

شبیه‌سازی توزیع قائم سامانه‌های گردوغبارزا در ارتباط با سامانه‌های همدید و

توپوگرافی در غرب ایران

بهروز ساری صراف - استاد گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز

علی اکبر رسولی - استاد گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز

آذر زرین* - استادیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدسعید نجفی - دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۷/۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۹/۹

چکیده

در این مطالعه، بر اساس خروجی‌های مدل WRF-CHEM، الگوهای توزیع قائم سامانه‌های گردوغبارزا در غرب ایران به دو دسته تقسیم شد: الگوهایی با توزیع قائم در حدود ۶/۵ کیلومتر و کمتر از ۳/۵ کیلومتر. الگوهای همدید رخداد گردوغبار در دوره سرد به دو دسته تقسیم می‌شود: جبهه‌ای و غیرجبهه‌ای. در الگوی اول جبهه‌ای، بیشینه ارتفاع گردوغبار حدود ۶/۵ کیلومتر است و وابسته به شدت واگرایی در تراز میانی و سرعت قائم بالاسو و استقرار هسته جت بر فراز مناطق منشأ گردوغبار است. در الگوی دوم جبهه‌ای، بیشینه ارتفاع توده گردوغبار کمتر از ۴ کیلومتر است. در این الگو، ارتفاع محدودتر توده گردوغبار وابسته به شدت محدودتر چرخندگی در تراز میانی و موقعیت جت است که عمدتاً بر فراز مناطق منشأ گردوغبار قرار ندارد. در الگوی غیر جبهه‌ای، پهنه‌های وسیعی از خاورمیانه تحت تأثیر استقرار یک پشته قرار می‌گیرد و الگوی گردشی در تراز زیرین تروپوسفر در شکل‌گیری گردوغبار مؤثر است. ارتفاع گردوغبار در این الگو حدود ۳/۵ کیلومتر است. همچنین، مهم‌ترین عامل در محدودشدن ارتفاع توده گردوغبار در غرب ایران ماهیت سامانه‌های جوی است. مانع کوهستانی زاگرس در انتشار قائم و افقی گردوغبار اهمیت کمتری دارد.

کلیدواژه‌ها: الگوهای همدید، توزیع قائم گردوغبار، جبهه‌زایی، کوهستان زاگرس.

مقدمه

توفان‌های گردوغبار یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شناخته می‌شوند (میری و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۴۴)؛ این توفان‌های گردوغبار می‌توانند به طور مستقیم باعث واداشت‌های اقلیمی- شامل تغییر در انرژی تابشی و دما - و به طور غیرمستقیم باعث تغییراتی در ماهیت ابر و بارش (لی، ۲۰۱۱: ۸۸۸) و به طور کلی سبب تغییراتی در وضعیت جوی و اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی شوند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۹: ۴۰۱۱؛ شائو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۹۸). از موضوعاتی که در مطالعات توفان‌های گردوغبار و آلودگی جو مطرح می‌شود موضوع ساختار

قائم ذرات معلق در جو است. با توجه به اثر توده گردوغبار بر تابش موج کوتاه و بلند، میکروفیزیک ابر، و چرخه هیدرولوژی، که با نام اثرهای مستقیم و غیرمستقیم ذرات معلق شناخته می‌شود (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴a: ۱۵۲)، این بازخوردها با شدت و ارتفاع ستون گردوغبار در جو ارتباط مستقیم دارند؛ به طوری که آگاهی از توزیع قائم گردوغبار و ذرات آلاینده جو می‌تواند به درک بیشتر محققان در زمینه شدت اثرپذیری سامانه اقلیم از ذرات معلق در مناطق تحت تأثیر توفان‌های گردوغبار کمک کند.

در زمینه موضوع گردوغبار در غرب ایران مطالعات بسیاری انجام شده است. مفیدی و جعفری (۱۳۹۰) نشان دادند که سه سامانه فشار - شامل زبانه کم‌فشار زاگرس، پرفشارهای عربستان، و پرفشار ترکمنستان - بیش از هر مؤلفه گردشی دیگری در جنوب غربی آسیا، در شکل‌گیری توفان‌های گردوغبار تابستانه در منطقه خاورمیانه اهمیت دارند. کریمی احمدآباد و شکوهی رازی (۱۳۹۱) نشان دادند که گسترش زبانه کم‌فشار گرمایی خلیج فارس و کنش آن با ناوه تراز میانی به ایجاد یک سامانه پویسی - گرمایی در تراز زیرین منجر می‌شود که حاصل آن افزایش ناپایداری‌ها و سرعت باد در تراز زیرین و شکل‌گیری گردوغبار در منطقه است. در زمینه تحلیل آماری و تحلیل سری‌های زمانی این پدیده در منطقه مورد مطالعه، می‌توان به مطالعات باعقیده و احمدی (۱۳۹۳) و عزیزی و همکاران (۲۰۱۲-b) اشاره کرد؛ مطالعات آنان نشان می‌دهد که گردوغبار در منطقه در سال‌های اخیر دارای روند افزایشی بوده است. علیزاده چوبری و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که دو منطقه بیشینه رخداد گردوغبار در ایران وجود دارد: ۱. منطقه خوزستان؛ ۲. شرق ایران و مناطق در معرض بادهای بیست‌روزه. در زمینه پردازش داده‌های سنجش از دوری، صمدی و همکاران (۲۰۱۴) به ارائه روشی برای بهبود آشکارسازی توفان‌های گردوغبار در تصاویر MODIS در پهنه‌های آبی و خشکی پرداختند. در زمینه بررسی ترکیبات تشکیل‌دهنده ذرات، میکروارگانیزم‌ها، و عناصر سنگین قابل حمل به وسیله ذرات گردوغبار و پیامدهای حاصل از انتقال این ذرات می‌توان به مطالعات حجتی و همکاران (۲۰۱۱)، زراسوندی و همکاران (۲۰۱۱)، و نجفی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. به طور خلاصه، نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مهم‌ترین کانی تشکیل‌دهنده گردوغبار در غرب ایران کلسیت، کوارتز، و ژپس و مهم‌ترین عنصر این کانی‌ها SiO_2 است که نشان می‌دهد خاستگاه این ذرات مناطق بیابانی، خشک، و حوضه‌های تبخیری در منطقه است. این توفان‌ها حاوی عناصر سمی و میکروارگانیزم‌هایی هستند که برای سلامت انسان و محیط زیست مضرند.

خسروی (۱۳۸۹) در زمینه ساختار قائم گردوغبار در ایران، با استفاده از مدل NAAPS^1 ، توزیع قائم گردوغبار را در منطقه سیستان بررسی کرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات مرزی توزیع قائم گردوغبار دارای یک چرخه شبانه‌روزی است که بیشینه آن در ساعات میانی روز و کمینه آن در شب مشاهده می‌شود. عبدی ویشکایی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ساختار قائم دو نمونه از توفان‌های گردوغباری در غرب ایران در دوره گرم سال و بر اساس داده‌های لیدار^۲، اندازه‌گیری‌های تجربی، و مدل Hysplit پرداختند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که گسترش گردوغبار در راستای قائم جو در استان زنجان به طور متوسط در حدود چهار کیلومتر است. کوالبری و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از داده‌های

1. Navy Aerosol Analysis and Prediction System

2. LIDAR

ماهواره CALIPSO، نشان دادند که توزیع قائم گردوغبار در منطقه ساحل به شدت فرایندهای همرفتی در این منطقه وابسته است و ارتفاع گردوغبار در برخی دوره‌ها به بیش از شش کیلومتر می‌رسد. ژانگ و لی (۲۰۱۲)، بر اساس اندازه‌گیری‌های لیداری، تغییرات شبانه‌روزی ارتفاع گردوغبار در چین و اثر آن در مؤلفه‌های مختلف جوئی را بررسی کردند. ارتفاع ستون گردوغبار در دوره مورد مطالعه بین ۱ تا ۳٫۵ کیلومتر متغیر و ارتفاع آن به شدت ناپایداری‌های سطحی وابسته است.

در مطالعه حاضر به بررسی ارتباط الگوهای همدید با الگوهای توزیع قائم گردوغبار در غرب ایران و همچنین درک اثر عامل ناهمواری بر توزیع قائم گردوغبار در غرب ایران پرداخته شده است. ذکر این نکته لازم است که، با توجه به تمایز الگوهای همدید مؤثر در شکل‌گیری گردوغبار در دو دوره سرد و گرم سال، در این مطالعه الگوهای دوره سرد مورد تأکید است.

مواد و روش‌ها

از آنجا که اندازه‌گیری‌های لیداری در منطقه خاورمیانه به طور منظم و طولانی‌مدت وجود ندارد، برای بررسی ساختار قائم توفان‌های گردوغباری در این منطقه از مدل‌سازی استفاده شده است. بدین منظور، از مدل WRF-Chem استفاده شده است، زیرا پیش از این توانمندی آن در شبیه‌سازی توفان‌های گردوغبار در شرق آسیا (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۳)، منطقه خاورمیانه (پراکاش و همکاران، ۲۰۱۵)، و شرق ایران (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴b) بررسی شده است.

جدول ۱. پیکربندی مدل WRF-CHEM در این مطالعه

Model	WRF-Chem (Grell et al., 2005)
Horizontal resolution	30 km
Dimensions (X;Y)	100-102
Vertical levels	30
Boundary conditions	NCEP final analysis-FNL
Time step	180s
Simulation period	Dust storm case studies in 2004-2013 Microphysics: Lin et al. Scheme (Lin et al., 1983) Short-wave radiation: Goddard (Wild et al., 2000) Long-wave radiation: RRTM (Wild et al., 2000)
Physical schemes	PBL: Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) TKE scheme (Janjic, 2001) Surface: unified Noah land-surface model (Chen and Dudhia, 2001) Cumulus convection: new Grell scheme (Grell and Devvenyi, 2002) Boundary layer scheme: YSU (Hong, 2010)
Emission scheme	GOCART simple aerosol scheme (Ginoux et al., 2001)

جدول ۱ پیکربندی مدل مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. ذکر این نکته لازم است که عملکرد طرح‌واره‌های یادشده توسط پراکاش و همکاران (۲۰۱۵: ۲۰۹) در شبیه‌سازی توفان‌های گردوغبار در منطقه خاورمیانه ارزیابی شده و عملکرد قابل قبولی داشته است.

در بخش مربوط به مطالعات همدید، از داده‌های روزانه (NCEP-NCAR)، با قدرت تفکیک ۲/۵ درجه و در حد فاصل زمانی شش ساعته برای سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ استفاده شده است. تابع جبهه‌زایی^۱ (دوبعدی) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی بر اساس تابعی که مارتین (۲۰۰۶: ۱۹۸) ارائه کرده است محاسبه شد. مقادیر مثبت حاصل از این تابع، نشان‌دهنده نواحی مستعد جبهه‌زایی است. از عوامل مؤثر در شکل‌گیری و شدت رخداد گردوغبار در دوره سرد سال، موقعیت رودباد و میزان سرعت باد است. وجود رودباد و نیز وزش باد رخداد جبهه را محتمل و میسر می‌سازد. از این رو، فرایند جبهه‌زایی بررسی شد. به طور کلی، افزایش شیو افقی هریک از ویژگی‌های توده هوا (به‌ویژه چگالی) و اثر آن بر میدان باد را جبهه‌زایی می‌گویند (عساکره و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۰). برای محاسبه این تابع از داده‌های NCEP/NCAR و مؤلفه بادمداری و نصف‌النهاری و دما استفاده شد. از دیگر عواملی که دارای نقشی تعیین‌کننده در رخداد گردوغبار در منطقه است وضعیت رطوبت و همچنین رطوبت خاک در مناطق چشمه گردوغبار است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۱) الگوهای شکل‌گیری گردوغبار در دوره سرد را همان الگوهای بارش‌زا معرفی کردند؛ عامل رطوبت در تبدیل سامانه‌های بارش‌زا به گردوغبار نقش بسزایی دارد. به منظور بررسی واگرایی رطوبت و نقش آن در شکل‌گیری گردوغبار در مناطق چشمه گردوغبار، از تابع همگرایی و واگرایی شار رطوبت (کریمی، ۱۳۸۶: ۴۲؛ سوارز و مارنگو، ۲۰۰۸: ۴) استفاده شد. در این مطالعه، فقط مقادیر منفی این تابع- واگرایی شار رطوبت- مورد توجه است. برای محاسبه این تابع نیز از داده‌های NCEP/NCAR و مؤلفه بادمداری و نصف‌النهاری و همچنین نم ویژه استفاده شد. داده‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از: داده‌های گردوغبار در طی هشت بار دیدبانی در روز، مربوط به ۴۵ ایستگاه همدید در غرب کشور، در دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳، که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. برای شناسایی روزهای همراه با گردوغبار (کد ۰۶) از معیارهایی که خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) تعریف کرده‌اند استفاده شد؛ این معیارها عبارت‌اند از: تداوم زمانی حداقل یک‌روزه پدیده در غرب ایران؛ گسترش مکانی گردوغبار حداقل در شش ایستگاه؛ رسیدن دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر، حداقل در سه دیدبانی در یک روز. پس از شناسایی، رخدادهایی انتخاب شد که قابل ردیابی در تصاویر سنجنده MODIS باشند و به‌خوبی منطقه غرب یا جنوب غربی کشور را شامل شوند. سرانجام، نوزده رخداد گردوغبار در غرب و جنوب غربی ایران شناسایی شد؛ این نوزده معیار مبنای تحلیل‌ها در این مطالعه است (جدول ۲).

جدول ۲. دوره‌های مورد مطالعه

رخداد گردوغبار		رخداد گردوغبار		
جبهه‌ای - ناوه (الگوی توزیع قائم محدود)	3-4 Apr 2005	Case1	3-4 Apr 2011	Case6
	16-17 Apr 2006	Case2	12-13 Apr 2011	Case7
	28 Feb – 1 May 2012	Case3	29-30 Apr 2008	Case8
	12 Oct 2011	Case4	21-23 Feb 2009	Case1
	13 May 2012	Case5	2-4 May 2009	Case2
جبهه‌ای - ناوه (الگوی توزیع قائم گسترده)	4-5 May 2005	Case1	12-13 Mar 2012	Case3
	1-2 Ma1 2007	Case2	11 Feb 2006	Case1
	17 Apr 2009	Case3	12-13 Feb 2011	Case2
	13-14 Dec 2010	Case4	3 Mar 2011	Case3
	10 Mar 2011	Case5	-	-

یافته‌های پژوهش

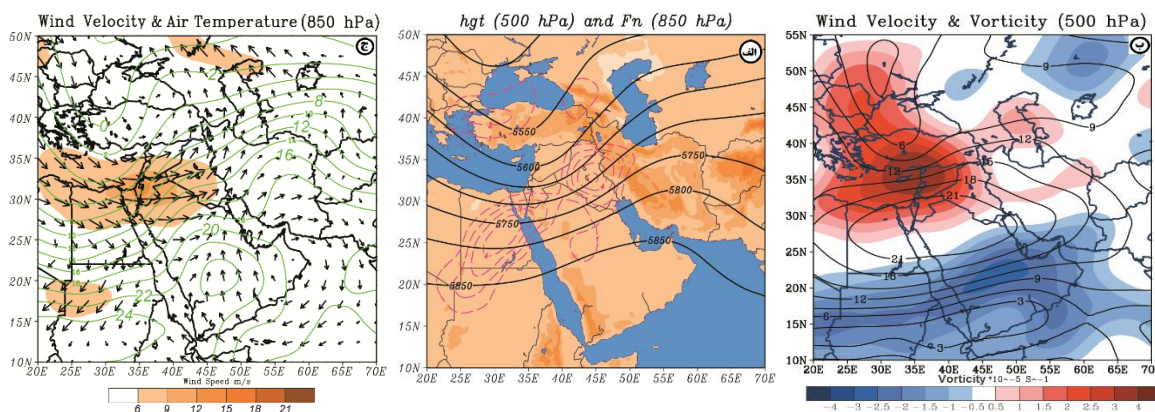
در دوره سرد سال، با عقب‌نشینی پُراتفاح جنب حاره، شرایط انتقال سامانه‌های مهاجر بادهای غربی به عرض‌های میانه و پایین‌تر فراهم می‌شود. گردوغبار در دوره سرد سال عمدتاً تحت تأثیر ناپایداری‌های حاصل از نفوذ سیستم‌های مهاجر بادهای غربی و بعضاً موقعیت جت و همچنین وضعیت رطوبت در منطقه است. چنین رخدادهایی با نام «توفان‌های گردوغبار جبهه‌ای» معرفی می‌شوند (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۸۱).

بر اساس دوره‌های منتخب، به طور کلی دو الگو در تراز میانی به ایجاد گردوغبار جبهه‌ای در منطقه خاورمیانه منجر می‌شود: ۱. الگوی ناوه؛ ۲. الگوی بندالی. الگوی دیگری که به شکل‌گیری گردوغبار در دوره سرد سال منجر می‌شود الگوی غیر جبهه‌ای است. در ادامه به بررسی توزیع قائم گردوغبار در این الگوها پرداخته می‌شود.

۱. ناوه دوره سرد

این الگو تحت تأثیر استقرار یک زبانه کم‌ارتفاع در تراز میانی (۵۰۰ هکتوپاسکال) در جنوب غربی آسیا، که جایگاه محور آن از ۳۵ تا ۴۵ درجه طول شرقی متغیر است، ایجاد می‌شود (شکل ۱ - الف). استقرار این ناوه در منطقه خاورمیانه، از یک سو، به ایجاد واگرایی شدید در تراز میانی در شرق مدیترانه تا شمال شبه‌جزیره عربستان، نیمه غربی عراق، و جنوب ترکیه (شکل ۱ - ب) و از سوی دیگر تشدید و گسترش هم‌گرایی سطحی و ایجاد صعود در این مناطق منجر می‌شود. باید اضافه کرد که استقرار این ناوه به ریزش هوای سرد عرض‌های بالاتر به بخش غربی خاورمیانه منجر می‌شود و در نواحی جنوبی شبه‌جزیره عربستان تا شمال عراق فرارفت هوای گرم عرض‌های پایین به ایجاد یک شیو دمایی شدید (C° ۲۴) از شرق مدیترانه تا شمال شبه‌جزیره عربستان منجر شده (شکل ۱ - ج) که شرایط مناسبی برای جبهه‌زایی در منطقه فراهم شده است (شکل ۱ - الف)؛ به طوری که در این الگو متوسط تابع جبهه‌زایی نشان می‌دهد که از شرق مدیترانه تا

غرب ایران شرایط مناسب برای جبهه‌زایی ایجاد شده است. استقرار این الگو تشدید ناپایداری سطحی، افزایش سرعت باد در سطح زمین، و همچنین ایجاد شرایط صعود هوا در تراز زیرین تا بخش‌های فوقانی تروپوسفر در منطقه خاورمیانه - و مناطق منشأ گردوغبار در عراق، شمال عربستان و سوریه - را فراهم کند (شکل ۲ - ب).



شکل ۱. الف) متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل (تراز ۵۰۰ ه.پ.) و تابع جبهه‌زایی ($10^{-4} \text{ k.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) در تراز ۸۵۰ ه.پ.؛ ب) متوسط تاوایی نسبی ($5 \cdot 10^{-10} \text{ S}^{-1}$) و متوسط سرعت باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی؛ ج) متوسط دما ($^{\circ}\text{C}$) و سرعت باد (m/s) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی

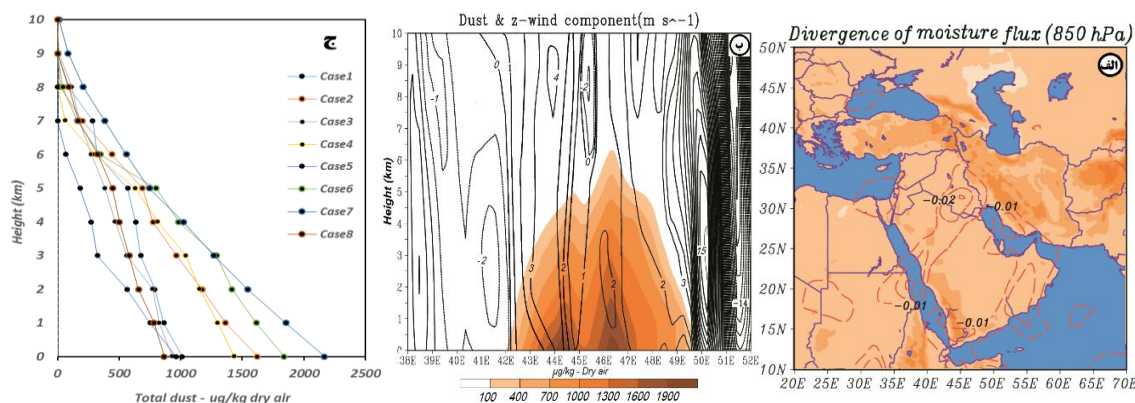
در کنار موارد ذکر شده، وضعیت شار رطوبت در منطقه در تراز ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال (در بیشتر موارد) دارای واگرایی بوده است که این شرایط سبب تخلیه رطوبت در این نواحی شده و حاصل آن فقدان بارش در نواحی مرکزی تا غربی عراق و حتی شرق سوریه بوده است (شکل ۲ - الف). همچنین، فقدان واگرایی رطوبت در مدیترانه، که یکی از مهم‌ترین منابع تغذیه رطوبت برای مناطق منشأ گردوغبار در عراق، سوریه، و شمال عربستان است (رنجبر و عزیز، ۱۳۹۱: ۹۰)، به خشکی توده هوا در این دوره‌ها منجر شده و باعث شکل‌گیری گردوغبار شده است.

در الگوی ناوه دوره سرد، توزیع قائم گردوغبار دارای دو الگوی متفاوت است: یکی، به طور متوسط بیشینه گسترش قائم گردوغبار در ارتفاع حدود ۶/۵ کیلومتری از جو (الگوی توزیع قائم اول) (شکل ۲ - ب و ج) و دیگری، ارتفاع ستون گردوغبار حدود ۳/۵ کیلومتر (الگوی توزیع قائم دوم) (شکل ۵ - الف؛ ۶ - الف). برای تحلیل علت این تمایز، به بررسی وضعیت مؤلفه باد قائم، سرعت باد، چرخندگی، و موقعیت جت در راستای قائم جو پرداخته می‌شود.

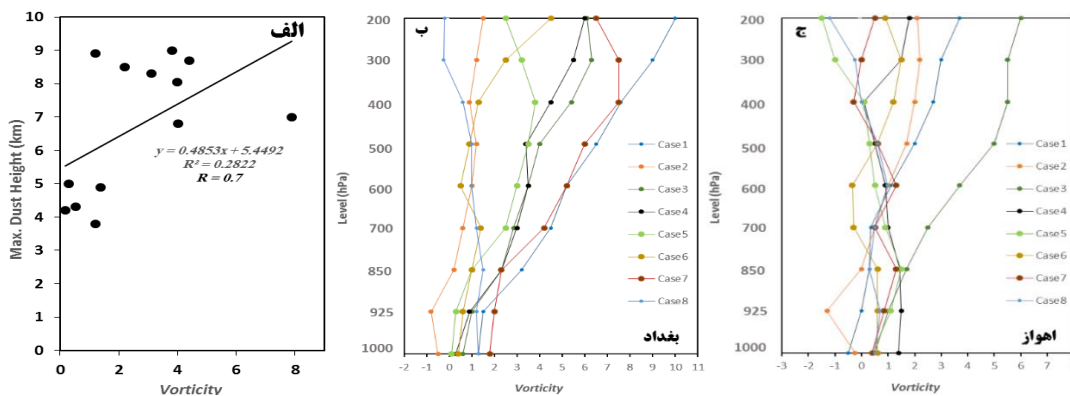
توزیع قائم گردوغبار در ارتباط با اندازه ذرات معلق، صعود هوا در بخش‌های زیرین تا فوقانی جو، شدت باد سطحی، و ویژگی رطوبتی رسوبات سطحی است (انگستادلر و همکاران، ۲۰۰۶: ۷۷). در الگوی توزیع قائم اول، که ارتفاع ستون گردوغبار در دوره‌های مورد مطالعه در متوسط موقعیت چهار شهر - اهواز، کرمانشاه، آبادان، و بغداد - بین ۶ تا ۸ کیلومتر متغیر است (شکل ۲ - ج)، مؤلفه باد قائم نشان می‌دهد که در مناطق تحت تأثیر گردوغبار سرعت قائم بالاسو حاکم است (شکل ۲ - ب)؛ به طوری که در این شکل ارتباط ارتفاع گردوغبار با حرکات صعودی به‌خوبی قابل ملاحظه است. در مناطق منشأ گردوغبار در بین‌النهرین (در طول ۴۴ تا ۴۵ درجه طول شرقی) و شرق عراق (در طول ۴۶ تا ۴۷ درجه طول شرقی)، سرعت بالای باد سطحی و صعود هوا به برداشت رسوبات سست سطحی در این نواحی منجر شده است. همچنین، در طول ۴۵ تا ۴۶ درجه شرقی، نزول هوا در ارتفاع بالاتر از شش کیلومتر و در ارتفاع پایین‌تر از آن نیز تضعیف

حرکات صعودی به کاهش ارتفاع گردوغبار و نشست آن و در نتیجه کاهش ارتفاع آن در این مناطق منجر شده است. متوسط سرعت باد در شمال شبه‌جزیره عربستان تا شرق عراق ۱۰ متر بر ثانیه است و سرعت باد در تراز زیرین در حدی است که بتواند به برداشت حجم زیادی از رسوبات سطحی در نواحی بیابانی این مناطق منجر شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری و تشدید حرکات صعودی در جو و همچنین شدت انتشار گردوغبار در راستای قائم شدت واگرایی در تراز میانی است (شکل ۳ - الف). بدین منظور، نیمرخ تاوایی در موقعیت دو شهر اهواز و بغداد برای دوره‌های مورد مطالعه ترسیم شد. بر اساس شکل ۳ - ب، در الگوی اول، در موقعیت شهر بغداد در کلیه رخدادهای مورد مطالعه، حرکت چرخندی در تراز ۵۰۰ ه.پ. وجود دارد و متوسط تاوایی نسبی $3.31 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ است که واگرایی را در تراز میانی نشان می‌دهد. چنین شرایطی یکی از عوامل ایجاد صعود و انتقال گردوغبار به بخش‌های بالاتر تروپوسفر است. همچنین، در موقعیت شهر اهواز، میزان متوسط تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ ه.پ. $1.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ است که نشان می‌دهد شدت واگرایی در این منطقه کمتر از شدت آن در موقعیت شهر بغداد است و در کنار کاهش تراکم گردوغبار در غرب ایران یکی از دلایل کاهش ارتفاع ستون گردوغبار در غرب ایران تضعیف واگرایی در تراز میانی است (شکل ۳ - ج).



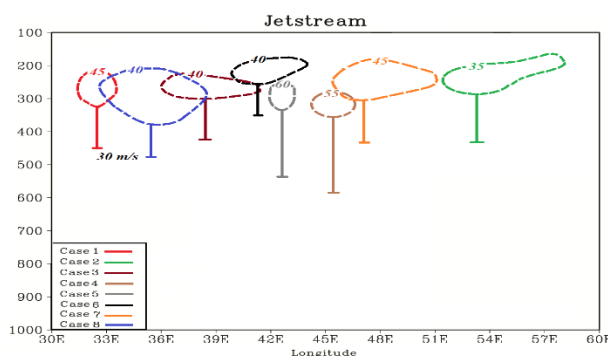
شکل ۲. الف) متوسط واگرایی شار رطوبت ($10^{-5} \text{ g.kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) در الگوی جبهه‌ای (ناوه) در متوسط تراز ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ ه.پ.؛ ب) نمایه قائم ارتفاع گردوغبار (رنگی) و مؤلفه باد قائم (خطوط ممند) $\times 100$ در متوسط عرض‌های جغرافیایی ۳۵-۳۰ درجه شمالی در الگوی ناهه دوره سرد و در الگوی اول توزیع قائم؛ ج) میانگین ارتفاع گردوغبار در موقعیت چهار شهر اهواز، آبادان، کرمانشاه، و بغداد. واحد گردوغبار به میکروگرم در کیلوگرم هوای خشک است.



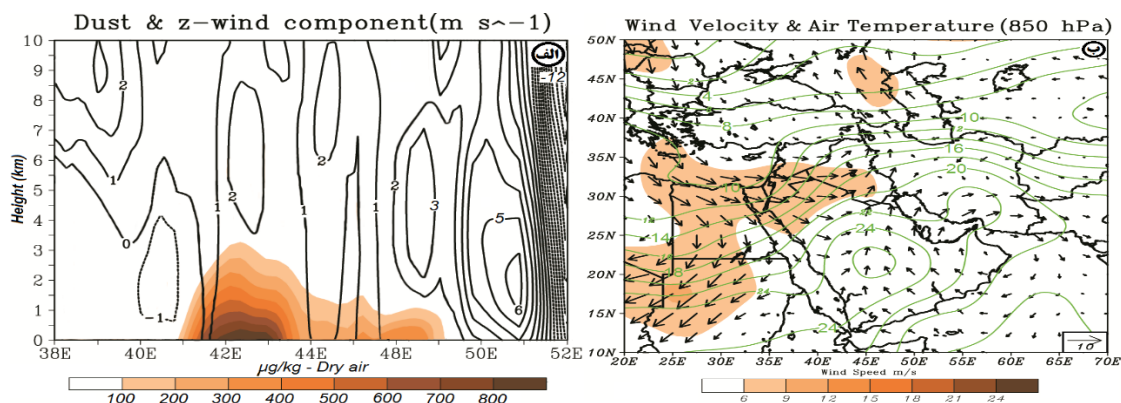
شکل ۳. الف) پراش‌نگار رابطه تاوایی نسبی (10^{-5} s^{-1}) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی و بیشینه ارتفاع گردوغبار در موقعیت شهر بغداد؛ نیمرخ تاوایی نسبی (10^{-5} s^{-1}) در موقعیت شهرهای بغداد (ب) و اهواز (ج)

در دوره سرد سال، شدت و موقعیت جت قطبی در شدت صعود و ناپایداری در تراز زیرین مؤثر است. در الگوی اول، موقعیت هسته جت در متوسط عرض‌های ۳۵ تا ۴۵ درجه شمالی، بین طول ۳۳ تا ۵۱ درجه شرقی است و موقعیت جت عمدتاً بر فراز مناطق منشأ گردوغبار قرار دارد؛ این شرایط به تشدید سرعت قائم بالاسو در این مناطق منجر می‌شود. خط هم‌سرعت ۳۰ متر بر ثانیه نیز عمدتاً بین سطوح ۴۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکالی قرار دارد که نشان می‌دهد در تراز میانی و بخش‌های فوقانی سرعت باد از شدت کافی برای انتقال گردوغبار به بخش‌های بالاتر تروپوسفر برخوردار است (شکل ۴). چنین شرایطی، علاوه بر تقویت چرخندزایی در سطح زمین، به تقویت حرکات صعودی در بخش زیرین و میانی منجر می‌شود و امکان انتقال حجم بیشتری از گردوغبار را به سطوح بالاتر جو میسر می‌کند.

در الگوی توزیع قائم دوم، که تحت الگوی گردشی ناوه ایجاد می‌شود، بیشینه ارتفاع ستون گردوغبار حدود ۳/۵ کیلومتر است (شکل‌های ۵ - الف و ۶ - الف). در این الگو، متأثر از استقرار محور ناوه در منطقه و وجود واگرایی در تراز میانی، مؤلفه باد قائم حرکات صعودی را در منطقه نشان می‌دهد؛ به طوری که از طول ۴۱/۵ تا ۵۱ درجه شرقی سرعت قائم بالاسو حاکم است. چنین شرایطی شرایط مناسب برای انتقال گردوغبار به بخش‌های میانی تروپوسفر را فراهم می‌کند (شکل ۵ - الف).



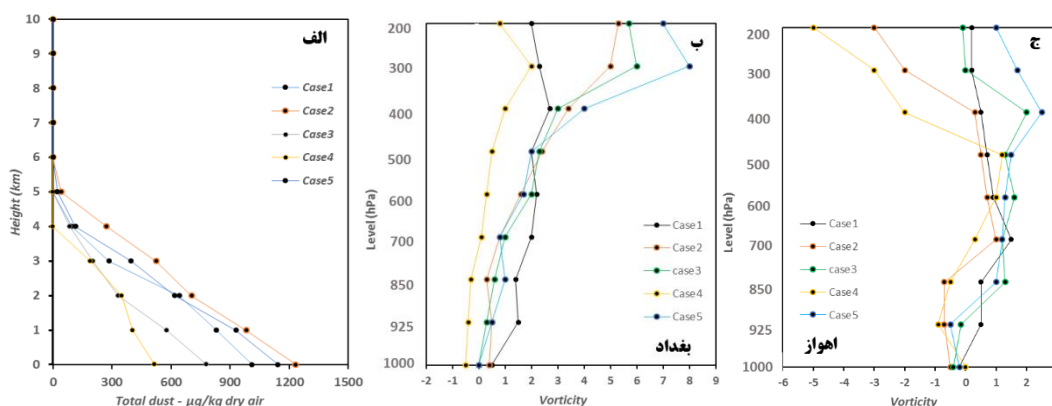
شکل ۴. پروفایل موقعیت هسته جت قطبی و خط هم‌سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در الگوی توزیع قائم اول



شکل ۵. الف) نمایه قائم ارتفاع گردوغبار (رنگی) و مؤلفه باد قائم (خطوط منقطع) در متوسط عرض‌های جغرافیایی ۳۵-۳۰ درجه شمالی در الگوی ناوه دوره سرد و در الگوی دوم توزیع قائم؛ ب) متوسط دما (°C) و سرعت باد در تراز ۸۵۰ ه.پ.

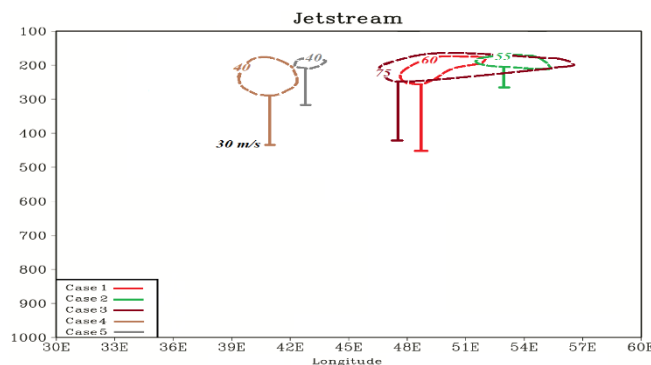
متوسط تاوایی در تراز میانی (۵۰۰ ه. پ.) در الگوی دوم در موقعیت شهر بغداد و اهواز به ترتیب ۱/۷۴ و ۱ (شکل ۶ - ب و ج) و در این تراز در کلیه موارد تاوایی نسبی مثبت بوده است که نشان‌دهنده وجود (10^{-5} s^{-1})

حرکات چرخندی در تراز میانی است. در این الگو، میزان تاوایی در تراز میانی در مناطق منشأ (بین طول ۴۱ تا ۴۵ درجه شرقی) و در دوره‌های مورد مطالعه نسبت به الگوی اول کمتر و لذا سرعت باد ناپایداری در تراز زیرین و صعود در منطقه مورد مطالعه نیز از شدت کمتری برخوردار است (شکل ۵ - الف و ب). علاوه بر عامل صعود هوا، متوسط اختلاف دما بین شمال شبه‌جزیره عربستان و شرق مدیترانه 12°C است؛ این شرایط شدت جبهه‌زایی و سرعت باد سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت باد در تراز زیرین (۸۵۰ ه.پ.) در این الگو در مناطق منشأ ۷ متر بر ثانیه است. بنابراین، سرعت باد سطحی نیز کمتر از الگوی اول است. با توجه به سرعت باد سطحی، همان‌طور که در شکل‌های ۵ - الف و ۶ - الف دیده می‌شود، بیشینه تراکم گردوغبار در طول ۴۲ تا ۴۳ درجه شرقی، ۸۰۰ میکروگرم در متر مکعب است که نشان می‌دهد تراکم گردوغبار در این نواحی کمتر از الگوی اول است.



شکل ۶. الف) میانگین ارتفاع گردوغبار در موقعیت چهار شهر اهواز، آبادان، کرمانشاه، و بغداد؛ نیمرخ تاوایی نسبی (10^{-5} s^{-1}) در موقعیت شهرهای بغداد (ب) و اهواز (ج)

در این الگو، موقعیت هسته جت در سه رخداد، به‌رغم سرعت بالای هسته جت، در طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۷ درجه شرقی قرار گرفته است که با توجه به فاصله‌ای که هسته جت با مناطق منشأ گردوغبار در منطقه دارد (شکل ۷)، در تشدید ناپایداری و حرکات صعودی در مناطق منشأ تأثیر چندانی ندارد. در دو مورد دیگر، به‌رغم استقرار هسته جت در مناطق منشأ گردوغبار، اما از شدت بالایی برخوردار نبوده و خط هم‌سرعت ۳۰ متر بر ثانیه نیز تا سطح ۳۰۰ و ۴۰۰ هکتوپاسکالی نفوذ کرده است. بنابراین، در تشدید چرخندزایی سطحی و حرکات صعودی در جو تأثیر زیادی ندارد. بنابراین، در الگوی دوم، موقعیت یا شدت جت نیز به‌گونه‌ای است که تأثیر بسیار اندکی در ایجاد ناپایداری و تشدید صعود دارد.

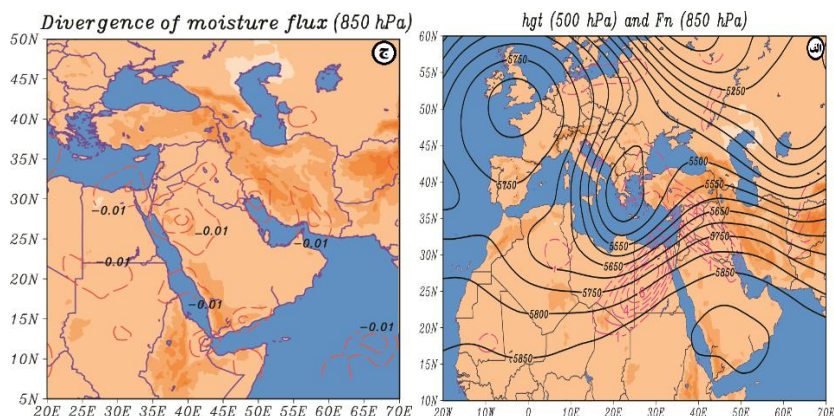


شکل ۷. پروفایل موقعیت هسته جت قطبی و خط هم‌سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در الگوی توزیع قائم دوم

۲. به‌های (بندالی)

رخداد بندالی، با توجه به موقعیت قرارگیری سامانه نسبت به مناطق تحت نفوذ، می‌تواند برخی مناطق را با بارش بیش از حد نرمال و برخی مناطق دیگر را با بارش کمتر از نرمال و پایداری مواجه کند. پژوهشگران نشان دادند که سامانه‌های بندالی، با توجه به موقعیت استقرار آن، در مواردی محدود باعث شکل‌گیری گردوغبار در منطقه می‌شوند (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۷).

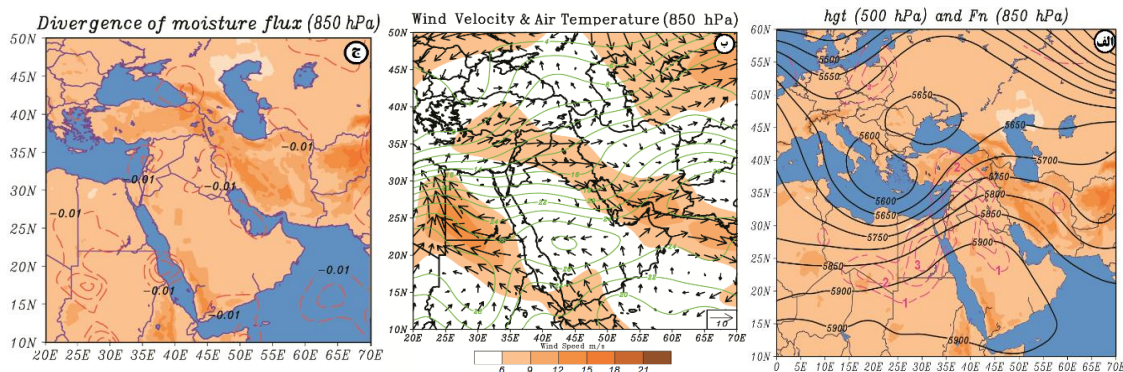
در الگوی جبهه‌های بندالی (امگایی)، برای یک دوره زمانی حداقل پنج‌روزه، یک سامانه شبه‌ساکن از اقیانوس اطلس تا شرق اروپا را تحت تأثیر قرار داده است که مرکز پُراتفاح آن در غرب اروپا و دو سامانه کم‌ارتفاع در قسمت‌های چپ و راست آن اقیانوس اطلس و شرق اروپا را تحت تأثیر قرار داده است. با گذشت چند روز از استقرار این سامانه در این مناطق، مرکز پُراتفاح این سامانه در طی دوره استقرار خود، با حرکت محدود نصف‌النهاری، از غرب به نواحی مرکزی اروپا منتقل می‌شود و مرکز کم‌ارتفاع در قسمت راست این سامانه نیز با یک حرکت محدود در شرق اروپا مستقر می‌شود. در تراز میانی، با توجه به موقعیت محور ناوه، که در شرق اروپا مستقر است، بخش غربی خاورمیانه، سوریه، و بیابان‌های شرقی عراق، تحت تأثیر واگرایی در تراز میانی قرار می‌گیرد؛ چنین شرایطی، علاوه بر ایجاد ناپایداری و شرایط صعود هوا، زمینه جبهه‌زایی و افزایش سرعت باد را در تراز زیرین فراهم می‌کند (شکل ۸ - الف). ذکر این نکته لازم است که مناطق یادشده در خروجی‌ترین بخش واگرایی تراز میانی قرار گرفته و شدت ناپایداری‌های حاصل از این سامانه در این مناطق بسیار کمتر از نواحی شرق مدیترانه است، بنابراین، بارش‌های سنگین یا سرماهای شدید حاصل از سامانه بندالی مناطق منشأ گردوغبار و همچنین غرب ایران را دربر نمی‌گیرد و این سامانه فقط باعث ناپایداری و ایجاد یک توده هوای خشک در مناطق یادشده می‌شود. در این الگو، در تراز ۸۵۰ ه.پ. فرارفت هوای گرم در شبه‌جزیره عربستان و ریزش هوای سرد در شرق مدیترانه باعث ایجاد شیو دمایی بین شرق مدیترانه و شرق عربستان شده است؛ این شرایط زمینه تقویت جبهه‌زایی و افزایش سرعت باد در تراز زیرین را فراهم می‌کند؛ به طوری که متوسط سرعت باد در سطح ۸۵۰ ه.پ. از شرق مدیترانه تا شرق عراق ۱۰ متر بر ثانیه است (شکل ۸ - ب). علت خشکی توده هوا نیز واگرایی شار رطوبت در نواحی منشأ گردوغبار در منطقه خاورمیانه است که باعث تخلیه رطوبتی منطقه می‌شود (شکل ۸ - ج).



شکل ۸. الف) متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل (در تراز ۵۰۰ ه.پ.) و تابع جبهه‌زایی ($10^{-4} \text{ k.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) در تراز ۸۵۰ ه.پ. (خط‌چین‌ها)؛ ب) متوسط دما ($^{\circ}\text{C}$) (خطوط ممتد) و سرعت باد (پهنه رنگی) در تراز ۸۵۰ ه.پ.؛ ج) متوسط واگرایی شار رطوبت ($10^{-5} \text{ g.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$)^۱ (در الگوی جبهه‌ای (بندالی-امگایی))

در چنین الگویی، بارش‌ها عمدتاً محدود به بخش‌های شرقی اروپا، مدیترانه، و ترکیه می‌شود و، با توجه به فقدان بارش در نواحی جنوبی و غربی سوریه و همچنین شرقی عراق، این شرایط به ایجاد گردوغبار منجر شده است. در چنین شرایطی، تا زمانی که مناطق منشأ گردوغبار در کنار ناپایداری دارای واگرایی رطوبت باشند و بارش رخ نداده باشد، به ایجاد گردوغبار در منطقه منجر می‌شود. با تغییر الگوی رطوبت در منطقه و استقرار محور ناوه در مناطق منشأ و شکل‌گیری واگرایی رطوبت در دریای مدیترانه شکل‌گیری گردوغبار به پایان می‌رسد.

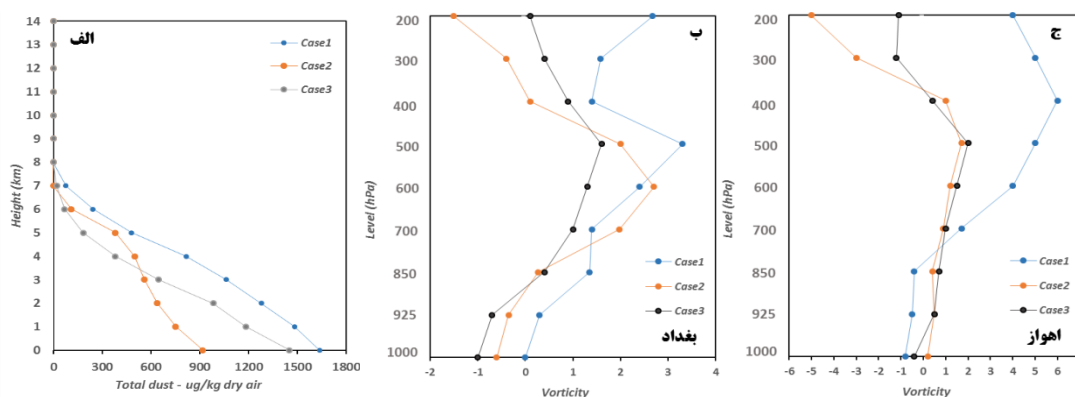
دیگر الگوی بندالی که باعث شکل‌گیری گردوغبار در منطقه می‌شود الگوی بندالی زوجی است؛ به طوری که در عرض‌های ۳۵ تا ۴۵ درجه شمالی استقرار یک مرکز کم‌ارتفاع و ناوه شبه‌ساکن در جنوب غربی آسیا به ایجاد جبهه‌زایی، شرایط صعود، و شکل‌گیری گردوغبار در منطقه منجر می‌شود (شکل ۹ - الف). سرعت متوسط باد در تراز ۸۵۰ ه.پ. در مناطق منشأ گردوغبار در این الگو ۷ متر بر ثانیه است، بنابراین، سرعت باد از شدت کافی برای برداشت و انتقال افقی رسوبات سست سطحی برخوردار است (شکل ۹ - ب). در این الگو نیز مهم‌ترین عامل شکل‌گیری گردوغبار در نواحی بیابانی منطقه خاورمیانه واگرایی رطوبت در این نواحی است (شکل ۹ - ج).



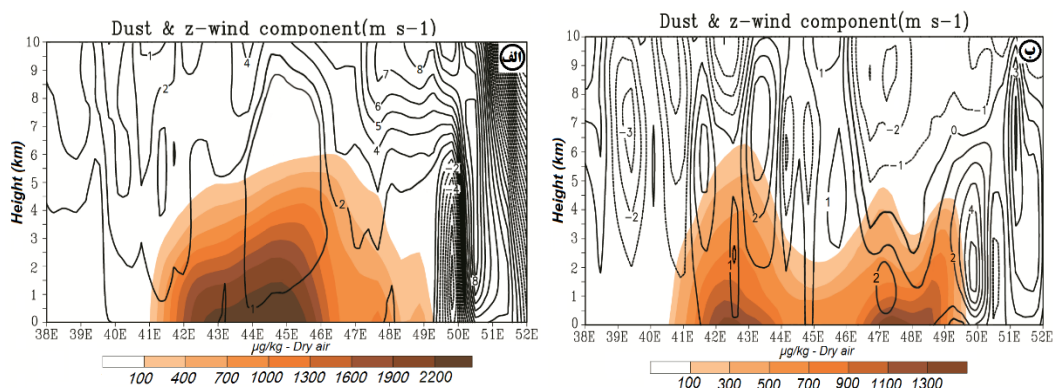
شکل ۹. مشابه شکل ۸، اما برای الگوی جبهه‌ای (بندالی-زوجی)

در الگوی بندالی، ارتفاع ستون گردوغبار در تروپوسفر حدود ۶ کیلومتر است (شکل ۱۰ - الف؛ شکل ۱۱). در این الگو باد سطحی از شدت کافی برای برداشت رسوبات سطحی در نواحی خشک منطقه برخوردار است. علاوه بر این، مشابه الگوی ناوه، واگرایی در تراز میانی شرایط را برای صعود هوا در بخش‌های زیرین تا میانی جو فراهم کرده است. متوسط تاوایی نسبی در دو شهر اهواز و بغداد به ترتیب $2/3$ و $2/8$ ($10^{-5} s^{-1}$) است (شکل ۱۰ - الف، ب) که گردش چرخندی و واگرایی را در این مناطق نشان می‌دهد و به تشدید صعود در منطقه و انتقال گردوغبار ایجاد شده در بخش زیرین تروپوسفر به بخش‌های میانی منجر می‌شود.

بر اساس شکل ۱۱، توزیع قائم گردوغبار در دو الگوی امگایی و زوجی ۶ کیلومتر است، اما تراکم و شدت گردوغبار ایجاد شده تحت تأثیر استقرار دو الگو در الگوی امگایی بیشتر از الگوی زوجی است؛ این شرایط در ارتباط با سرعت باد سطحی است و در الگوی امگایی شدت باد سطحی بیش از الگوی زوجی است. ارتفاع گردوغبار در این الگو نیز متأثر از مؤلفه باد قائم است؛ به طوری که اگر تراکم گردوغبار در ترازهای زیرین زیاد باشد، عامل صعود هوا تعیین‌کننده ارتفاع گردوغبار در تروپوسفر است.



شکل ۱۰. الف) میانگین ارتفاع گردوغبار در موقعیت چهار شهر اهواز، آبادان، کرمانشاه، و بغداد؛ نیمرخ تاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$) در موقعیت شهرهای بغداد (ب) و اهواز (ج)

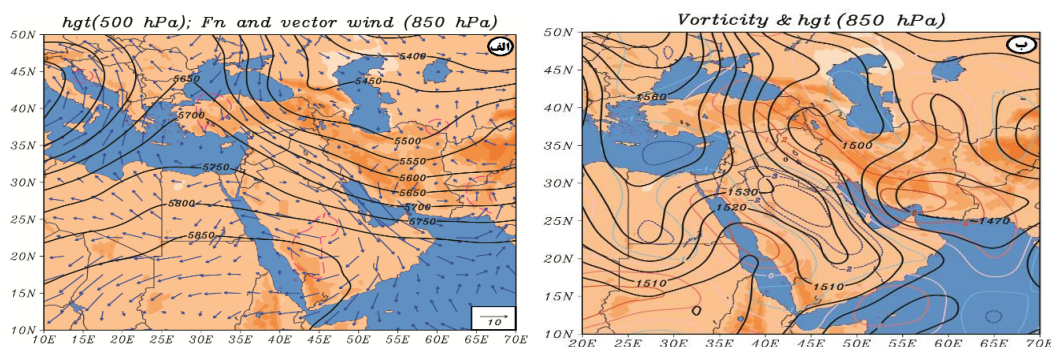


شکل ۱۱. نمایه قائم ارتفاع گردوغبار (رنگی) و مؤلفه باد قائم (خطوط ممتد) $10 \times$ در الگوی جبهه‌ای در دوره سرد و در متوسط عرض‌های جغرافیایی ۳۵-۳۰ درجه شمالی؛ الف) الگوی امگا؛ ب) زوجی

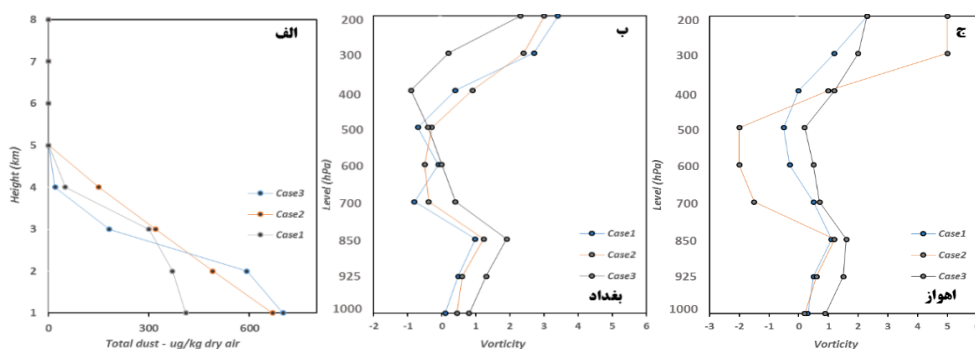
۳. غیر جبهه‌ای (پشته)

در این الگو نه جبهه‌زایی رخ می‌دهد و نه رودباد جبهه قطبی به منطقه نفوذ می‌کند که سبب تشدید ناپایداری و شرایط صعود در منطقه شود. در این الگو، در تراز ۵۰۰ ه.پ.، پهنه‌های وسیعی از نواحی غربی ایران تا نواحی مرکزی عربستان تحت تأثیر استقرار یک پشته قرار می‌گیرد (شکل ۱۲ - الف). در این شرایط، عاملی که به ایجاد گردوغبار منجر می‌شود الگوی گردشی در تراز زیرین تروپوسفر است. در تراز ۸۵۰ ه.پ.، با وجود یک مرکز کم‌ارتفاع در جنوب شرقی ایران و یک محور ناوه در نواحی مرکزی ایران تا غرب ترکیه یک منطقه با تاوایی مثبت و گردش چرخندی در این مناطق ایجاد شده است. از سوی دیگر، با وجود محور یک پشته در جنوب غربی مدیترانه تا بخش‌های جنوبی شبه‌جزیره عربستان یک منطقه با تاوایی منفی و گردش واچرخندی در شبه‌جزیره عربستان ایجاد شده است. این شرایط باعث ایجاد شیو تاوایی و افزایش سرعت باد در نواحی مرکزی و جنوب شرقی عراق و همچنین شمال شبه‌جزیره عربستان (در حدود ۱۰ متر بر ثانیه) و در نتیجه ایجاد گردوغبار در این نواحی شده است (شکل ۱۲ - ب).

ارتفاع گردوغبار در این الگو به طور متوسط ۳/۵ کیلومتر است و تراکم گردوغبار در بخش‌های زیرین جو در مناطق منشأ کمتر از رخدادهایی با الگوی جبهه‌ای است (شکل ۱۳ - الف). در این الگو متوسط تاوایی نسبی در موقعیت دو شهر اهواز و بغداد نشان می‌دهد که تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی گردش چرخندی در منطقه وجود دارد و در ترازهای ۷۰۰ تا ۴۰۰ گردش واچرخندی در منطقه حاکم می‌شود (شکل ۱۳ - ب، ج). متوسط تاوایی در تراز ۸۵۰ ه.پ. در دو شهر بغداد و اهواز ۱/۴ و ۱/۳ است و در تراز ۵۰۰ ه.پ. $-۰/۷۶$ و $-۰/۴۶$ ($10^{-5} s^{-1}$) است که نشان می‌دهد استقرار این الگو باعث گردش واچرخندی در ترازهای میانی و گردش چرخندی در بخش زیرین تروپوسفر می‌شود.

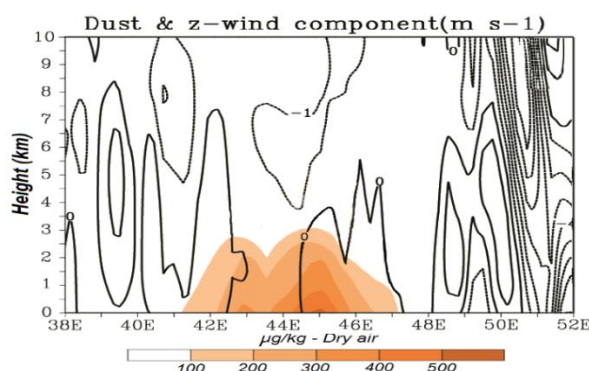


شکل ۱۲. الف) ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ ه.پ.، تابع جبهه‌زایی ($10^{-4} k.m^{-1}.s^{-1}$) و سرعت و جهت باد (m/s) در تراز ۸۵۰ ه.پ.؛ ب) ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$) در تراز ۸۵۰ ه.پ.



شکل ۱۳. الف) میانگین ارتفاع گردوغبار در موقعیت چهار شهر اهواز، آبادان، کرمانشاه و بغداد؛ نیمرخ تاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$) در موقعیت شهرهای بغداد (ب) و اهواز (ج)

بر اساس شکل ۱۴، در الگوی پشته در مناطق خیزش گردوغبار (بین طول ۴۴ تا ۴۶ درجه شرقی)، مؤلفه باد قائم نشان می‌دهد که تا ارتفاع حدود ۴ کیلومتری از تروپوسفر، سرعت قائم بالاسو حاکم است و مؤلفه باد قائم مثبت است؛ هرچند که نزدیک به صفر است و نشان‌دهنده حرکات صعودی محدود تا ارتفاع حدود ۴ کیلومتری است. با افزایش ارتفاع، سرعت قائم پایین‌سو حاکم می‌شود؛ این شرایط باعث شده تا ستون گردوغبار در جو در بیشترین ارتفاع به کمتر از ۴ کیلومتر برسد. در این الگو، صعود هوا شدت کمی دارد و محدود به بخش‌های زیرین جو است و در بخش‌های میانی و فوقانی، با وجود سرعت قائم پایین‌سو، فرونشینی حاکم می‌شود. بنابراین، علاوه بر اینکه تراکم گردوغبار نسبت به الگوی جبهه‌ای ضعیف‌تر است، ارتفاع ستون گردوغبار نیز کمتر است.



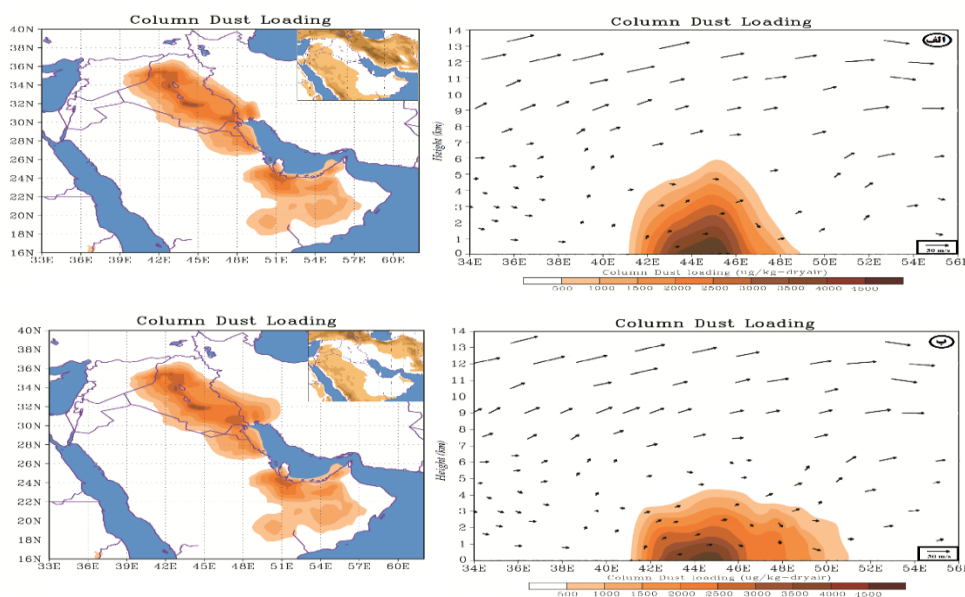
شکل ۱۴. نمایه قائم ارتفاع گردوغبار (رنگی) و مؤلفه باد قائم $\times 100$ در الگوی غیر جبهه‌ای در عرض ۳۲ درجه شمالی

بررسی اثر (توپوگرافی) کوهستان زاگرس در توزیع قائم گردوغبار

سد کوهستانی زاگرس در مقابل توده‌های هوایی، که گردوغبار را به غرب ایران منتقل می‌کنند، چنین دیدگاهی را به وجود می‌آورد که این سد کوهستانی مهم‌ترین مانع در مقابل ورود توده گردوغبار به بخش‌های مرکزی ایران است. ادامه به بررسی نقش این کوهستان در توزیع قائم و افقی گردوغبار در غرب ایران در دوره سرد سال پرداخته می‌شود. بر اساس شکل ۱۵ - الف، در شرایط طبیعی، بیشترین میزان پیشروی گردوغبار در داخل مرزهای کشور (در متوسط ۵ رخداده مورد مطالعه) تا طول جغرافیایی ۴۹ درجه است و بیشینه ارتفاع گردوغبار در مناطق خیزش گردوغبار در حدود ۵ کیلومتر است که در مرزهای غربی ایران به کمتر از ۳ کیلومتر می‌رسد. بیشترین حجم توده گردوغبار در نواحی منشأ گردوغبار وجود دارد و در مرزهای غربی کشور حجم توده گردوغبار کاهش می‌یابد. همچنین، مؤلفه باد قائم نشان می‌دهد (شکل ۱۶ - الف) که در طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۱ درجه شمالی سرعت قائم پایین‌سوست که پس از آن بالاسو می‌شود. از یک سو، کاهش حجم توده گردوغبار در غرب ایران و از سوی دیگر وجود سرعت قائم پایین‌سو - که سبب نزول گردوغبار در طول ۴۸ تا ۵۱ درجه شرقی می‌شود - باعث محدود شدن گردوغبار تا نواحی مرکزی استان خوزستان شده است.

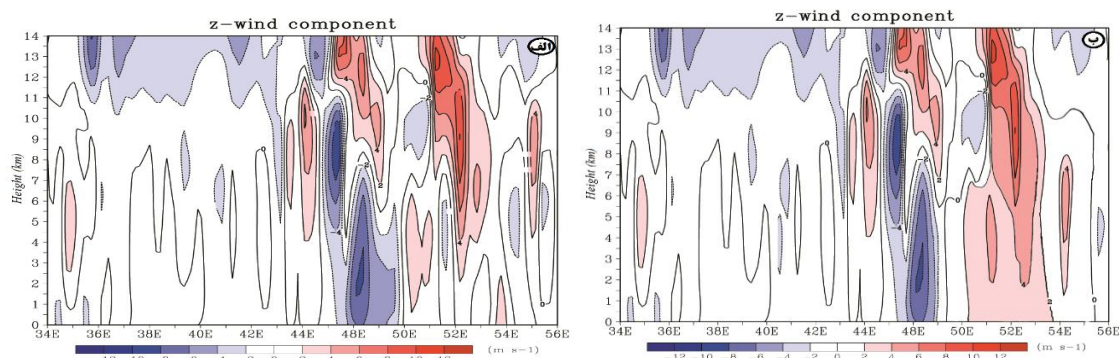
در شرایط حذف کوهستان (۱۵ - ب) بیشینه ارتفاع گردوغبار در حدود ۵ کیلومتر است که در نواحی غربی ایران ۳ کیلومتر است، اما گسترش افقی آن تا عرض حدود ۵۱ درجه است. در این شرایط، فرونشینی هوا همچنان در طول

جغرافیایی ۴۸ درجه وجود دارد، اما محدود به طول ۴۹ درجه شرقی می‌شود و پس از آن سرعت قائم بالاسو مجدداً حاکم می‌شود. بنابراین، ارتفاع ستون گردوغبار و تراکم آن در طول ۴۸ درجه شرقی کاهش یافته است. اما، به دلیل وجود حرکات بالاسو، بلافاصله بعد از طول جغرافیایی ۴۹ درجه شرقی (شکل ۱۶ - ب)، امکان افزایش ارتفاع گردوغبار و همچنین امکان پیشروی افقی گردوغبار (با توجه به جهت باد غربی- شرقی) تا عرض جغرافیایی ۵۱ درجه طول شرقی فراهم شده است. از سوی دیگر، به علت محدود شدن تراکم گردوغبار در غرب کشور، پیشروی قائم و افقی گردوغبار محدود است و به نواحی داخلی ایران منتقل نمی‌شود.



شکل ۱۵. الف) نمایه قائم (در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی) و افقی توده گردوغبار، بردار باد (m/s) در شرایط وجود کوهستان؛ ب) همان، در شرایط بدون کوهستان

این شرایط نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل در محدود شدن ارتفاع توده گردوغبار در غرب ایران ماهیت سامانه‌های جوئی است و مانع کوهستانی زاگرس در انتشار قائم و افقی گردوغبار اهمیت کمتری دارد. با حذف کوهستان، توده گردوغبار پیشروی بیشتری در داخل مرزهای کشور خواهد داشت و ارتفاع آن کمتر از ۳ کیلومتر است. اما آنچه بیش از مانع کوهستانی زاگرس تعیین‌کننده ارتفاع و میزان پیشروی گردوغبار در غرب کشور است شدت سامانه گردوغبارزاست. زیرا در بسیاری از رخدادها، با توجه به فرونشینی توده گردوغبار در مسیر انتقال به غرب ایران، حجم توده رسیده به دامنه‌های زاگرس کمتر از $200 \mu\text{m}/\text{kg}$ بوده و در مقایسه با حجم توده گردوغبار در نواحی منشأ، که بیش از $\mu\text{m}/\text{kg}$ است، میزان ناچیزی است. بنابراین، این میزان گردوغبار نیز در برخورد با توده کوهستانی (در شرایط بدون کوهستان نیز با اندکی پیشروی) فرونشسته و پیشروی زیادی در داخل کشور ندارد. ذکر این نکته لازم است که، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، سامانه‌هایی که در دوره سرد سال به شکل‌گیری گردوغبار منجر می‌شوند عمدتاً سامانه‌های بارش‌زا هستند؛ این سامانه‌ها، به‌رغم عدم بارش در نواحی منشأ، در غرب ایران به بارش منجر می‌شوند. بنابراین، عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش ارتفاع ستون گردوغبار در غرب ایران و عدم انتقال آن به نواحی داخلی ایران شود وجود بارش در این نواحی است.



شکل ۱۶. نمایه قائم مؤلفه باد قائم $\times 100$ در شرایط وجود کوهستان (الف) و بدون کوهستان (ب)

بحث و نتیجه گیری

الگوهای همدید رخداد گردوغبار در منطقه خاورمیانه و غرب ایران در دوره سرد سال به دو الگوی جبهه‌ای و غیرجبهه‌ای تقسیم می‌شود. حمیدی و همکاران (۲۰۱۳) الگوی جبهه‌ای را تنها الگوی مؤثر در شکل‌گیری گردوغبار در دوره سرد سال معرفی کرده‌اند. خسروی و همکاران (۱۳۸۹) و خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) به طور کوتاه به موقعیت جبهه سرد و نقش آن در شکل‌گیری گردوغبار در منطقه خاورمیانه و غرب ایران اشاره کرده‌اند. در الگوی جبهه‌ای، شکل‌گیری گردوغبار تحت تأثیر حرکات چرخندی و واگرایی در تراز میانی و همچنین جبهه‌زایی، افزایش سرعت باد، و عدم تغذیه رطوبتی در تراز زیرین ایجاد می‌شود. عزیزی و همکاران (۱۳۹۱) الگوهای شکل‌گیری گردوغبار در دوره سرد را همان الگوهای بارش‌زا معرفی کرده‌اند، ولی به وجه تمایز آن اشاره‌ای نکرده‌اند. موقعیت قرارگیری سامانه گردشی در تراز میانی و عامل رطوبت وجه تمایز سامانه‌های گردوغبارزا و بارش‌زا در منطقه است. بابایی فینی و همکاران (۱۳۹۵) نیز اشاره کرده‌اند که کاهش بارش در دوره سرد با افزایش رخداد گردوغبار در همین دوره از سال مرتبط است.

در این مطالعه مشخص شد که توزیع قائم گردوغبار در الگوی جبهه‌ای به الگوی گردش جو در تراز میانی وابسته است که بر اساس نحوه آرایش پربندها به دو الگوی ناوه غربی و بندالی تقسیم می‌شود. در این الگو ارتفاع گردوغبار متأثر از شدت گردش چرخندی در تراز میانی و حرکات صعودی در بخش‌های زیرین تا میانی تروپوسفر است.

الگوی ناوه غربی: در این الگو توزیع قائم گردوغبار دارای دو الگوی متفاوت است؛ به طوری که در برخی

رخدادها ارتفاع گردوغبار به ۶٫۵ کیلومتر (الگوی اول) و در برخی دیگر به ۳٫۵ کیلومتر (الگوی دوم) می‌رسد. در الگوی توزیع قائم اول، انتقال گردوغبار به بخش‌های میانی و بعضاً فوقانی تروپوسفر، متأثر از واگرایی شدید در تراز میانی، استقرار هسته جت در مناطق منشأ گردوغبار، سرعت بالای باد در تراز میانی در این نواحی، صعود شدید هوا در بخش‌های زیرین و میانی جو، و سرعت بالای باد در ترازهای زیرین است؛ به طوری که متوسط سرعت باد سطحی در منطقه حدود ۱۰ متر بر ثانیه است. چنین شرایطی به برداشت حجم زیادی از رسوبات سطحی از مناطق منشأ و انتقال آن به بخش‌های بالاتر تروپوسفر منجر می‌شود. متوسط تاوایی نسبی در این الگو در تراز میانی بیش از الگوی توزیع قائم دوم است که نشان می‌دهد شدت واگرایی در تراز میانی مستقیماً ناپایداری‌های تراز زیرین و سرعت قائم بالاسو را در

بخش‌های زیرین و میانی تروپوسفر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در الگوی توزیع قائم دوم، بیشینه تراکم توده گردوغبار و ارتفاع آن در مناطق منشأ کمتر از $1000 \mu\text{m}/\text{kg}$ و ۴ کیلومتر است که این ارتفاع در غرب ایران به ۲/۵ کیلومتر می‌رسد. در این الگو محدودبودن ارتفاع گردوغبار نسبت به الگوی توزیع قائم اول وابسته به شدت کمتر واگرایی در تراز میانی و موقعیت و شدت جت تراز میانی و سرعت کمتر باد در تراز زیرین است که این شرایط به برداشت حجم محدودتری از رسوبات سطحی در مناطق منشأ گردوغبار منجر می‌شود. در چنین رخدادهایی، واگرایی و چرخندگی در تراز میانی ضعیف‌تر از الگوی اول است و همچنین موقعیت جت عمدتاً بر فراز مناطق منشأ گردوغبار نیست که به تشدید صعود در بخش زیرین تا میانی و همچنین افزایش سرعت باد در بخش میانی تروپوسفر منجر شود. بنابراین، در الگوی توزیع قائم دوم، تراکم توده گردوغبار در منطقه کمتر از الگوی اول است و شدت ناپایداری‌ها و صعود در منطقه نیز کمتر است، بنابراین، ارتفاع ستون گردوغبار در این الگو محدودتر از الگوی اول است.

الگوی بندالی: این الگو نیز یک الگوی جبهه‌ای است که به علت موقعیت سامانه بندال و وضعیت رطوبت در منطقه، در مناطق منشأ گردوغبار ناپایداری‌های حاصل از استقرار آن، به افزایش سرعت باد سطحی و شکل‌گیری گردوغبار در منطقه منجر می‌شود که، با توجه به واگرایی در تراز میانی و حرکات صعودی در ترازهای زیرین تا میانی، ارتفاع گردوغبار در مناطق منشأ گردوغبار به ۶ کیلومتر می‌رسد. در این الگو نیز ارتفاع گردوغبار به سرعت قائم بالاسو در مناطق منشأ، سرعت باد در تراز زیرین، و همچنین مناطق تحت تأثیر گردوغبار وابسته است.

غیر جبهه‌ای: در این الگو، پهنه‌های وسیعی از نواحی غربی ایران تا نواحی مرکزی عربستان تحت تأثیر استقرار یک پشته قرار می‌گیرد و سامانه‌های گردشی در تراز زیرین تروپوسفر در شکل‌گیری گردوغبار مؤثر است. ارتفاع گردوغبار در این الگو حدود ۳/۵ کیلومتر است و بیشینه حجم توده گردوغبار برداشت‌شده کمتر از $800 \mu\text{m}/\text{kg}$ است. در این الگو، به علت محدودبودن ناپایداری‌ها و حرکات صعودی در تراز زیرین در مناطق منشأ و فرونشینی در تراز میانی، از یک سو، تراکم گردوغبار در منطقه کم و از سوی دیگر ارتفاع آن نیز کمتر از دیگر الگوهای گردشی مؤثر در شکل‌گیری گردوغبار در دوره سرد سال است. عبدی ویشگاهی و همکاران (۲۰۱۱) بیشینه نقل و انتقال گردوغبار در راستای قائم جو را تا سطح ۷۰۰ هکتوپاسکالی و پراکاش و همکاران (۲۰۱۵) توزیع قائم گردوغبار در نواحی مرکزی شبه‌جزیره عربستان را تا ارتفاع ۴ کیلومتری تعیین کرده‌اند. نتیجه این مطالعه نشان داد که ارتفاع گردوغبار در غرب ایران و نواحی منشأ وابسته به ماهیت الگوهای گردشی، شدت گردش چرخندی در تراز میانی، موقعیت جت قطبی، و سرعت باد در تراز زیرین است که می‌تواند بین ۳ تا ۷ کیلومتر متغیر باشد. کاوالیری و همکاران (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که توزیع قائم گردوغبار در منطقه ساحل به شدت جریان‌های همرفتی و صعود در این منطقه وابسته است و بیشینه آن به ۶ کیلومتر می‌رسد. تکچیرا و همکاران (۲۰۱۶) بیشینه ارتفاع گردوغبار در توفان‌های گردوغبار بیابان صحرا را ۱۰ کیلومتر معرفی کرده‌اند که ارتفاع گردوغبار وابسته به شدت باد سطحی، تراکم توده گردوغبار، و سرعت قائم جو می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ کیلومتر متغیر باشد.

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل در محدودشدن ارتفاع توده گردوغبار در غرب ایران ماهیت سامانه‌های جوئی است و مانع کوهستانی زاگرس در انتشار قائم و افقی گردوغبار اهمیت کمتری دارد. با حذف مانع

کوهستانی زاگرس، توده گردوغبار پیشروی بیشتری در داخل مرزهای کشور خواهد داشت، ولی ارتفاع گردوغبار موجود در منطقه تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت، زیرا در بسیاری از رخدادهای ارتفاع و تراکم گردوغبار پیش از انتقال به دامنه‌های رو به باد زاگرس به طور قابل توجهی کاهش یافته و این کاهش متأثر از ماهیت توده‌های هوا و وضعیت گردش جو در منطقه است. بنابراین، آنچه بیش از مانع کوهستانی تعیین‌کننده ارتفاع و میزان پیشروی گردوغبار در غرب ایران است، شدت سامانه گردوغبارزاست که این شدت وابسته به نوع الگوی گردشی تراز میانی، موقعیت جت، شدت واگرایی تراز میانی، سرعت باد در تراز زیرین، و وضعیت صعود در منطقه است.

منابع

- بابایی فینی، ا.؛ صفرزاد، ط. و کریمی، م. (۱۳۹۵). تحلیل و شناسایی الگوهای همدیدی طوفان‌های گردوغبار غرب ایران، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۷: ۱۰۵-۱۲۰.
- باعقیده، م. و احمدی، ح. (۱۳۹۳). تحلیل مخاطره گردوغبار و روند تغییرات آن در غرب و جنوب غرب ایران، *فصلنامه ملاد و نجات*، ۳۲: ۴۳-۶۰.
- خسروی، م. (۱۳۸۹). بررسی توزیع عمودی گردوغبار ناشی از طوفان در خاورمیانه با استفاده از مدل NAAPS، مورد سیستان ایران، *مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافی دانان جهان اسلام*.
- خوش‌اخلاق، ف.؛ نجفی، م.س. و صمدی، م. (۱۳۹۱). واکاوی همدید رخداد گردوغبار بهاره در غرب ایران، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۸۰: ۹۹-۱۲۴.
- رنجبر سعادت‌آبادی، ع. و عزیززی، ق. (۱۳۹۱). مطالعه الگوهای هواشناسی، شناسایی چشمه‌های تولید گردوغبار و مسیر حرکت ذرات معلق برای توفان جولای ۲۰۰۹، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴ (۳): ۷۳-۹۲.
- عزیزی، ق.؛ شمسی‌پور، ع.؛ میری، م. و صفرزاد، ط. (۱۳۹۱). تحلیل آماری - همدیدی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران، *محیط‌شناسی*، ۶۳: ۷۳-۸۴.
- عساکره، ح.؛ مسعودیان، س.ا. و شادمان، ح. (۱۳۹۲). تحلیل همدید پویشی فراگیرترین روز گرم ایران طی سال ۱۳۴۰ تا سال ۱۳۸۶، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۷: ۳۵-۵۲.
- کریمی احمدآباد، م. و شکوهی رازی، ک. (۱۳۹۱). اندرکنش گردش جو و پوشش سطح زمین در سازوکار تشکیل و گسترش طوفان‌های گردوغبار تابستانه خاورمیانه، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۷۸: ۱۱۳-۱۳۰.
- کریمی، م. (۱۳۸۶). تحلیل منابع رطوبت بارش‌های ایران، رساله دوره دکتری، به راهنمایی دکتر منوچهر فرج‌زاده، دانشگاه تربیت مدرس.
- مفیدی، ع. و جعفری، س. (۱۳۹۱). بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع طوفان‌های گردوغباری تابستانه در جنوب غرب ایران، *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵: ۱۷-۴۵.
- Abdi Vishkaee, F.; Flamant, J.; Cuesta, F.C.; lamant, P. and Khaledifard, H.R. (2011). Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime, *J. Geophys. Res.*, 116, D05206, doi:10.1029/2010JD014573.
- Alizadeh Choobari, O.; Zawar-Reza, P. and Sturman, A. (2014a). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review, *Atmospheric Research*, 138: 152-165.
- Alizadeh Choobari, O.; Zawar-Reza, P. and Sturman, A. (2014b). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin, *Atmospheric Research*, 143: 328-341.
- Alizadeh-Choobari, O.; Ghafarian. P. and Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations, *Int J Climatol*, 36(4):2050-2062.
- Asakereh, H.; Masoodian, S.A. and Shadman, A. (2013). Synoptic and dynamic analysis of most pervasive hot day in Iran during 1964-2009, *Geog. and Environ. Haz.*, 7: 35-52.
- Azizi, G.; Shamsipour, A.A.; Miri, M. and Safarrad, T. (2012a). Statistic and Synoptic Analysis of Dust Phenomena in West of Iran, *Journal of environmental studies*, 38(3):123-134.
- Azizi, G.; Shamsipour, A.A.; Miri, M. and Safarrad, T. (2012b). Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran, *Natural Hazards*, 64(2): 1625-1638.
- Baaghdeh, M. and Ahmadi, H. (2014). The analysis of dust storm hazard occurrence and its variations trend in west & southwest of Iran, *Scientific Journal of Rescue & Relief*, 6(22): 43-60.
- Babae Fini, O.; Safarrad, T. and Karimi, M. (2016). Analysis and Identification of Synoptic Patterns of Dust Storms in the West of Iran, *Geography and Environmental Hazards*, 17: 105-120.
- Cavaliere, O.; Cairo, F.; Fierli, F.; Di Donfrancesco, G.; Snels, M.; Viterbini, M.; Cardillo, F.; Chatenet, B. Formenti,

- P.; Marticorena, B. and Rajot, J.L. (2010). Variability of aerosol vertical distribution in the Sahel, *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 12005-12023.
- Chen, F. and Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation, *Mon. Weather Rev.*, 129: 569-585.
- Engelstaedter, S.; Tegen, I.; and Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport, *Earth-Sci. Rev.*, 79: 73-100.
- Ginoux, P.; Chin, M.; Tegen, I.; Prospero, J.; Holben, B.; Dubovik, O. and Lin, S.J. (2001). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model: *J. Geophys. Res.*, 106: 20255-20273.
- Grell, G.A.; Peckham, S.E.; Schmitz, R.; McKeen, S.A.; Frost, G.; Skamarock, W.C. and Eder, B. (2005). Fully coupled online chemistry within the WRF model, *Atmos. Environ.*, 39: 6957-6975.
- Grell, G. A. and Devenyi, D. (2002), A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (14): 381-384.
- Hamidi, M.; Kavianpour, M.R. and Shao, Y. (2013). Synoptic Analysis of Dust Storms in the Middle East, *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 49(3): 279-286.
- Hojati, S.; Khademi, H.; Faz Cano, A. and Landi, A. (2011). Characteristics of dust deposited along a transect between central Iran and the Zagros Mountains, *Catena J.*, 88:27-36.
- Hong, S.Y. (2010). A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136(651): 1481-1496.
- Huang, J.P.; Fu, Q.; Su, J.; Tang, Q.; Minnis, P.; Hu, Y.; Yi, Y. and Zhao, Q. (2009). Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints, *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 4011-4021.
- Huang, X.; Wang, T.; Jiang, F.; Liao, J.; Cai, Y.; Yin, Ch.; Zhu, J. and Han, Y. (2013). Studies on a Severe Dust Storm in East Asia and Its Impact on the Air Quality of Nanjing, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 13: 179-193.
- Janjic, Z.I. (2001). Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note*, 437, available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov>.
- Karimi AhmadAbad, M. (2008). Analysis of the moisture supply sources for Iran's precipitation. PhD, Thesis. Tarbiat Modarres University, School of Humanities.
- Karimi AhmadAbad, M. and Shakouhi Razi, K. (2012). Interaction between Atmospheric Circulation and Land Cover in the Mechanism of Creation of Summertime Dust Storms in Middle East (Case Study, July 2009), *Physical Geography Research Quarterly*, 78: 113-130.
- Khoshakhlagh, F.; Najafi, M.S. and Samadi, M. (2012). An Analysis on Synoptic Patterns of Springtime Dust Occurrence in West of Iran, *Physical Geography*, 2(80): 99-124.
- Khosravi, M. (2010). A Survey on the Vertical Distribution of Dust and Particle to Arise from Storms in Middle East Case study: Sistan, Iran, *The Forth International congress of the Islamic world Geographers*, Zahedan, Iran.
- Li, Z.; Niu, F.; Fan, J.; Liu, Y.; Rosenfeld, D. and Ding, Y. (2011). Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation, *Nat. Geosci.*, 4: 888-894.
- Lin, Y.L.; Farley, R.D. and Orville, H.D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22: 1065-1092.
- Martin E. J., (2006). *Mid-Latitude Atmospheric Dynamics: A First Course*. Wiley. PP. 336.
- Miri, A.; Ahmadi, H.; Ekhtesasi, M.; Panjehkeh, N. and Ghanbarie, A. (2010). Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan Region, *J. of Environ. Studies*, 66(3): 343-355.
- Mofidi, A. and Jafari, S. (2011). The Role of Regional Atmospheric Circulation over the Middle East on the Occurrence of Summer Dust-storms in Southwest Iran, *Arid regions Geographic Studies*, 2(5):17-45.
- Najafi, M.S.; Khoshakhlagh, F.; Zamanzadeh, S.M.; Shirazi, M.H.; Samadi, M. and Hajikhani, S. (2014). Characteristics of TSP loads during the Middle East Springtime Dust Storm (MESDS) in Western Iran, *Arab J Geosci.*, 7(12): 5367-5381.

- Prakash Jish, P.; Stenchikov, G.; Kalenderski, S.; Osipov, S. and Bangalath, H. (2015). The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea, *Atmos. Chem. Phys.*, 15: 199-222.
- Samadi, M.; Darvishi, A.; Mohammadi, H.; Alavi Panah, S.K. and Najafi, M.S. (2014). Global dust Detection Index (GDDI); a new remotely sensed methodology for dust storms detection, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12: 20.
- Shao, Y.; Wyrwoll, K.H.; Chappell, A.; Huang, J.; Lin, Z.; Mctainsh, G.H.; Mikami, M.; Tanaka, T.Y.; Wang, X. and Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science, *Aeolian Res.*, 2: 181-204.
- Soares, W.R. and Marengo, J.A. (2008). Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario, *Int. J. Climatol*, DOI: 10.1002/joc.1800.
- Teixeira, J.C.; Carvalho, A.C.; Tuccella, P.; Curci, G. and Rocha, A. (2016). WRF-chem sensitivity to vertical resolution during a saharan dust event, *Physics and Chem. of the Earth*, 94: 188-195.
- Wild, O.; Zhu, X. and Prather, M.J. (2000). Fast-J: accurate simulation of in- and below cloud photolysis in tropospheric chemical models, *J. Atmos. Chem.*, 37: 245-282.
- Zarasvandi, A.; Carranza, E.J.M.; Moore, F. and Rastmanesh, F. (2011). Spatio-temporal occurrences and mineralogical-geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran), *Journal of Geochemical Exploration*, 111: 138-151.
- Zhang, J. and Li, X.M. (2012). Vertical distribution of sand-dust aerosols and the relationships with atmospheric environment, *Journal of Arid Land*, 4(4): 357-368.