئروسل‌های جوی در استان لرستان پرداخته شده و با استفاده از داده‌های هواشناسی سینوپتیک سال (۱۹۹۱–۲۰۲۰)، الگوهای همدیدی مؤثر بر انتقال آئروسل‌ها تحلیل و طبقه‌بندی گردیده است. داده‌های خشکی و نقشه‌های فشار سطح دریا، ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، نم ویژه و امگا از NCEP/NCAR در محیط GRADS ترسیم و بررسی شدند. نتایج نشان داد که سامانهٔ کم‌فشار سودانی در انتقال آئروسل‌ها به لرستان، به‌ویژه در بهار و تابستان، نقش کلیدی دارد. ضعف این سامانه و عدم ادغام آن با سامانه‌های مدیترانه‌ای، به‌دلیل تسلط کم‌فشارهای عربستان و آزور، باعث خشکی غیرمنتظره و افزایش غلظت آئروسل‌ها در لرستان شده است. تحلیل نقشه‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داد که استقرار سامانهٔ کم‌فشار سودانی شرایط مناسبی برای انتقال ذرات معلق از مناطق بیابانی جنوب غرب آسیا به لرستان فراهم می‌کند. تقابل توده‌هوای سرد سیبری و هوای گرم سودانی، به‌ویژه در شرایط عدم فرارفت رطوبت، نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد خشکی و افزایش غلظت آئروسل‌ها دارد. همچنین بررسی تعداد روزهای گردوغباری در استان لرستان طی دورهٔ ۱۹۹۱–۲۰۲۰ نشان می‌دهند که تعداد روزهای گردوغباری در استان لرستان بین ۰ تا ۱۴۰ روز در سال متغیر بوده است.

کلیدواژه‌ها: سامانهٔ سودانی، رخداد گردوغبار، لرستان.

۱. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، gmozafari@yazd.ac.ir

۳. دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴. استاد گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۵. دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

DOI: 10.22052/deej.2025.256364.1096

مقدمه و بیان مسئله

سامانهٔ کم‌فشار سودانی یکی از مهم‌ترین سامانه‌های مؤثر بر آب‌وهوای ایران در دورهٔ سرد سال است. این سامانه که از عناصر اصلی گردش عمومی جو در شمال آفریقا محسوب می‌شود، عمدتاً در غرب اتیوپی و کشور سودان شکل می‌گیرد (صیاد و همکاران، ۲۰۲۱). سامانهٔ کم‌فشار سودانی با ایجاد خشکی و وزش بادهای شدید، موجب افزایش آئروسل‌های جوّی و وقوع توفان‌های گردوغبار می‌شود که بر سلامت انسان و اقلیم منطقه تأثیر منفی دارد (جعفری و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعات نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، تشدید خشکسالی و تغییرات اقلیمی، فراوانی و شدت توفان‌های گردوغبار را افزایش داده است. در فصول سرد، با عمیق‌تر شدن ناوهٔ مدیترانه، سامانهٔ کم‌فشار سودانی فعال شده و با حرکت به‌سمت ایران، موجب بارندگی می‌شود (لشکری و همکاران، ۲۰۱۳).

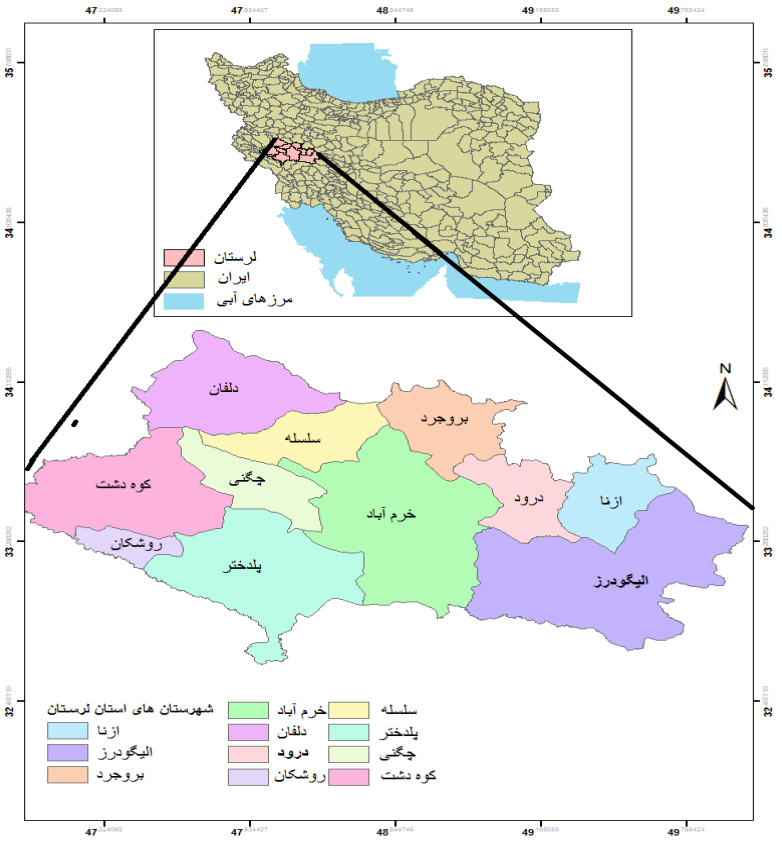
مطالعات داخلی و خارجی مختلفی درزمینهٔ سامانه‌های سودانی و تأثیر آن بر اقلیم انجام شده است. لشکری (۲۰۱۳) تأکید کرده که عدم ادغام مناسب سامانهٔ سودانی با سامانه‌های مدیترانه‌ای باعث کاهش شدید بارش‌ها در ایران می‌شود. موقری و خسروی (۲۰۱۴) مسیرهای اصلی ورود سامانه‌های سودانی به ایران را شناسایی کردند؛ این سامانه‌ها عمدتاً از سودان یا شمال اتیوپی شروع شده، سپس به‌سمت عرضه‌ای بالاتر حرکت و ازطریق دریای سرخ، عربستان و کویت وارد ایران می‌شوند. سامانه‌ها پس از ورود به ایران اغلب مسیرهای متفاوتی در خاک کشور طی می‌کنند، مثلاً مسیر سودانی از دریای سرخ به خلیج فارس و سپس به استان‌های بوشهر و خوزستان وارد ایران می‌شود، مسیر سامانه‌های سودانی کمی جنوبی‌تر بوده و از جنوب سودان و شمال اتیوپی آغاز می‌شود. مطالعهٔ میرزایی و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد در خشکسالی‌های پاییزه، بی هنجاری‌های شدید مثبت در سطح زمین بیانگر حاکمیت بیشتر شرایط پرفشار بوده که مانع ورود کم‌فشارها به منطقه گردیده است. بی هنجاری‌های مثبت در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیانگر حاکمیت پرارتفاع بوده که مانع انتقال تودهٔ هوای گرم و مرطوب عرض‌های پایین‌تر به سطح منطقه شده است. با استفاده از داده‌های ۴۰ ساله، صبوری و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های شدید در جنوب شرق ایران و ارتباط آن با سامانه‌های کم‌فشار سودانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در این منطقه، شدت و فراوانی بارش‌های شدید افزایش یافته و حدود ۴۹٪ از نقاط، روند مثبت قابل توجهی را نشان می‌دهند. این افزایش با فعالیت و فراوانی بیشتر مراکز کم‌فشار سودانی مرتبط است.

آلپرت[1] و همکاران (۱۹۹۰) نشان دادند منطقهٔ قبرس به‌دلیل توقف طولانی‌مدت سیکلون‌ها، یک ناحیهٔ سیکلون‌زایی مهم است. فاطمی و همکاران (۲۰۱۷) با تحلیل مؤلفهٔ اصلی دورهٔ خشکسالی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیان کردند که گسترش کم‌ارتفاع جنب قطبی به عرض‌های پایین باعث جنوبی شدن مناطق پرارتفاع مانند سیبری و ایجاد پرفشارهای محلی شده که هوای سرد، بدون ابر و پایداری هوا را به دنبال دارد و سبب خشکسالی می‌شود. امیدوار و همکاران (۲۰۱۹) با شناسایی وقایع جوّی در اسفند ۱۳۸۰، نشان دادند هم‌زمانی پرفشار مهاجر شمال شرق ایران و کم‌فشار غربی بر روی ایران، منجر به ناپایداری و وزش بادهای شدید شرقی و بروز طوفان گردوغبار در خراسان شده است. سلامتی هرمزی و همکاران (۲۰۱۶) با روش ترکیبی همدید–دورکاوی در مطالعهٔ طوفان گرد و خاک هرمزگان نشان دادند که نفوذ فرابار سیبری به نواحی جنوبی ایران، باعث ایجاد تضاد حرارتی و افزایش گرادیان فشار شده و بادهای برخاسته، گرد و خاک را از بیابان‌های مرکزی ایران به هرمزگان منتقل کرده است. نصیری و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که ضخامت ابر و تراکم آئروسل‌ها (COT) نقش مهمی در بارش‌های استان خوزستان دارد. دلبسته و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی شاخص AOD در جنوب شرق ایران دریافتند که بیشترین بارش‌ها در محدودهٔ خاصی از تراکم آئروسل‌ها رخ می‌دهد و افزایش بیش از حد تراکم باعث کاهش بارش می‌شود؛ یعنی وجود رابطهٔ غیرخطی (یک چرخهٔ بازخورد منفی) بین آئروسل‌ها و بارندگی. بیتان و سارونی[2] (۱۹۹۲) به نوسانات ناوهٔ فشاری خلیج فارس و تأثیر آن روی آب‌وهوای روزانهٔ لوانت پرداختند؛ نوسانات روزانهٔ فشار عمدتاً در ایستگاه‌های حاشیهٔ ناوه بیشتر است. دایان و آبرامسکی[3] (۲۰۰۱) و کاهانا[4] و همکاران (۲۰۰۲) بررسی کردند که ژرف شدن ناوهٔ

1. Alpert
2. Bitan & Sa'aroni
3. Dayan & Abramski
4. Kahana

ارتفاع تراز میانی جو و توسعهٔ ناوهٔ فشاری دریای سرخ جت جنب حاره‌ای را تقویت کرده و در وقوع سیل‌های بزرگ بیابان نقب نقش داشته‌اند. محمدی و همکاران (۲۰۱۲) تأکید کردند سامانه‌های سودانی پس از ورود به ایران معمولاً مسیرهای خود را تغییر می‌دهند و به‌سمت شمال غربی–جنوب شرقی یا غربی‌شرقی به‌سمت شرق کشور حرکت می‌کنند.

این پژوهش به تحلیل روابط علّی–معلولی بین سیستم‌های سینوپتیک (همدیدی) و توزیع آئروسل‌های جوی (گردوغبار) در استان لرستان می‌پردازد. هدف اصلی مطالعه، درک تأثیر کم‌فشار سودانی به‌عنوان یک الگوی مهم جوّی بر افزایش ذرات معلق و تشدید خشکی در این منطقه است. ضرورت تحقیق ازاین‌روست که شناخت دینامیک جوّی و مکانیزم‌های انتقال و پراکنش آئروسل‌ها در ارتباط با سامانه‌های همدیدی، به درک جامع‌تری از تغییرپذیری اقلیمی منطقه می‌انجامد. پژوهشگر با استفاده از روش‌های تحلیل همدیدی و مدل‌سازی عددی، الگوهای غالب گردش جوی را شناسایی می‌کند و ارتباط آن‌ها را با رخدادهای خشکی می‌سنجد. شکاف تحقیقاتی اصلی در این زمینه، عدم بررسی دقیق ارتباط مستقیم کم‌فشار سودانی با افزایش آئروسل‌ها و تشدید خشکی در استان لرستان است. مطالعات پیشین بیشتر بر بارش‌ها در مناطق وسیع‌تر تمرکز داشته‌اند؛ اما این تحقیق به‌صورت خاص به مکانیسم‌های انتقال گردوغبار از مناطق خشک اطراف به لرستان می‌پردازد. با پر کردن این شکاف، پژوهش حاضر می‌تواند مبنای علمی معتبری برای پیش‌بینی‌های اقلیمی و ارائهٔ راهکارهای عملی برای مدیریت منابع آب و مقابله با خشکی در استان لرستان فراهم آورد.



شکل (۱) موقعیت استان لرستان (نگارنده)

Figure (1): Location of Lorestan Province (Author)

روش تحقیق

الف. موقعیت منطقه

استان لرستان (شکل ۱) با مساحتی حدود ۲۸,۲۹۴ کیلومتر مربع در غرب ایران واقع شده است. این استان ازنظر موقعیت جغرافیایی بین ′۳۷ °۳۳ تا ′۲۲ °۳۴ عرض شمالی و ′۴۶ °۵۱ تا ′۰۳ °۵۰ طول شرقی قرار دارد که از شمال به همدان و مرکزی، از جنوب به خوزستان، از شرق به اصفهان و از غرب به

کرمانشاه و ایلام محدود می‌شود (سالاروند و همکاران، ۲۰۱۹). ازنظر توپوگرافی، این استان با قرارگیری در زاگرس، توپوگرافی کوهستانی و اختلاف ارتفاع زیاد (از ۵۰۰ تا ۴۰۵۰ متر) دارد که اقلیم‌های متنوعی را پدید آورده است (سلطانی و همکاران، ۲۰۲۴). ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی استان در شهرهای خرم‌آباد، بروجرد، الیگودرز، کوهدشت، نورآباد و پل‌دختر واقع شده‌اند که داده‌های آن‌ها در مطالعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (محمدی ده‌چشمه، ۲۰۲۴). اقلیم لرستان تحت‌تأثیر توده‌های هوای مختلف، میانگین بارش ۴۵۰ میلی‌متری و پدیده‌های گردوغبار است (مرکز آمار ایران،[1] ۲۰۲۱).

در این پژوهش برای تحلیل ارتباط الگوهای همدیدی و رخدادهای خشکی (خشکی هواشناسی) استان لرستان با تأکید بر نقش کم‌فشار سودانی، از داده‌های هواشناسی در یک دورهٔ آماری ۳۰ساله (۱۹۹۱–۲۰۲۰) و نرم‌افزارهای اکسل، جی آی اس، گردس و گوگل ارث انجین استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های رطوبت نسبی در سه سطح تراز ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح دریا سه سطح تراز ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال و میزان امگا (ستونی عمودی از هوای سطح زمین به‌عنوان میزان دید افقی هر لایه) در هر سه سطح تراز از سامانه‌های منطقهٔ خاورمیانه اخذ شده است. برای شناسایی و تحلیل الگوهای همدیدی مؤثر بر رخدادهای خشکی و گردوغبار، از داده‌های شبکه‌بندی‌شده NCEP/NCAR با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵×۲/۵ درجه قوسی برای تراز دریا و ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شده است. این داده‌ها شامل فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد است. محدودهٔ جغرافیایی مورد مطالعه برای تحلیل‌های همدیدی، گستره‌ای از عرض جغرافیایی منطقه‌ی خاورمیانه، ایران و لرستان است. در مرحلهٔ اول، با استفاده از شاخص‌های دید افقی (میزان شفافیت هوا) کمتر از ۵۰۰۰ متر و میزان آئروسل جوی (AOD) بالاتر از ۰/۵، روزهای همراه با رخدادهای خشکی (خشکی هواشناسی) که با استفاده از شاخص‌های خشکسالی محاسبه می‌شوند و گردوغبار شناسایی شده‌اند (صحت کاشانی و همکاران، ۲۰۲۰).

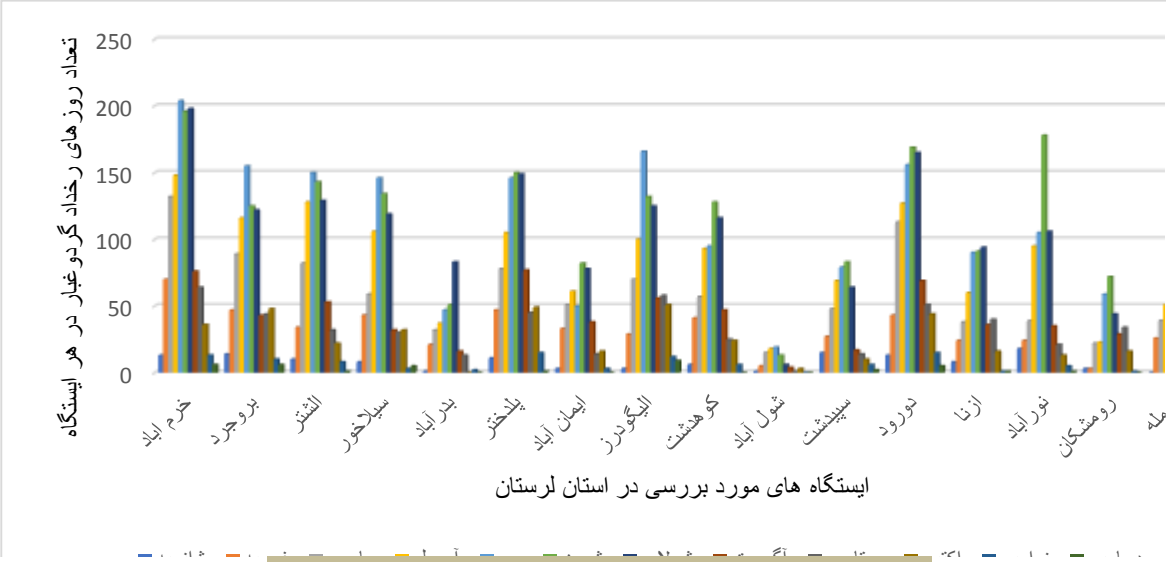
چون در تجزیه‌وتحلیل روند بلندمدت، وضعیت دید افقی به این دلیل استفاده می‌شود که نسبت به سایر اندازه‌گیری‌های مستقیم مقادیر محیط‌زیستی مانند ذرات معلق و ضخامت نوری ذرات آئروسل رکورد بسیار طولانی دارد (انصافی‌مقدم، ۲۰۲۰)، سال اوج حداکثری آلودگی در منطقهٔ مورد مطالعه انتخاب شده و برای هر الگوی همدیدی شناسایی‌شده، نقشه‌های ترکیبی فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، خطوط جریان و سرعت باد در ترازهای مختلف جو (۱۹۹۱–۲۰۲۰) ترسیم و تحلیل شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر نقش سامانهٔ کم‌فشار سودانی، مسیرهای حرکت این سامانه با استفاده از روش ردیابی چرخندی در روزهای نمونهٔ هر الگو بررسی شده است.

نتایج و بحث

تحلیل الگوهای همدیدی در استان لرستان نشان می‌دهد که سامانهٔ کم فشار سودانی نقش کلیدی در رخدادهای شدید گردوغبار، به‌ویژه در سال اوج این پدیده (۲۰۱۰)، ایفا کرده است. مطالعهٔ این سال به‌عنوان نمونه، به‌دلیل فعالیت فرین آئروسل‌ها، برای درک مکانیسم‌های اقلیمی منطقه ضروری است (نمودار ۱).

نقشه‌های سینوپتیکی این دوره نشان می‌دهد که سامانهٔ کم‌فشار سودانی با مرکزیت فشاری حدود ۱۰۰۸ هکتوپاسکال، ازطریق جنوب غرب وارد ایران شده و با حرکت شمال شرق‌سو (به‌سمت شمال شرق) استان لرستان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بررسی نقشه‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهندهٔ استقرار ناوهٔ عمیقی بر روی منطقه است که با تقویت حرکات صعودی و ناپایداری جوّی، نقش مهمی در توزیع فضایی آئروسل‌ها ایفا می‌کند. الگوهای دما و رطوبت نسبی در سطوح مختلف جو نیز حاکی از شکل‌گیری شرایط مساعد برای فعالیت‌های همرفتی و انتقال ذرات معلق است. این شرایط سینوپتیکی، همراه با توپوگرافی خاص منطقهٔ لرستان، می‌تواند به تشدید رخدادهای خشکی و افزایش غلظت آئروسل‌های جوی منجر شود. نمودار زیر تعداد روزهای گردوغباری در استان لرستان طی دورهٔ ۱۹۹۱–۲۰۲۰ نشان می‌دهند که تعداد روزهای گردوغباری در استان لرستان بین ۰ تا ۱۴۰ روز در سال متغیر بوده است.

1. Statistical Center of Iran

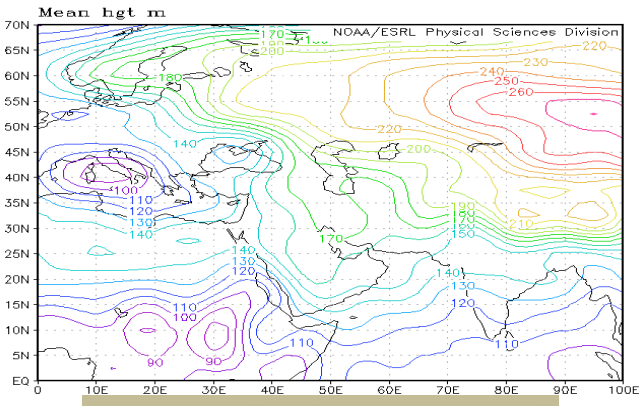


نمودار (۱): تعداد روزهای گردوغباری در استان لرستان طی دورهٔ ۱۹۹۱–۲۰۲۰

Chart (1): Number of dusty days in Lorestan Province during the period 1991-2020

تحلیل نقشه‌های سینوپتیکی ۲۰۱۰ نمونهٔ تحت‌تأثیر کم‌فشار سودانی

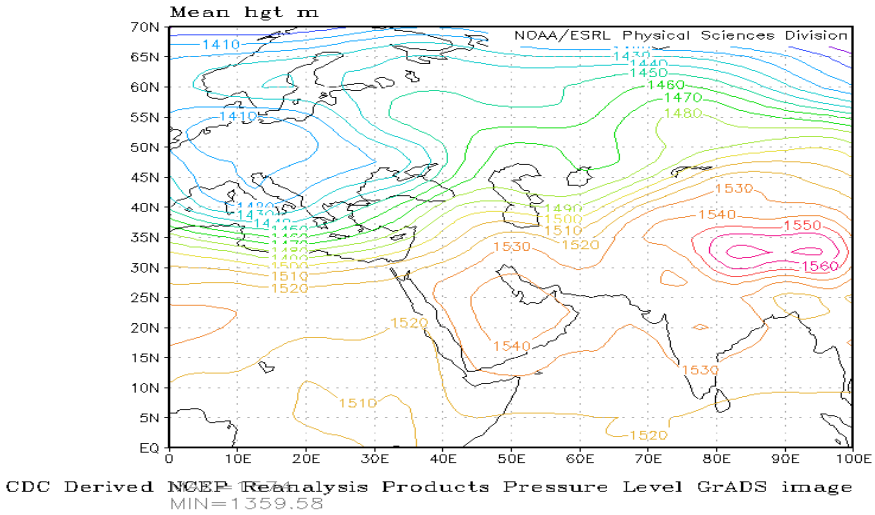
براساس نقشهٔ تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال شکل (۲) که وضعیت فشار در سطح زمین را نشان می‌دهد، یک سیستم کم‌فشار در شمال اروپا با خطوط هم‌ارتفاع ۱۴۰–۱۶۰ متر و یک سیستم پرفشار قوی در شمال شرق نقشه (سیبری) با خطوط هم‌ارتفاع ۲۶۰–۲۴۰ متر مشاهده می‌شود. در محدودهٔ ایران، خطوط هم‌ارتفاع بین ۲۰۰–۱۷۰ متر قرار گرفته‌اند که نشان‌دهندهٔ شرایط متوسط فشار در این منطقه است. با تمرکز بر سامانهٔ سودانی و تأثیر آن بر آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان، مشاهده می‌شود که منطقهٔ سودان و شمال آفریقا با خطوط هم‌ارتفاع ۹۰–۱۱۰ متر در وضعیت کم‌فشار ضعیفی قرار دارد. این سامانه که معمولاً منبع اصلی رطوبت برای غرب ایران و لرستان است، در این شرایط توان کافی برای انتقال رطوبت به منطقه را ندارد. ضعف سامانهٔ سودانی همراه با نفوذ زبانهٔ پرفشار سیبری، منجر به ایجاد شرایط خشک و پایدار در جو می‌شود که این وضعیت می‌تواند باعث افزایش گردوغبار محلی و تشدید آئروسل‌های جوی ناشی از خشکی در استان لرستان شود. استقرار این الگوی فشاری و غالب شدن جریانات شمالی–شمال غربی، موجب پایداری هوا و عدم تهویهٔ مناسب جوّی می‌شود. در چنین شرایطی، ذرات معلق و آلاینده‌ها در سطح زمین تجمع می‌یابند و با توجه به کمبود رطوبت و عدم بارش‌های مؤثر، شرایط برای افزایش غلظت آلاینده‌ها در هوا فراهم می‌شود. این وضعیت به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان لرستان می‌تواند منجر به شکل‌گیری کانون‌های گردوغبار محلی و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی شود که تأثیرات نامطلوبی بر سلامت ساکنان منطقه خواهد داشت.



شکل (۲): نقشهٔ تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (2): Map of the 1000 hectopascal level of the Middle East region

با تحلیل نقشهٔ تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال شکل (۳) که نشان‌دهندهٔ شرایط جوّی در ارتفاع حدود ۱/۵ کیلومتری سطح زمین است، می‌توان الگوی جریانات و تأثیر سامانه‌های مختلف بر استان لرستان را بررسی کرد. در این نقشه، یک مرکز کم‌ارتفاع در شمال اروپا با خطوط هم‌ارتفاع ۱۴۱۰–۱۴۴۰ متر و یک مرکز پرارتفاع قوی در شرق نقشه با خطوط هم‌ارتفاع ۱۵۵۰–۱۵۶۰ متر مشاهده می‌شود. منطقهٔ ایران تحت‌تأثیر خطوط هم‌ارتفاع ۱۵۲۰–۱۵۴۰ متر قرار دارد که نشان‌دهندهٔ استقرار یک الگوی نسبتاً پایدار است. در رابطه با تأثیر سامانهٔ سودانی بر آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان، نقشه نشان می‌دهد که منطقهٔ سودان و شمال آفریقا با خطوط هم‌ارتفاع حدود ۱۵۱۰–۱۵۲۰ متر در شرایط نسبتاً پایداری قرار دارد. این وضعیت نشان‌دهندهٔ عدم فعالیت مناسب سامانهٔ سودانی است که معمولاً نقش مهمی در انتقال رطوبت به منطقهٔ غرب ایران دارد. استقرار این الگو همراه با نفوذ پشته‌های ارتفاعی از سمت شرق، منجر به تشدید پایداری هوا و کاهش رطوبت در منطقهٔ لرستان می‌شود. گرادیان ارتفاعی موجود در نقشه و الگوی جریانات غالب، شرایط را برای تجمع آلاینده‌ها و ذرات معلق در سطح استان لرستان مساعد می‌کند. عدم فعالیت مؤثر سامانهٔ سودانی که می‌تواند با ایجاد ناپایداری و انتقال رطوبت به پاک‌سازی جو کمک کند، باعث می‌شود تا شرایط برای افزایش غلظت آلاینده‌ها فراهم شود. این وضعیت به‌خصوص در مناطق خشک استان می‌تواند منجر به تشدید گردوغبار محلی و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی شود. پایداری جوّی حاکم در لایهٔ ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز مانع از تهویهٔ مناسب هوا شده و به ماندگاری آلودگی‌ها در سطح منطقه کمک می‌کند. این شرایط می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر کیفیت هوا و سلامت ساکنان منطقه داشته باشد. با توجه به ماهیت دینامیکی پرفشار مستقر در منطقه، این سامانه از ظرفیت فرارفت گرمایی بالایی برخوردار است. این ویژگی سبب می‌شود گرما و گردوخاک برخاسته از عربستان، از مسیر جنوب غرب وارد سراسر ایران شود. در این شرایط، جوّی پایدار و خشک بر کشور حاکم می‌شود که مانع شکل‌گیری بارش‌های مؤثر می‌گردد. همچنین، استقرار این پشتهٔ ارتفاعی باعث جابه‌جایی کم‌فشار سودان به عرض‌های جنوبی‌تر شده است. این وضعیت هم‌زمان مانع از نفوذ زبانه‌های سامانهٔ مدیترانه‌ای به ایران می‌شود، به‌طوری‌که این زبانه‌ها به‌سمت عرض‌های شمالی‌تر منحرف می‌شوند.

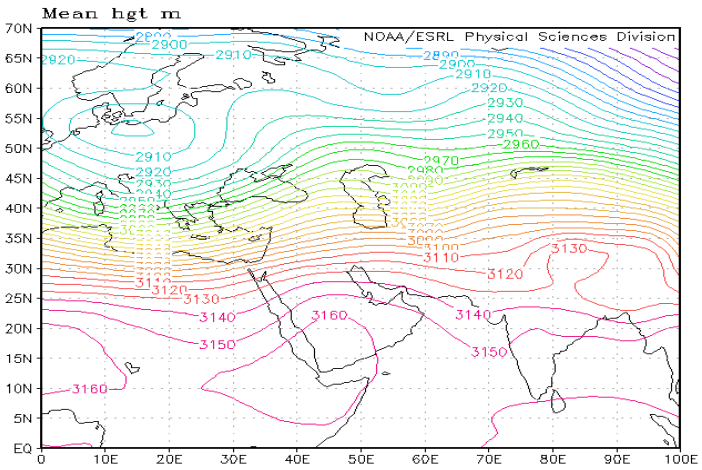


شکل (۳): نقشهٔ تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (3): Map of the 850 hectopascal level in the Middle East region

با بررسی نقشهٔ تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شکل (۴) که شرایط جوّی در ارتفاع حدود ۳ کیلومتری سطح زمین را نشان می‌دهد، یک الگوی مشخص از استقرار سامانه‌های فشاری قابل مشاهده است. در شمال نقشه، یک مرکز کم‌ارتفاع با خطوط هم‌ارتفاع ۲۸۹۰–۲۹۲۰ متر و در شرق و جنوب شرق یک مرکز پرارتفاع قوی با خطوط هم‌ارتفاع ۳۱۲۰–۳۱۵۰ متر مستقر شده است.

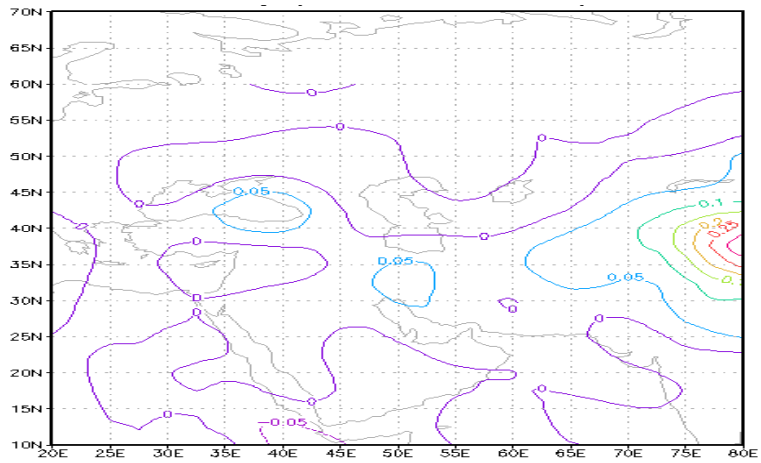
منطقهٔ ایران تحت‌تأثیر خطوط هم‌ارتفاع ۳۱۰۰–۳۲۰۰ متر قرار دارد که نشان‌دهندهٔ حاکمیت شرایط پایدار جوّی است. در ارتباط با تأثیر سامانهٔ سودانی بر آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان، مشاهده می‌شود که منطقهٔ سودان و شمال آفریقا با خطوط هم‌ارتفاع ۳۱۴۰–۳۱۶۰ متر در یک وضعیت گرم و پایدار قرار دارد. استقرار پشتهٔ ارتفاعی قوی بر روی منطقهٔ خاورمیانه و ایران، مانع از نفوذ و صعود هوای مرطوب سودانی به‌سمت عرض‌های شمالی‌تر و ایران شده است. این شرایط سبب می‌شود که جریانات هوای گرم و خشک همراه با گردوغبار از مناطق جنوبی به‌سمت استان لرستان هدایت شوند. الگوی حاکم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهندهٔ یک وضعیت بلاکینگ است که باعث پایداری شدید جوّی و محدود شدن حرکات صعودی می‌شود. این پایداری همراه با عدم فعالیت مؤثر سامانهٔ سودانی، شرایط را برای انباشت آلاینده‌ها و تشدید آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان فراهم می‌کند. نبود جریانات صعودی قوی و فقدان رطوبت کافی، باعث می‌شود که مکانیسم‌های پاک‌سازی جو تضعیف شده و آلودگی‌ها در سطوح پایین جو محبوس شوند. این وضعیت می‌تواند منجر به تداوم شرایط نامطلوب کیفیت هوا و افزایش غلظت آلاینده‌های جوّی در منطقه شود.



شکل (۴): نقشهٔ تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (4): Map of the 700 hectopascal level in the Middle East regio

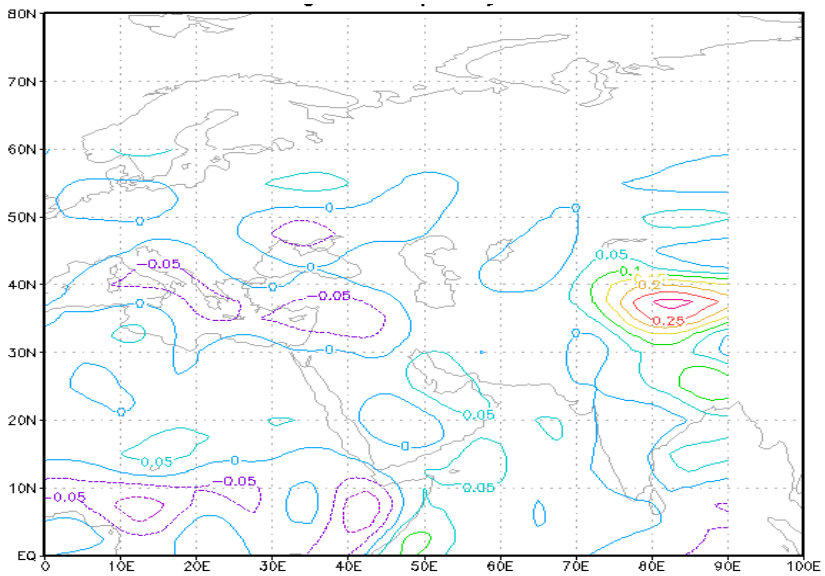
با تحلیل نقشهٔ امگای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال شکل (۵) که نشان‌دهندهٔ حرکات قائم هوا در سطح زمین است، می‌توان مشاهده کرد که بیشتر مناطق ایران و ازجمله استان لرستان، در محدودهٔ خطوط امگای صفر و مثبت قرار گرفته‌اند. این وضعیت نشان‌دهندهٔ حاکمیت حرکات نزولی و فرونشینی هوا در منطقه است که شرایط پایداری جوّی را به همراه دارد. در رابطه با تأثیر سامانهٔ سودانی بر آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان، نقشه نشان می‌دهد که منطقهٔ سودان و شمال آفریقا نیز در محدودهٔ امگای صفر تا ۰/۰۵– قرار دارد. این وضعیت بیانگر تضعیف حرکات صعودی در منطقهٔ سودان است که منجر به کاهش قدرت این سامانه در انتقال رطوبت به‌سمت ایران می‌شود. حاکمیت حرکات نزولی هوا (امگای مثبت) در منطقهٔ لرستان و نبود حرکات صعودی مؤثر، شرایط را برای تجمع آلاینده‌ها و ذرات معلق در سطوح پایین جو فراهم می‌کند. وجود مقادیر مثبت امگا در محدودهٔ ۰ تا ۰/۰۵ بر روی منطقهٔ غرب ایران، نشان‌دهندهٔ استقرار یک الگوی پایدار است که مانع از شکل‌گیری جریانات صعودی و درنتیجه تهویهٔ مناسب جو می‌شود. این شرایط همراه با عدم فعالیت مؤثر سامانهٔ سودانی، باعث می‌شود که آلودگی‌های ناشی از خشکی در سطح استان لرستان تشدید شود. فرونشینی هوا و نبود مکانیسم‌های صعودی مناسب برای پاک‌سازی جو، می‌تواند منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها، تشدید گردوغبار محلی و کاهش کیفیت هوا در منطقه شود که این وضعیت تأثیرات نامطلوبی بر سلامت ساکنان و شرایط زیست‌محیطی منطقه خواهد داشت.



شکل (۵): نقشهٔ امگای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (5): Omega map of the 1000 hectopascal level of the Middle East region

با تحلیل نقشهٔ امگای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال شکل (۶) که نشان‌دهندهٔ حرکات قائم هوا در ارتفاع حدود ۱/۵ کیلومتری است، می‌توان مشاهده کرد که منطقهٔ ایران و به‌ویژه استان لرستان در محدودهٔ خطوط امگای ۰ تا ۰/۰۵ قرار گرفته است. این مقادیر مثبت امگا بیانگر حاکمیت حرکات نزولی و فرونشینی هوا در این لایه از جو است که شرایط پایداری را تقویت می‌کند. درخصوص تأثیر سامانهٔ سودانی بر آلودگی‌های ناشی از خشکی در استان لرستان، نقشه نشان می‌دهد که منطقهٔ سودان و شمال آفریقا در محدودهٔ امگای منفی ۰/۰۵ قرار دارد که نشان‌دهندهٔ حرکات صعودی ضعیف است. این وضعیت همراه با حرکات نزولی حاکم بر منطقهٔ ایران، مانع از انتقال مؤثر رطوبت توسط سامانهٔ سودانی به‌سمت استان لرستان می‌شود. استقرار الگوی نزولی در لایهٔ ۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی منطقه، باعث می‌شود که هوای خشک از لایه‌های بالاتر به‌سمت سطح زمین فرونشست کرده و شرایط را برای تشدید خشکی و افزایش غلظت آلاینده‌ها فراهم کند. حاکمیت این الگوی پایدار در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال همراه با عدم فعالیت مناسب سامانهٔ سودانی، منجر به محبوس شدن آلاینده‌ها در لایهٔ زیرین جو می‌شود.



شکل (۶): نقشهٔ امگای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

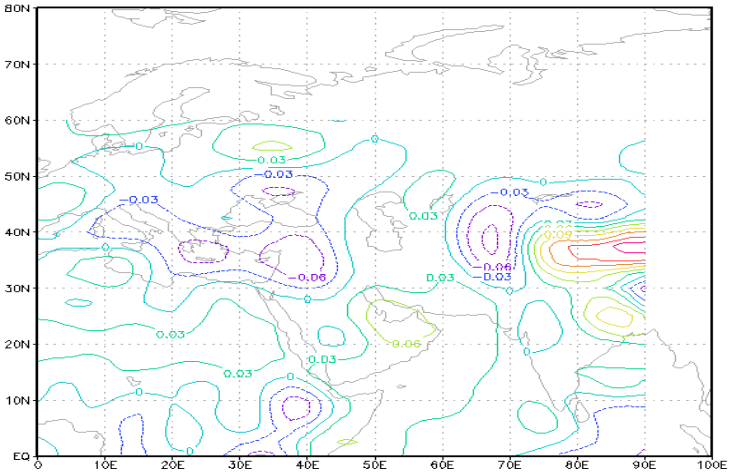
Figure (6): Omega map of the 850 hectopascal level in the Middle East region

با توجه به نقشهٔ امگای ۷۰۰ هکتوپاسکال شکل (۷) منطقه در ژانویه ۲۰۱۰، می‌توان تحلیل سینوپتیکی زیر را ارائه داد:

در این نقشه، مناطق با امگای منفی (خطوط آبی و بنفش) نشان‌دهندهٔ صعود هوا و مناطق با امگای مثبت (خطوط سبز و قرمز) نشان‌دهندهٔ نزول هوا هستند. بر روی استان لرستان و مناطق غربی ایران، امگای مثبت با مقدار حدود ۰/۰۳ مشاهده می‌شود که نشان‌دهندهٔ حاکمیت شرایط نزولی و پایداری جوّی است. سامانهٔ سودانی که معمولاً از سمت جنوب غربی وارد ایران می‌شود، به‌دلیل وجود الگوی نزولی هوا، نمی‌تواند به‌خوبی تقویت شود و رطوبت خود را به منطقه منتقل کند. این وضعیت باعث می‌شود:

۱. رطوبت کافی به منطقه نرسد و شرایط خشکی تشدید شود.
۲. پایداری هوا مانع از صعود و اختلاط قائم هوا شده و آلاینده‌ها در سطح زمین محبوس شوند.
۳. گردوغبار محلی ناشی از خشکی خاک به‌راحتی در منطقه پخش شود.

این شرایط به‌خصوص در استان لرستان که دارای مناطق مستعد فرسایش بادی است، می‌تواند منجر به افزایش آلودگی‌های ناشی از گردوغبار محلی شود. حضور سامانهٔ سودانی در چنین شرایطی، به‌جای اینکه باعث بارش و کاهش آلودگی شود، می‌تواند با ایجاد وزش باد، به افزایش گردوغبار محلی و تشدید آئروسل‌های جوّی کمک کند.



شکل (۷): نقشهٔ امگای ۷۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

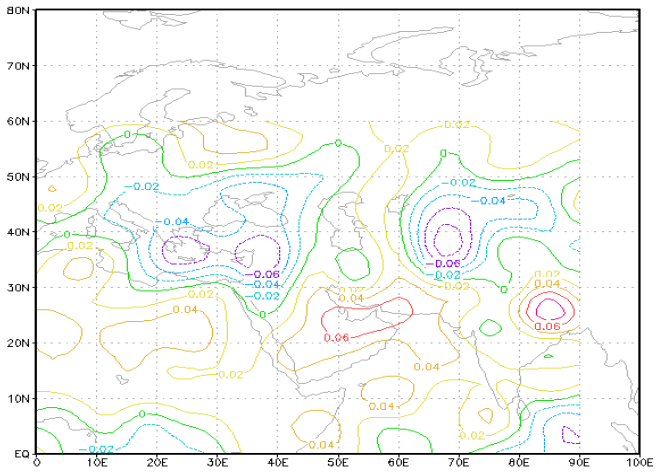
Figure (7): Omega 700 hectopascal map of the Middle East region

با بررسی نقشهٔ امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شکل (۸)، می‌توان تحلیل زیر را ارائه داد:

در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال که تراز میانی جو محسوب می‌شود، بر روی منطقهٔ غرب ایران و استان لرستان، مقادیر امگای منفی (خطوط آبی) با شدت حدود ۰/۰۴- مشاهده می‌شود. این الگو نشان‌دهندهٔ حرکات صعودی نسبتاً ضعیف در لایه‌های میانی جو است. هرچند این صعود می‌تواند به توسعهٔ ابر کمک کند، به‌دلیل ضعیف بودن آن، احتمالاً برای ایجاد بارش‌های قابل توجه کافی نیست. در مورد سامانهٔ سودانی، شرایط تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که:

۱. حرکات صعودی ضعیف در لایهٔ میانی جو می‌تواند باعث انتقال گردوغبار از سطح زمین به لایه‌های بالاتر شود.
۲. این صعود ضعیف برای توسعهٔ کامل سامانهٔ سودانی و ایجاد بارش‌های مؤثر کافی نیست.
۳. ترکیب این شرایط با پایداری در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، شرایط را برای تجمع آلودگی‌ها مساعد می‌کند.

این وضعیت در استان لرستان می‌تواند منجر به افزایش آلودگی‌های ناشی از خشکی شود، زیرا صعود ضعیف هوا می‌تواند ذرات گردوغبار را از سطح زمین بلند کند اما قادر به پاک‌سازی کامل جو ازطریق بارش نیست. همچنین، این شرایط می‌تواند باعث معلق ماندن آلاینده‌ها در لایه‌های پایین و میانی جو شود که برای سلامت ساکنان منطقه مخاطره‌آمیز است.



شکل (۸): نقشهٔ امگای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

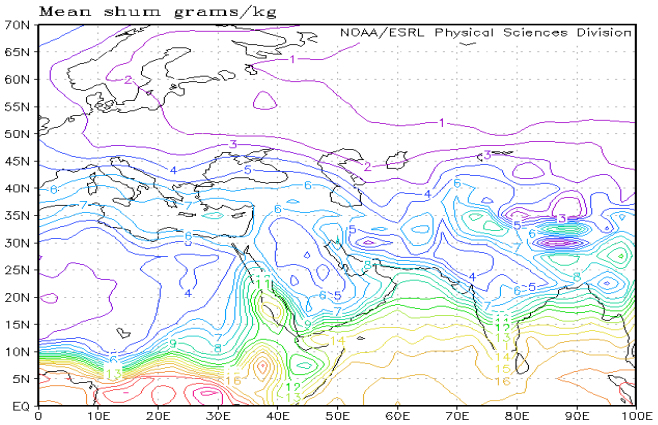
Figure (8): Omega map of the 500 hectopascal level of the Middle East region

با بررسی مجدد نقشه نم ویژه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (سطح زمین) شکل (۹) که مربوط به خروجی نرم‌افزار NOAA/ESRL است، تحلیل سینوپتیکی زیر را می‌توان ارائه داد:

در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال که نزدیک به سطح زمین است، الگوی نم ویژه نشان می‌دهد که بر روی منطقهٔ لرستان و غرب ایران، مقادیر نم ویژه بین ۵ تا ۶ گرم بر کیلوگرم است. این میزان رطوبت در سطح زمین نسبتاً کم است و نشان‌دهندهٔ شرایط خشک در لایهٔ مرزی جو می‌باشد.

در رابطه با تأثیر سامانهٔ سودانی بر آئروسل‌های جوّی منطقه، یک گرادیان شدید رطوبتی از عرض‌های پایین (با نم ویژه حدود ۱۵–۱۶ گرم بر کیلوگرم) به‌سمت عرض‌های میانی (با نم ویژه ۵–۶ گرم بر کیلوگرم) وجود دارد. این کاهش شدید رطوبت در مسیر حرکت سامانهٔ سودانی نشان می‌دهد که سامانه در رسیدن به منطقهٔ لرستان بخش عمدهٔ رطوبت خود را از دست می‌دهد. رطوبت کم سطحی در منطقهٔ لرستان می‌تواند به‌راحتی منجر به خشک شدن سطح خاک و افزایش پتانسیل فرسایش بادی، تسهیل برداشت ذرات از سطح و تولید آئروسل‌های معدنی، و کاهش چسبندگی ذرات خاک و افزایش قابلیت انتقال آن‌ها توسط باد گردد.

در این شرایط، ورود سامانهٔ سودانی به منطقه با رطوبت کم می‌تواند به‌جای ایجاد بارش و پاک‌سازی جو، به‌عنوان یک عامل انتقال‌دهندهٔ آئروسل‌ها عمل کند. با ایجاد تلاطم در لایهٔ مرزی، به برداشت و انتقال بیشتر ذرات از سطح کمک کند. به‌دلیل کمبود رطوبت، فرایندهای حذف آئروسل‌ها ازطریق شست‌وشوی جوّی را محدود کند. این وضعیت در استان لرستان که دارای مناطق مستعد گردوغبار است، می‌تواند منجر به افزایش غلظت آئروسل‌های معدنی در هوا و تشدید مشکلات زیست‌محیطی شود.

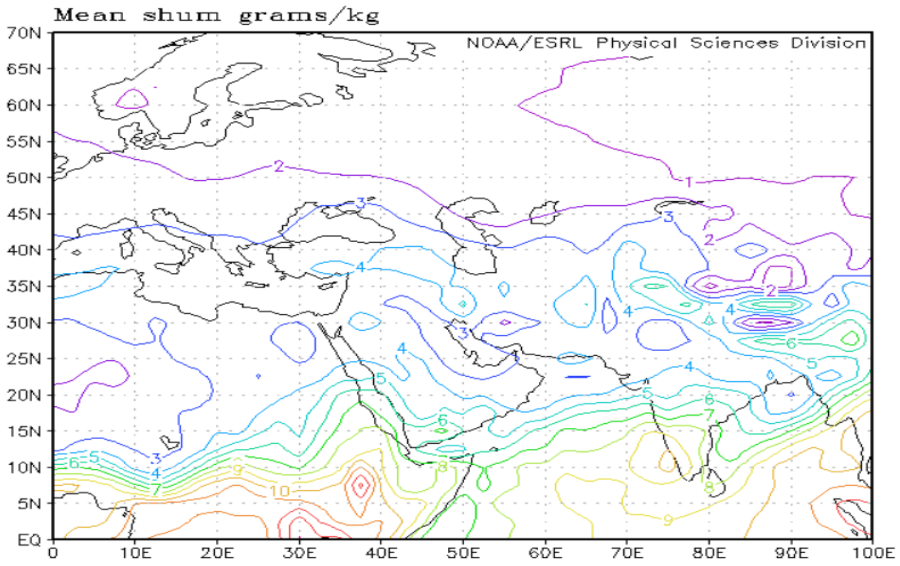


شکل (۹): نقشهٔ نم ویژه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (9): Specific humidity map at 1000 hectopascal level in the Middle East region

با بررسی نقشهٔ نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال شکل (۱۰) که لایهٔ انتقال رطوبت در جو محسوب می‌شود، مشاهده می‌شود که بر روی منطقهٔ لرستان و غرب ایران، مقادیر نم ویژه بین ۳ تا ۴ گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهندهٔ رطوبت بسیار کم در این لایه مهم جوّی است. این مقدار رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال که معمولاً مسیر اصلی انتقال رطوبت سامانه‌های جوّی است، بسیار ناچیز بوده و شرایط خشکی شدیدی را نشان می‌دهد.

با توجه به گرادیان رطوبتی قوی از عرض‌های جنوبی (با نم ویژه حدود ۱۰ گرم بر کیلوگرم) به‌سمت عرض‌های میانی و منطقهٔ لرستان (با نم ویژه ۴-۳ گرم بر کیلوگرم)، مشخص می‌شود که سامانهٔ سودانی در مسیر حرکت خود به‌سمت شمال، رطوبت خود را از دست می‌دهد. این افت شدید رطوبت باعث می‌شود که سامانه در رسیدن به منطقه مورد مطالعه به‌صورت یک جریان خشک عمل کرده و به‌جای ایجاد بارش و پاک‌سازی جو، به‌عنوان یک مکانیسم انتقال‌دهنده آئروسل‌ها عمل کند. رطوبت بسیار کم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال همراه با شرایط خشک سطحی می‌تواند شرایط را برای تولید و انتشار آئروسل‌های معدنی مساعد کند. در این شرایط، فرایندهای حذف آئروسل‌ها ازطریق بارش به حداقل رسیده و باعث افزایش ماندگاری ذرات معلق در جو می‌شود. این وضعیت در استان لرستان، به‌ویژه در مناطق مستعد فرسایش بادی، می‌تواند منجر به افزایش غلظت آئروسل‌های معدنی در هوا، گسترش پدیده گردوغبار محلی و درنتیجه تشدید آلودگی هوا و کاهش کیفیت هوا شود.

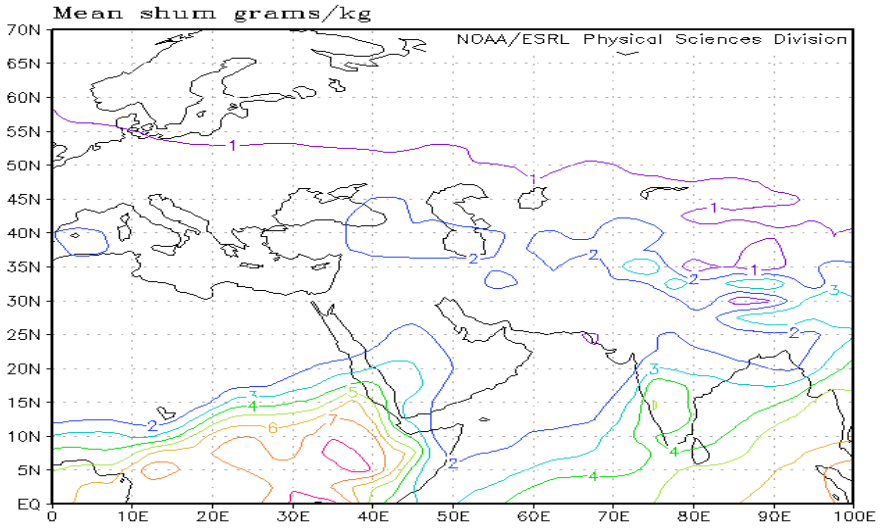


شکل (۱۰): نقشهٔ نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

Figure (10): Map of specific humidity at 850 hectopascal in the Middle East region

بررسی نقشهٔ نم ویژه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شکل (۱۱) نشان می‌دهد که بر روی منطقهٔ لرستان و غرب ایران، مقادیر نم ویژه بین ۲ تا ۳ گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهندهٔ رطوبت بسیار کم در لایه‌های میانی جو است. این مقدار رطوبت در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال که یکی از لایه‌های مهم در تشکیل ابر و بارش است، بسیار پایین بوده و نشان‌دهندهٔ عدم وجود شرایط مناسب برای تشکیل ابر و بارش در منطقه است. در بررسی سامانهٔ سودانی، مشاهده می‌شود که یک گرادیان رطوبتی قابل‌توجه از عرض‌های جنوبی (با نم ویژه حدود ۶ گرم بر کیلوگرم) به‌سمت عرض‌های میانی و منطقهٔ لرستان (با نم ویژه ۳-۲ گرم بر کیلوگرم) وجود دارد. این کاهش شدید رطوبت در مسیر حرکت سامانهٔ سودانی نشان می‌دهد که این سامانه در رسیدن به منطقهٔ لرستان، رطوبت خود را از دست داده و قادر به ایجاد بارش مؤثر و پاک‌سازی جو نخواهد بود. کمبود رطوبت در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال همراه با شرایط خشک در سایر لایه‌های جوی، شرایط را برای پایداری آئروسل‌های معدنی در جو فراهم می‌کند. در این شرایط، سامانهٔ سودانی به‌جای نقش بارش‌زایی و پاک‌سازی جو، بیشتر به‌عنوان یک

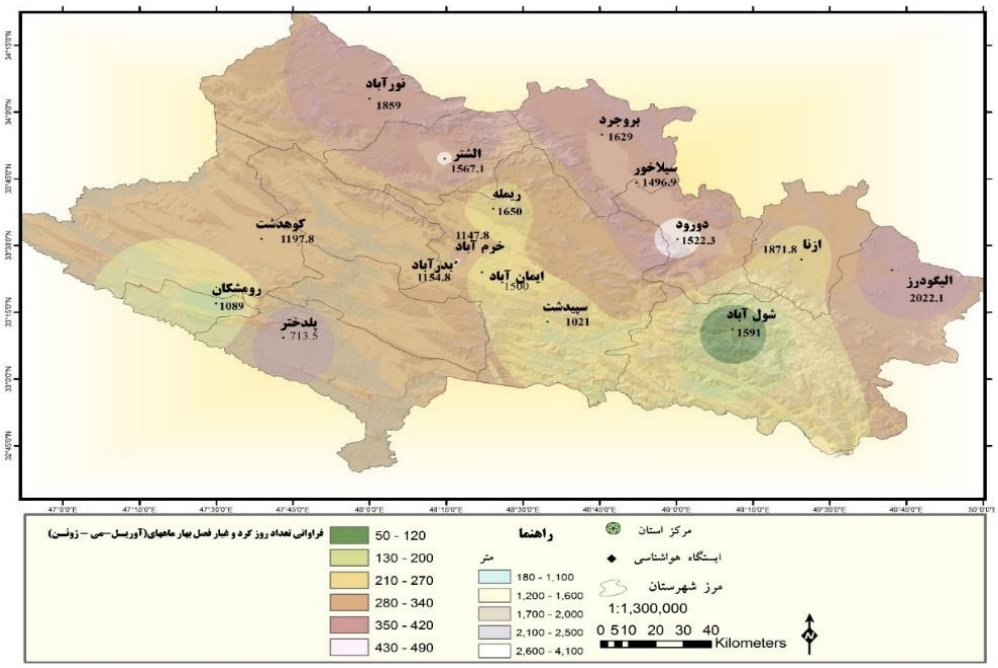
عامل انتقال‌دهندهٔ آئروسل‌ها عمل می‌کند و با ایجاد جریانات همرفتی ضعیف، می‌تواند به انتقال عمودی و افقی آئروسل‌ها کمک کند. این وضعیت در استان لرستان، به‌ویژه در مناطق مستعد فرسایش بادی، می‌تواند منجر به تشدید غلظت آئروسل‌های معدنی در لایه‌های مختلف جو و درنتیجه افزایش آلودگی هوا شود.



شکل (۱۱): نقشهٔ نم ویژه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال منطقهٔ خاورمیانه

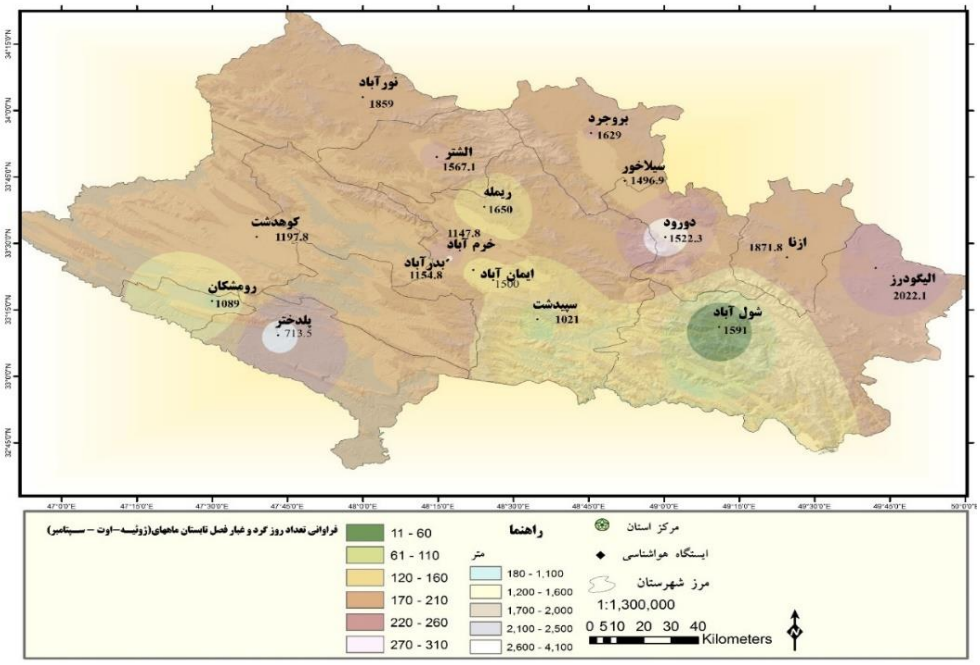
Figure (11): Map of specific humidity at 700 hectopascal level in the Middle East region

وضعیت پهنه‌بندی گردوغبار در فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان استان لرستان



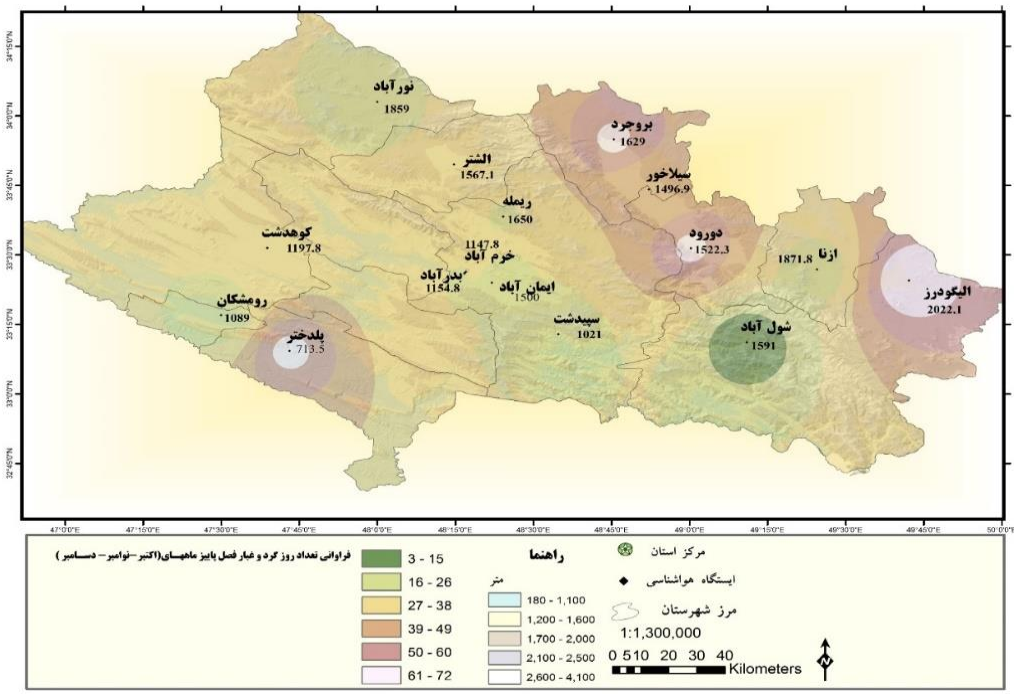
شکل (۱۲): پهنه‌بندی فراوانی گردوغبار در فصل بهار استان لرستان بازهٔ زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۰

Figure (12): Zoning of dust abundance in the spring season of Lorestan, time period 1991-2020



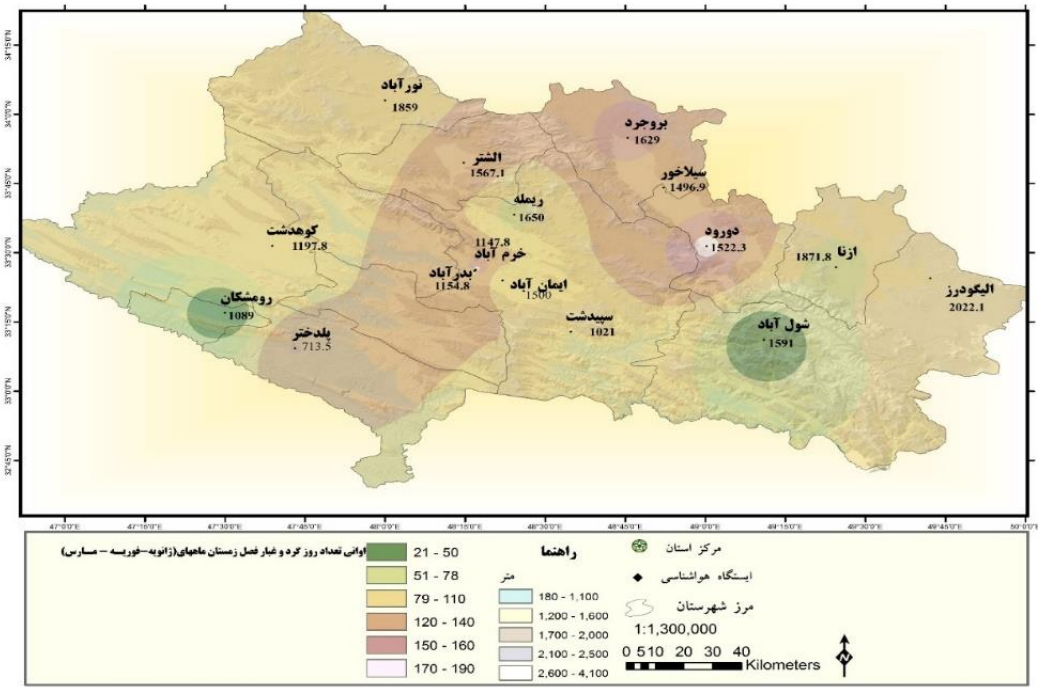
شکل (۱۳): پهنه‌بندی فراوانی گردوغبار در فصل تابستان استان لرستان بازۀ زمانی ۱۹۹۱–۲۰۲۰

Figure (13): Zoning of dust abundance in the summer season of Lorestan Province, time period 1991-2020



شکل (۱۴): پهنه‌بندی فراوانی گردوغبار در فصل پاییز استان لرستان بازۀ زمانی ۱۹۹۱–۲۰۲۰

Figure (14): Zoning of dust abundance in the autumn season of Lorestan Province, time period 1991-2020



شکل (۱۵): پهنه‌بندی فراوانی گردوغبار در فصل زمستان استان لرستان بازۀ زمانی ۱۹۹۱–۲۰۲۰

Figure (15): Zoning of dust abundance in winter in Lorestan Province, time period 1991-2020

فصل بهار

نقشۀ پهنه‌بندی گردوغبار در استان لرستان در فصل بهار، الگوی پیچیده‌ای از آلودگی را نشان می‌دهد که تحت‌تأثیر عوامل جغرافیایی مختلف قرار دارد. مناطق سبز روشن با غلظت ۵۰ تا ۱۲۰ میکروگرم بر متر مکعب کمترین آلودگی را دارند، درحالی‌که مناطق بنفش با غلظت ۴۳۰ تا ۴۹۰ میکروگرم بر متر مکعب بیشترین آلودگی را تجربه می‌کنند. این تفاوت در غلظت گردوغبار به‌شدت متأثر از ویژگی‌های جغرافیایی استان است. ارتفاع، نقش مهمی در توزیع گردوغبار ایفا می‌کند. مناطق کوهستانی با ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر در شمال و شمال شرقی استان، کمترین میزان آلودگی را دارند. این نواحی به‌دلیل شرایط اقلیمی و جوّی خاص کوهستانی، کمتر در معرض منابع گردوغبار قرار می‌گیرند. درمقابل، مناطق با عرض جغرافیایی پایین‌تر در جنوب استان، مانند دشت‌های سرخون و خرم‌آباد، دارای غلظت گردوغبار بالاتری هستند. این مناطق به‌دلیل دریافت تشعشعات بیشتر خورشید، دمای بالاتر و رطوبت کمتر، بیشتر در معرض ذرات گردوغبار قرار دارند. پوشش گیاهی نیز عامل مهمی در تعیین میزان آلودگی گردوغبار است. مناطق با پوشش گیاهی غنی‌تر و مرتع‌های طبیعی در شمال و شمال شرقی استان، آلودگی گردوغبار کمتری دارند. برعکس، مناطق با پوشش گیاهی محدود و اراضی کشاورزی در جنوب استان، به‌دلیل کمبود پوشش سبز و بادخیزی بیشتر، غلظت گردوغبار بالاتری را تجربه می‌کنند. به‌طور کلی، مناطق کوهستانی با ارتفاع بالا و پوشش گیاهی مناسب در شمال لرستان، کمترین آلودگی گردوغبار را در فصل بهار دارند. درمقابل، مناطق دشتی و کشاورزی در جنوب استان، بیشترین میزان آلودگی را شاهد هستند. این الگوی پراکندگی نشان می‌دهد که توپوگرافی، اقلیم و پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر میزان و توزیع گردوغبار در استان لرستان دارند.

وضعیت پهنه‌بندی گردوغبار در فصل تابستان، پاییز و زمستان استان لرستان در جی آی اس

فصل تابستان

نقشۀ پهنه‌بندی گردوغبار در فصل تابستان استان لرستان، الگوی پیچیده‌ای از توزیع آلودگی را نشان می‌دهد که تحت‌تأثیر عوامل جغرافیایی مختلف قرار دارد. مناطق سبز با تن‌های روشن، که عمدتاً در بخش‌های کوهستانی و شمال شرقی استان واقع شده‌اند، کمترین میزان غلظت گردوغبار (۱۱–۶۰ روز) را دارند. این نواحی به‌دلیل ارتفاع بالاتر و پوشش گیاهی متراکم‌تر، کمتر

در معرض آلودگی گردوغبار قرار دارند. درمقابل، مناطق جنوبی و غربی استان که دارای ارتفاعات کمتری هستند، شاهد افزایش قابل توجه در غلظت گردوغبارند. مناطق زرد و نارنجی با میزان آلودگی ۶۰-۲۱۰ روز، و مناطق بنفش با بیش از ۲۷۰ روز آلودگی، نشان‌دهندهٔ وضعیت بحرانی‌تر در این بخش‌ها هستند. این الگو به‌وضوح نشان می‌دهد که توپوگرافی و ویژگی‌های جغرافیایی نقش مهمی در توزیع و شدت گردوغبار ایفا می‌کنند. بخش‌های غربی و جنوب غربی استان که دارای ارتفاعات کمتری هستند، بیشترین آلودگی گردوغبار را با غلظت‌های ۱۲۰-۱۶۰ روز تجربه می‌کنند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و شرقی با ارتفاعات بیشتر، سطوح پایین‌تری از آلودگی (۶۰-۱۱۰ روز) را دارند. گوشهٔ شمال شرقی استان که به رشته‌کوه‌های زاگرس محدود می‌شود، کمترین سطوح آلودگی (۱۱-۶۰ روز) را نشان می‌دهد. نکتهٔ قابل توجه دیگر، تأثیر مراکز شهری بر آلودگی گردوغبار است. این مناطق ممکن است منابع انسان‌ساز اضافی آلودگی را تجربه کنند که بر شدت گردوغبار می‌افزاید. الگوی مکانی آلودگی گردوغبار به‌شدت با توپوگرافی و ویژگی‌های جغرافیایی استان مرتبط است. مناطق کم‌ارتفاع‌تر در غرب و جنوب غرب بیشتر در معرض تجمع گردوغبار هستند، درحالی‌که ارتفاعات بالاتر در شرق و شمال شرق تا حدودی از آلودگی گردوغبار محافظت می‌کنند. به‌طور کلی، این نقشه تصویری روشن از تغییرات منطقه‌ای در سطوح آلودگی گردوغبار در استان لرستان ارائه می‌دهد و ارتباط پیچیدهٔ میان توپوگرافی، جغرافیا و توزیع آلودگی گردوغبار را برجسته می‌کند. این اطلاعات می‌تواند برای برنامه‌ریزی مدیریت و کاهش آلودگی در استان بسیار مفید باشد.

فصل پاییز

سامانهٔ کم‌فشار سودانی عمدتاً در فصل بهار و پاییز بیشترین فعالیت را دارد و نقش مهمی در انتقال رطوبت و گردوغبار از مناطق جنوبی و بیابانی به‌سمت ایران ایفا می‌کند. در فصل بهار، این سامانه با حرکت به‌سمت شمال و شرق، می‌تواند رطوبت و گرمای بیشتری را از مناطق جنوبی و بیابانی منتقل کند. این سامانه معمولاً قوی‌تر و فعال‌تر است و با ایجاد جریان‌های صعودی، ذرات گردوغبار را از مناطق خشک عراق و عربستان به‌سمت لرستان منتقل می‌کند. در صورت ادغام با سامانه‌های مدیترانه‌ای، می‌تواند بارش‌های بهاری را ایجاد کند و در غیر این صورت به‌عنوان یک عامل انتقال گردوغبار عمل می‌نماید. اگرچه این سامانه در فصول دیگر سال به‌جز زمستان نیز می‌تواند در وقوع گردوغبار و انتقال آئروسل‌های جوّی به استان لرستان نقش داشته باشد، میزان و نحوهٔ تأثیر آن متفاوت است. وجود گردوغبار در زمستان، حتی در مناطقی با بارش نسبتاً بالا، ازنظر علمی قابل توجیه است. این پدیده ناشی از عوامل متعددی است که فراتر از میزان بارش هستند. منابع اصلی گردوغبار شامل فرسایش بادی، فعالیت‌های انسانی مانند ترافیک و صنعت، و مناطق خشک و کویری هستند که حتی در زمستان همچنان فعال‌اند. بارش زمستانی اغلب به‌صورت برف است که به خوبی گردوغبار را به زمین نمی‌نشاند و برف‌های سبک به‌راحتی بازتعلیق می‌شوند. رطوبت و آب‌وهوای سرد زمستان باعث می‌شود ذرات گردوغبار به‌آسانی از بین نروند و گلوله‌ای نشوند. علاوه‌بر این، جریان‌های هوایی قوی زمستانی می‌توانند گردوغبار را از مناطق خشک به مناطق با بارش بالاتر انتقال دهند. بنابراین، به‌رغم وجود بارش در زمستان، انباشت گردوغبار در هوا به دلایل مختلف فیزیکی امکان‌پذیر است. نقشهٔ پهنه‌بندی تعداد روزهای گردوغبار در فصل پاییز استان لرستان نشان می‌دهد که مناطق شرقی با ارتفاعات بالاتر، دارای ۶۱ تا ۷۲ روز گردوغبار هستند. این مناطق کوهستانی با توپوگرافی پرفرازونشیب و نبود پوشش گیاهی متراکم، شرایط مناسبی برای تجمع و انتقال گردوغبار فراهم می‌کنند. درمقابل، مناطق مرکزی و غربی استان با ارتفاعات کمتر و پوشش گیاهی متراکم‌تر، ۲۷ تا ۳۸ روز گردوغبار در فصل پاییز داشته‌اند. مناطق مرکزی استان با جمعیت و فعالیت‌های انسانی بیشتر نیز شرایط مساعدتری برای تجمع و انتقال گردوغبار دارند. به‌رغم افزایش بارندگی در پاییز، عوامل مختلفی مانند رطوبت ناکافی زمین، فعالیت‌های انسانی، شرایط جغرافیایی و پوشش گیاهی محدود همچنان موجب بروز پدیدهٔ گردوغبار در استان لرستان می‌شوند. این ترکیب از عوامل جغرافیایی، هواشناختی و انسانی باعث می‌شود که حتی با افزایش بارندگی، مشکل گردوغبار در منطقه همچنان پابرجا بماند.

فصل زمستان

وجود گردوغبار در زمستان، حتی در مناطقی با بارش نسبتاً بالا، ازنظر علمی قابل توجیه است. این پدیده ناشی از عوامل متعددی است که فراتر از میزان بارش هستند. منابع اصلی گردوغبار شامل فرسایش بادی، فعالیت‌های انسانی مانند ترافیک و صنعت، و مناطق خشک و کویری هستند که حتی در زمستان همچنان فعال‌اند. بارش زمستانی اغلب به‌صورت برف است که به‌خوبی گردوغبار را به زمین نمی‌نشاند و برف‌های سبک به‌راحتی بازتعلیق می‌شوند. رطوبت و آب‌وهوای سرد زمستان باعث می‌شود ذرات گردوغبار به‌آسانی از بین نروند و گلوله‌ای نشوند. علاوه‌بر این، جریان‌های هوایی قوی زمستانی می‌توانند گردوغبار را از مناطق خشک به مناطق با بارش بالاتر انتقال دهند. بنابراین، به‌رغم وجود بارش در زمستان، انباشت گردوغبار در هوا به دلایل مختلف فیزیکی امکان‌پذیر است.

با مقایسهٔ وضعیت پهنه‌بندی گردوغبار در استان لرستان در فصول مختلف، الگوی مشترکی مشاهده می‌شود: مناطق مرتفع شمال و شمال شرق در تمام سال کمترین آلودگی و مناطق کم‌ارتفاع جنوب و جنوب غرب بیشترین آلودگی را دارند. شدت و فراوانی گردوغبار در فصل تابستان به اوج خود می‌رسد (حتی بیش از ۲۷۰ روز در برخی مناطق)، درحالی‌که بهار و پاییز به‌دلیل فعالیت سامانه‌های جوّی مانند کم‌فشار سودانی، دوره‌های شدید اما کوتاه‌مدت‌تری دارند. حتی در زمستان نیز به‌دلیل نوع بارش (برف) و وزش بادهای قوی، این پدیده کاملاً محو نمی‌شود. به‌طور کلی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و منابع انسانی عوامل کلیدی تعیین‌کنندهٔ این الگوی مکانی در تمام سال هستند.

نتیجه‌گیری

سامانه های سودانی در شرایطی که با توده های اطراف دینامیکی نشوند، تأثیر معکوس بر جوّی دارند و به‌دلیل نبود صعود قوی و رطوبت کافی، کشش رطوبتی کاهش یافته است. این سامانه‌های کم‌عمق و جدا از مدیترانه‌ای، همراه با تسلط کم‌فشارهای عربستان و آزور، ورود رطوبت به ایران را محدود کرده اند. در استان لرستان، تقابل هوای سرد سیبری و سودانی گرم باعث خشکی غیرمنتظره شده است. سامانهٔ کم فشار سودانی در مسیر خود به دلیل گرادیان رطوبتی شدید، بخشی از رطوبت خود را از دست می‌دهد و حرکات قائم جوّی حاکی از صعود ضعیف و غلبهٔ نزول و پایداری در لایه های پایین است که مانع بارش می‌شود. رطوبت کاهش‌یافته مانع نقش بارش‌زایی سودانی شده و به‌جای آن باعث تقویت انتقال و پخش آئروسل ها می شود. این روند موجب ایجاد بازخورد مثبت خشکی و پایداری جوّی و افزایش تولید آئروسل‌های معدنی شده که با تأثیر منفی بر فرآیندهای ابر، احتمال بارش را بیشتر کاهش می‌دهد و خشکی منطقه را تشدید می‌کند. نتایج این مطالعه، تحلیل جامعی از مکانیسم های دینامیکی سامانهٔ کم‌فشار سودانی ارائه داده است که ساختار عمودی جو و تغییرات رطوبتی را در لایه‌های مختلف بررسی کرده است. همچنین چرخهٔ بازخوردی مثبت بین خشکی هوا، پایداری جوّی و تولید آئروسل‌های معدنی شناسایی شده و برای نخستین‌بار ارتباط کم عمق بودن سودانی و عدم ادغام با سامانه‌های مدیترانه‌ای با افزایش غلظت آئروسل‌ها در لرستان مستند شده است. سامانهٔ کم‌فشار سودانی بیشتر در بهار و پاییز فعال است و نقش مهمی در انتقال رطوبت و گردوغبار از مناطق جنوبی به‌ویژه بیابان‌ها به ایران دارد. در بهار، با حرکت به‌سمت شمال و شرق، رطوبت و ذرات گردوغبار را از عراق و عربستان به لرستان منتقل می‌کند. در صورت ادغام با سامانه‌های مدیترانه‌ای، بارش بهاری ایجاد می شود، در غیر این صورت بیشتر به انتقال گردوغبار می پردازد. این سامانه در فصول دیگر نیز ممکن است گردوغبار و آئروسل به لرستان منتقل کند، اما با شدت و نقش متفاوت. بررسی همدیدی نشان داد که سامانهٔ کم فشار سودانی با مرکز حدود ۱۰۰۸ hPa و ناوه ۵۰۰ hPa، با ایجاد گرادیان قوی و ناپایداری، عامل اصلی انتقال ریزگردها به لرستان در سال اوج ۲۰۱۰ بوده است. لرستان در ۳۰ سال گذشته بین ۰ تا ۱۴۰ روز گردوغبار داشته است. همچنین، مطالعه با داده های همدیدی توانست تأثیر قدرتمند کم فشارهای عربستان و آزور در جلوگیری از ورود رطوبت به ایران را دقیق‌تر از قبل نشان دهد. مقایسهٔ پهنه‌بندی گردوغبار در لرستان نشان می دهد مناطق مرتفع شمال و شمال شرق کمتر آلوده و مناطق کم ارتفاع جنوب و جنوب غرب بیشتر آلوده‌اند. شدت

گردوغبار در تابستان به اوج می‌رسد، در بهار و پاییز دوره‌های کوتاه‌مدت و شدیدتری با فعالیت سامانه‌هایی مانند سودانی رخ می‌دهد و در زمستان به‌خاطر بارش برف و بادهای شدید، پدیده کاملاً ناپدید نمی‌شود. توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت انسانی اصلی‌ترین عوامل تعیین‌کنندهٔ این الگو هستند. این پژوهش با تحلیل تغییرات امگا در ترازهای جوّی و ارتباط آن با توزیع آئروسل‌ها، درک بهتری از فرایندهای فیزیکی منطقه ارائه کرده که به پیش‌بینی اقلیمی و مدیریت مخاطرات کمک می‌کند. همخوانی گسترده با مطالعات پیشین، اعتبار علمی یافته‌ها را افزایش داده و نشان‌دهندهٔ وجود مکانیسم‌های کلی‌تر در تغییرات اقلیمی منطقه است. این پژوهش با رویکرد کیفی-کمی فراتر از مطالعات همدیدی، ساختار عمودی جو و مکانیسم‌های پنهان دینامیکی را بررسی کرده است. نوآوری اصلی آن شناسایی یک چرخهٔ بازخوردی مثبت است که در آن، سامانهٔ کم‌فشار سودانی کم‌عمق و جدا از مدیترانه‌ای، به‌جای بارش‌زایی، خشکی را تشدید می‌کند. این چرخه با کاهش رطوبت و تضعیف صعود جو آغاز شده و باعث پایداری بیشتر، تولید آئروسل‌های معدنی و کاهش بارش می‌شود. این مطالعه با کمّی‌سازی تعاملات سامانه‌های جوی، نشان داده که تسلط هم‌زمان کم‌فشار عربستان و پرفشار آزور ورود رطوبت به ایران را مسدود می‌کند و برای نخستین‌بار ارتباط کم‌عمق بودن سامانهٔ سودانی با افزایش آئروسل‌ها در لرستان را اثبات کرده است. همچنین، الگوی مکانی ثابت آلودگی گردوغبار را در لرستان با تمرکز بر مناطق جنوبی و کم‌ارتفاع با ارائهٔ تحلیل‌های فضایی-زمانی پیشرفته، برای برنامه‌ریزان محیط زیست نمایان ساخته است. درنهایت، اگرچه یافته‌های تحقیق با مطالعات پیشین همخوانی دارد و اعتبار آن را تقویت می‌کند، با معرفی مدل جدید چرخهٔ بازخوردی، درک جامع‌تری از فرایندهای فیزیکی منطقه فراهم کرده و چارچوب نوینی برای پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات اقلیمی ارائه می‌دهد.

مقایسه با مطالعات پیشین

مقایسهٔ مطالعهٔ ما با مقالهٔ «واکاوی همدیدی سامانهٔ کم‌فشار سودانی در رخداد ترسالی‌ها و خشکسالی‌های نیمهٔ جنوبی ایران (پرک، ۲۰۱۵) و مقالهٔ نقش کم‌فشار سودانی در تبدیل الگوهای بارشی و گردوغبار جنوب غرب ایران (لشکری و همکاران، ۲۰۲۰)، نشان می‌دهد که هر سه مطالعه به اهمیت نقش سامانهٔ کم‌فشار سودانی در دینامیک جوّی و شرایط اقلیمی منطقهٔ ایران اشاره دارند. همهٔ مقالات نقش سامانهٔ کم‌فشار سودانی را به‌عنوان یک عامل کلیدی اقلیمی تأیید می‌کنند که رطوبت و آئروسل‌ها را منتقل نموده و در شکل‌گیری خشکی و گردوغبار تأثیرگذار است. این همگرایی علمی نشان می‌دهد که یافته‌های ما در چارچوب گسترده‌تر پژوهش‌های علمی منطقه‌ای قرار دارد و با یافته‌های پرک (۲۰۱۵) و لشکری و همکاران (۲۰۲۰) به‌طور دقیق همسویی دارد و تصویر جامع و علمی از رفتار سامانهٔ کم‌فشار سودانی و تأثیر آن بر اقلیم ایران ارائه می‌دهد.

پیشنهادات کاربردی و مدیریتی

۱. ایجاد سامانهٔ هشدار زودهنگام گردوغبار: با توجه به نقش سامانهٔ کم‌فشار سودانی در تولید آئروسل‌ها، سیستم‌های پایش و هشدار زودهنگام مبتنی‌بر داده‌های آب‌وهوایی سینوپتیکی و ماهواره‌ای توصیه می‌شود.

۲. برنامه مدیریت منابع آب و خاک: با درک روند خشکسالی مرتبط با الگوهای سینوپتیکی، باید راهکارهای مدیریت منابع آب مانند بهینه‌سازی مصرف آب، احیای پوشش گیاهی و کاهش فرسایش خاک در لرستان توسعه یابد.

۳. آموزش و اطلاع‌رسانی عمومی: اطلاع‌رسانی دربارهٔ تأثیرات طوفان‌های گردوغبار و خشکی ناشی از سامانهٔ سودانی و آموزش راه‌های حفاظت فردی و زیست‌محیطی می‌تواند آسیب‌های سلامت و زیستی را کاهش دهد.

۴. همکاری منطقه‌ای با کشورهای هم‌جوار: با توجه به انتقال گردوغبار از کشورهای همسایه، لازم است همکاری‌های فراملی برای کاهش منبع گردوغبار و تبادل داده‌های سینوپتیکی و اقلیمی تقویت شود.

منابع

1. Alpert, P., Neeman, B. U., & Shay-El, Y. (1990). Intermonthly Variability of Cyclone Tracks in the Mediterranean. *Journal of Climate*, *3*(12), 1474-1478. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<1474:IVOCTI>2.0.CO;2
2. Bitan, A., & Sa'aroni, H. (1992). The horizontal and vertical extension of the Persian Gulf pressure trough. *International Journal of Climatology*, 12, 733-747. https://doi.org/10.1002/joc.3370120706
3. Dayan, U., & Abramski, R. (1983). Heavy Rain in the Middle East Related to Unusual Jet Stream Properties. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *64*(10), 1138-1140. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1983)064<1138:HRITME>2.0.CO;2
4. Delbasteh, S., Mirmosavi, S. H., Raispour, K., & Khosravi, Y. (2024). Studying the relationship between aerosols and precipitation in the southeast region of Iran. *Climate Change Research*, *5*(19), 97-116. doi: 10.30488/ccr.2024.460836.1222
5. Ensafi Moghaddam, T. (2020). Investigation of the Aerosol Optical Depth (AOD) index in dust events in southwestern Iran. Forests and Rangelands Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, 5(6), Serial 25.
6. Fatemi, M., Omidvar, K., Mesgari, E., & Narengifard, M. (2017). Spatial analysis and investigation of the relationships between remote linkage patterns and droughts in central Iran. *Khoshkboom*, *7*(1), 51-65.
7. Jafari, E., Rezazadeh, M., Bazrafshan, O., & Jamshidi, S. (2022). Spatiotemporal variability of sand-dust storms and their influencing factors in the MENA region. *Theoretical and Applied Climatology*, *149*(3), 1357-1371.
8. Kahana, R., Ziv, B., Enzel, Y., & Dayan, U. (2002). Synoptic climatology of major floods in the Negev Desert, Israel. *International Journal of Climatology*, *22*(7), 867-882.
9. Lashkari, H., Ghaemi, H., & Park, F. (2013). Analysis of the rainfall regime in the southern and southwestern regions of the country. *Sepehr*, *22*(85), 57-63. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25883860.1392.22.851.9.8
10. Lashkari, H., Mohammadi, Z., Hamidianpour, M., Nazaripour, H., Poudineh, M.R. (2020). The role of the Sudanese low pressure in the transformation of precipitation and dust patterns in southwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. Kharazmi University.
11. Mirzaei, M., Amininia, K., & Panahi, A. (2025). Analysis of the effect of synoptic mechanisms of atmospheric circulation and a distance-linked index on specific humidity anomalies and autumn droughts in northwest Iran. *Agricultural Meteorology*, *13*(1), 34-53.
12. Mohammadi Deh Cheshme, M. (2024). Environmental empowerment strategies in human settlements (a study of Delfan County, Lorestan Province). *Spatial Planning*, *14*(1), 1-20.
13. Mohammadi, F., & Lashkari, H. (2019). Investigation of Rainfall Variation of Sudan Low during the Historical Process in Southwestern Iran. *Physical Geography Research*, *51*(2), 373-387. doi: 10.22059/jphgr.2019.272706.1007323
14. Mohammadi, H., Fattahi, E., Shamsi Pour, A. A., & Akbari, M. (2012). Dynamic analysis of Sudan low-pressure systems and torrents in southwest of Iran. *Journal of Geographical Sciences*, *12*(24), 7-24. https://sid.ir/paper/102341/en
15. Mokhtari, A., & Khosravi, M. (2014). Investigation of the relationship between the Sudanese low-pressure system and the rainfall on May 1, 2004, in Kermanshah province. *Natural Environmental Hazards*, *3*(4).
16. Movaqhari, A., & Khosravi, M. (2014). Investigating the relationship between the Sudanese low pressure system and the precipitation of May 10, 2004 in Kermanshah Province. *Natural Environment Hazards*, *3*(4), 61-80.
17. Nasiri, D., Borna, R., Zohourian Pordel, M. (2024). Detection of the effect of cloud microphysical structure on precipitation in Khuzestan province using MODIS cloud products. *Jgs*., *24*(72), : 25 doi:10.52547/jgs.24.72.471
18. Omidvar, K., Salamati Hormozi, V., Hamzehnejad, M., & Hosseinpour, M. (2019). Synoptic-remote sensing analysis of dust storms in Hormozgan province. *Environmental Sciences and Technology*, *21*(12). https://doi.org/10.22034/jest.2020.25595.3450
19. Parak, F., Roshni, A., & Alijani, B. (2015). Synoptic analysis of the Sudanese low-pressure system in the occurrence of wet and dry seasons in the southern half of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, *4*(15), *75*-90. SID. https://sid.ir/paper/356293/fa
20. Sabori, A., Hamidianpour, M., Nazaripour, H., & Poodineh, M. (2024). Investigating extreme rainfall changes in southeast Iran and its relationship with Sudan low pressure. *Environmental Management Hazards*, *11*(2), 159-174.
21. Salamat Hormozi, V., Hamzenejad, M., Omidvar, K., & Hosseinpour, M. (2019). Co-visual-remote sensing analysis of the dust storm event in Hormozgan province (December 2016). *Environmental Science and Technology*, *21*(12 (91)), 219-238. SID. https://sid.ir/paper/364415/fa
22. Salarvand, J., Ghasemi Aghbash, F., & Asodolahi, Z. (2019). Mapping rainfall erosivity in Lorestan province using Kriging geostatistic technique. *Journal of Climate Research*, *1397*(36), 57-72.

23. Sayad, V., Zadeh, Z. B. H., Alijani, B., & Saligheh, M. (2021). Dynamic effects of Sudanese system on moisture feeding in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *146*(1), 821-831.
24. Sehat, S., Rahnama, M., Karami, S., Ranjbar, A., & Tajbakhsh, S. (2020). Investigating meteorological factors affecting resilience to dust in the Middle East. *Climatological Research*, *2020*(40), 49-59.
25. Soltani, F., Rahimi Moghadam, S., Akbari, N., Azizi, KH., & Aini Nargeseh, H. (2024). Simulation of replacing wheat with rapeseed in terms of water and economic efficiency in Lorestan province. *Iranian Crop Sciences*, *55*(1), 37-48.
26. *Statistical Center of Iran*. (2021).

Analysis of the Relationship between Synoptic Patterns Entering Iran and Dust Events in Lorestan Province with Emphasis on the Role of the Sudanese Low-Pressure System

Azadeh Poladvand,[1] Gholamali Mozaffari,[2*] Hamidreza Ghaffarian,[3] Kamal Omidvar,[4] Ahmad Mazedi[5]

Received: 10/05/2025 Accepted: 04/10/2025

Extended Abstract

Introduction: The Sudanese low-pressure system is a critical synoptic-scale driver of weather and climate in the Middle East, including Iran. Originating over tropical Africa, this system propagates eastward and northeastward, frequently inducing dry, unstable atmospheric conditions. Its characteristic dryness, coupled with strong surface winds, facilitates the entrainment and uplift of fine particulate matter, leading to the formation of extensive dust storms. Particularly during warm seasons, these conditions significantly increase atmospheric aerosol concentrations, which adversely affect human health and regional climate by modifying atmospheric radiation and optical properties. Recent studies indicate a rising trend in the frequency and intensity of such dust events, a phenomenon often attributed to intensified droughts and broader climate change.

This research investigates the causal relationships between predominant synoptic patterns and the spatiotemporal distribution of atmospheric aerosols in Lorestan Province, with a specific focus on the role of the Sudanese low-pressure system. By analyzing the associated atmospheric dynamics and thermodynamic mechanisms that govern aerosol transport and dispersion, this study seeks to provide a comprehensive understanding of regional climatic variability. Key investigative aspects include the analysis of pressure patterns, convective processes, and temperature and humidity gradients, alongside their collective influence on drought severity and dust storm occurrence.

A significant research gap exists in the detailed examination of the link between synoptic patterns—especially the Sudanese low-pressure system—and the increase in atmospheric aerosols and drought intensification within Lorestan Province. While previous research has explored the impact of this system on precipitation patterns across broader regions like western Iran, its direct connection to aerosol loading and drought in a topographically and climatically distinct area such as Lorestan remains inadequately studied. The province's unique geographical setting renders it particularly vulnerable to these phenomena. Furthermore, the specific pathways and mechanisms by which dust and aerosols are transported from source regions—such as the arid expanses of Iraq and Saudi Arabia—into Lorestan require further elucidation through targeted regional analysis.

Addressing these gaps, this research concentrates on Lorestan Province to analyze the mechanisms of aerosol transport orchestrated by the Sudanese low-pressure system. By delineating the relationship between synoptic-scale circulations and drought conditions, the study aims to propose practical strategies for water resource management and drought mitigation. The findings are expected to enhance the foundational understanding of the climatic impacts associated with the Sudanese low-pressure system and contribute to the development of effective strategies for reducing the adverse effects of drought in Lorestan.

Methodology: This study employs a comprehensive methodology to analyze the relationship between synoptic patterns and drought events in Lorestan Province, with a focus on the Sudanese low-pressure system. Meteorological data from a 30-year period (1991–2020) were used, including relative humidity, sea-level pressure, and omega values at three atmospheric levels (1000, 850, and 700 hPa). These data were obtained from Middle Eastern regional systems and NCEP/NCAR reanalysis datasets with a spatial resolution of 2.5 × 2.5 degrees.

To identify drought and dust events, horizontal visibility (less than 5000 meters) and atmospheric aerosol levels (above 0.5) were used as indicators. Horizontal visibility was prioritized due to its long-term record compared to other measurements like particulate matter and aerosol optical thickness. The year with the highest

1. PhD student in Climatology, Faculty of Humanities and Social Sciences. Yazd University, Yazd. Iran
2. Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.Email: gmozafari@yazd.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
4. Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
5. Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

DOI: 10.22052/deej.2025.256364.1096

pollution levels in the study area was selected, and composite maps of sea-level pressure, geopotential height, streamlines, and wind speed at various atmospheric levels were plotted and analyzed.

The study also utilized vorticity tracking methods to examine the movement paths of the Sudanese low-pressure system for sample days of each synoptic pattern. GIS was employed to analyze land-based phrenic events (e.g., microdust) during different seasons in Lorestan Province. The geographical scope of the study covers the Middle East, Iran, and Lorestan, providing a regional perspective on synoptic patterns and their impacts.

Results and Discussion: This study adopts a comprehensive analytical approach to investigate the relationship between synoptic-scale atmospheric patterns and dust events in Lorestan Province, with a specific focus on the Sudanese low-pressure system. The analysis utilized meteorological data spanning a 30-year period (1991–2020), obtained from the NCEP/NCAR reanalysis dataset and Middle Eastern regional systems. Key variables included sea-level pressure, relative humidity, and vertical velocity (omega), analyzed at three atmospheric levels (1000, 850, and 700 hPa). The data has a spatial resolution of 2.5° × 2.5°.

Dust events were identified using two primary indicators: horizontal visibility reduction to less than 5,000 meters and elevated atmospheric aerosol indices. A visibility threshold of <5,000 meters was prioritized due to the consistent long-term availability of this data, which offers a reliable record for climatological analysis compared to other metrics like particulate matter (PM) concentration or aerosol optical depth (AOD). The year with the highest frequency of low-visibility events within the study period was selected for detailed synoptic analysis.

For this peak pollution year, composite maps of sea-level pressure, geopotential height, wind streamlines, and wind speed at various atmospheric levels were generated and analyzed to identify the prevailing synoptic patterns. To further trace the genesis and movement of dust-transporting systems, vorticity advection and tracking methods were applied to sample days' representative of each pattern. Additionally, Geographic Information Systems (GIS) were employed to analyze the spatiotemporal distribution of land-surface phenomena, such as fine dust (microdust), across different seasons in Lorestan Province. The geographical scope of the study encompasses the Middle East, Iran, and Lorestan, providing a multi-scale regional perspective on synoptic patterns and their impacts.

Conclusion: This study demonstrates that the influence of the Sudanese low-pressure system on Lorestan Province's climate is critically dependent on its intensity and structure. When the system is weak and shallow, it fails to advect sufficient moisture into the region, resulting in dry conditions that favor the entrainment and transport of atmospheric aerosols. Furthermore, the frequent dominance of high-pressure systems, particularly the Siberian and Azores highs, acts as a synoptic-scale barrier. This blocking mechanism prevents the vital convergence of the Sudanese low with moisture-bearing systems from the Mediterranean, exacerbating aridity. These dry, stable atmospheric conditions, characterized by subsidence (positive omega values) and weak vertical motions, lead to the accumulation and persistence of pollutants and dust within the planetary boundary layer, significantly degrading air quality.

An analysis of dusty days from 1991 to 2020 reveals the tangible impact of these patterns, with the annual number of dust events in Lorestan Province varying widely from 0 to 140 days. This high variability underscores the region's susceptibility to synoptic-driven environmental hazards.

By detailing the vertical structure of the atmosphere, humidity fluxes, and the positive feedback loop between dry air and aerosol production, this research advances the understanding of regional climate dynamics. The findings highlight the critical role of synoptic patterns, particularly the interaction between the Sudanese low and blocking highs, in shaping Lorestan's climatic conditions and air quality. Consequently, this study provides a robust foundation for improving dust and drought prediction models. The insights gained are vital for developing informed public health strategies, agricultural planning, and environmental risk management policies aimed at mitigating the adverse effects of dust storms and aridity in Lorestan Province. Future work should focus on quantifying the contribution of local versus transboundary dust sources under these identified synoptic regimes.

Keywords: Sudanese system, dust event, Lorestan.