

تحلیل آماری، همدیدی طوفان‌های گردو خاک در جنوب شرق ایران (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی سیستان)

دکتر بهلول علیجانی، استاد اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم تهران
کوهزاد رئیس پور*، دانشجوی دکترای اقلیم شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

طوفان‌های گردو خاک از بزرگ‌ترین مشکلات جدی محیطی در نواحی مشخصی از جهان هستند. در پژوهش حاضر که به منظور تحلیل آماری همدیدی طوفان‌های گردو خاک منطقه سیستان براساس کدهای هواشناسی، طی دوره‌ی (۱۹۷۹-۲۰۰۸) انجام پذیرفته، از آمار ساعتی سرعت و جهت باد ایستگاه همدید زابل و نقشه‌های جوی فشار، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، الگوی هم جریان و خطوط هم سرعت و جهت باد در دو تراز سطح دریا و ۸۵۰ هکتوپاسکال که به صورت میانگین روزانه تهیه شده‌اند، استفاده شده است. براساس نتایج، هیچ یک از سال‌های آماری فاقد طوفان گردو خاک نبوده‌اند. در میان فصول، تابستان طوفان خیزترین و زمستان کم‌طوفان‌ترین فصل منطقه بوده و در میان ماه‌ها، ژوئن از بیش‌ترین و دسامبر از کم‌ترین فراوانی برخوردار بوده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل همدیدی نشان داد: هنگام بروز طوفان گردو خاک در دوره‌ی گرم سال، بر روی نقشه‌ی فشار تراز دریا، با تقویت کم فشار موسمی هند، دو مرکز کم فشار فرعی تری در محدوده‌ی جنوب پاکستان و جنوب افغانستان با فشار مرکزی کم‌تر از ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بسته می‌شوند. در مقابل مرکز پرفشاری بر روی دریای خزر که عموماً فشار مرکزی آن بیش از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال است مستقر می‌شود. در همین زمان تفاوت دمای سطح زمین منطقه‌ی سیستان و دریای خزر حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شیوفشاری و دمایی شدید بین دو منطقه، منجر به ایجاد بادهای شدید و طوفان گردو خاک می‌گردد. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز یک مرکز چرخندی بر جنوب ایالت بلوچستان بسته شده و منطقه‌ی سیستان توسط منحنی ۱۴۴۰ ژئوپتانسیل متر محدود شده است. در مقابل واچرخندی با منحنی ۱۵۴۰ ژئوپتانسیل متر بر روی دریای خزر بسته می‌شود که بیانگر همراهی جریانات این تراز از جریانات سطح زمین می‌باشد. در دوره‌ی سرد نیز، هنگامی که پرفشار سبیری با فشار مرکزی بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر مستقر شود و منطقه سیستان به دلیل عدم حضور زبانه‌های پرفشار مذکور، از شرایط کم فشاری نسبت به پرفشار مذکور برخوردار باشد و در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز مرکز واچرخندی بر روی دریای خزر بسته شود. ریزش هوای سرد از پرفشار مذکور به منطقه، طوفان گردو خاک ایجاد می‌نماید. براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای، مهم‌ترین منابع گردو خاک، بسترهای خشکیده‌ی هامون‌های پوزک، صابری و شرق هامون هیرمند هستند.

واژگان کلیدی

تحلیل آماری همدیدی، طوفان گردو خاک، کدهای هواشناسی، جنوب شرق، سیستان.

۱- مقدمه

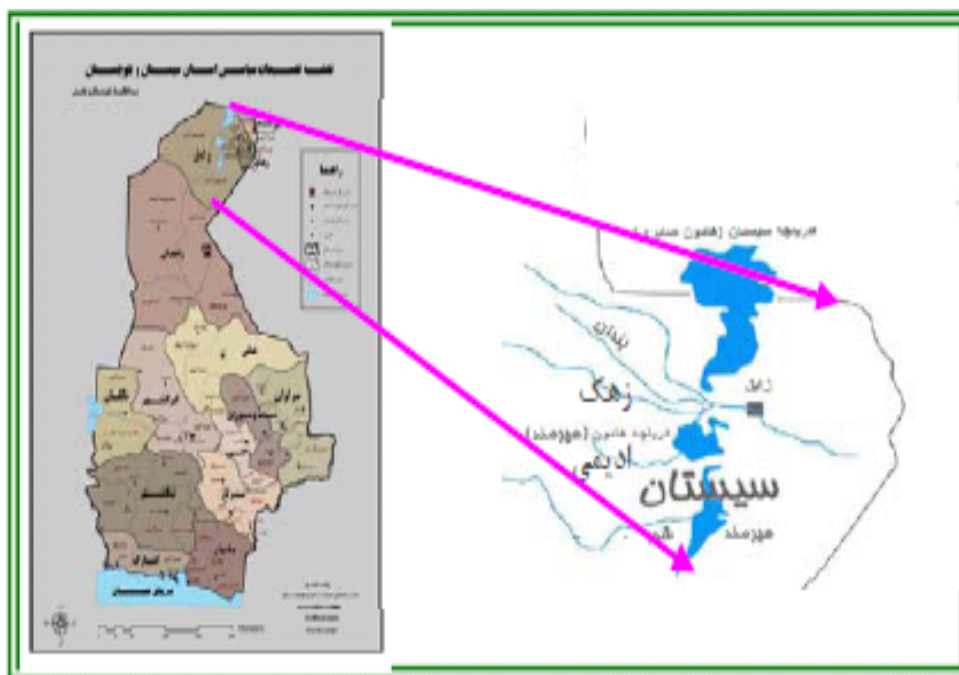
طوفان گردو خاک به پدیده‌ای اطلاق می‌گردد که در نتیجه بادهای آشفته ایجاد شده و با بالا بردن مقادیر زیادی گردو خاک به داخل هوا، دید افقی را تا کم‌تر از ۱۰۰۰ متر کاهش می‌دهد (Natsagdaei, 2002: 12). این طوفان‌ها در ردیف بزرگ‌ترین مشکلات جدی محیطی در نواحی مشخصی از جهان هستند و رخداد آن‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک از فراونی بالاتری برخوردارند (Arimoto, 2000: 30). مناطق منشأ دارای خاک‌های غنی از رس و سلیت بوده که در عراق و ایران مسئول ایجاد بخش زیادی از طوفان‌های گردو خاکی می‌باشند. در این مناطق خاک‌های ریزدانه معمولاً در بستر دریاچه‌های خشک و رسوبات سیلاب دشت‌ها یافت می‌شوند (Squires, 2002: 160). این پدیده متأثر از شرایط جوی خاصی است که همه‌ساله خسارات جبران‌ناپذیری را به مزارع، تأسیسات، جاده‌ها، ترافیک و حمل‌ونقل وارد نموده و با آلودگی هوا باعث بروز مشکلات تنفسی و... می‌گردد (لشکری، ۱۳۸۷: ۳). از مهم‌ترین شرایط ایجاد گردو خاک در کنار هوای ناپایدار، عدم وجود رطوبت است به طوری که اگر هوای ناپایدار فاقد رطوبت باشد طوفان گردو خاک ایجاد می‌کند (علیجانی، ۱۳۷۶: ۹۶). از دیدگاه هواشناسی سینوپتیکی، طوفان یک پدیده‌ی مخرب منحصر به فرد بوده که در مقیاس‌های ترنادو، طوفان رعدوبرق، طوفان گردو خاک و مانند آن ظاهر می‌شود (حسینی، ۱۳۷۹: ۱۲). مطالعاتی که در ارتباط با فراوانی روزهای گردو خاکی ایران انجام گرفته، نشان می‌دهد که چاله‌های مرکزی بیش‌ترین تعداد روزهای گردو خاکی را دارند، به طوری که در مناطق وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فراوانی وقوع روزهای مذکور به بیش از ۱۵۰ روز در سال می‌رسد. در مناطق جنوب غربی و غرب کشور که در مجاورت بیابان‌های بزرگی همچون عراق، عربستان، سوریه و... می‌باشند، میانگین روزهای گردو خاکی نیز قابل توجه است که فراوانی وقوع آن در تیر و خرداد بیش از ماه‌های دیگر است (رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۵۷). طوفان‌های ماسه و گردو خاک نه تنها در ایران، بلکه در سایر کشورهای آسیایی، آفریقایی و آمریکایی موجب بروز خسارت‌های مالی و جانی فراوانی می‌شوند (Lin, 2002: 16). بیش‌تر طوفان‌های خاک در آسیای مرکزی و قزاقستان در دوره‌ی گرم‌سال روی می‌دهد (Romanof, 2001: 24). در فلسطین اشغالی با استفاده از تحلیل همدیدی و طبقه‌بندی موقعیت هوای غالب در طول الگوهای وزش گردو خاک، اختلاف معناداری بین مسیرهای فصلی الگوها مشاهده گردید (Dayan, 1986: 537). گردو خاک‌های قاره استرالیا نیز با فرودهای سطح بالا و جبهه‌های سرد سیکلون زمینی همراه بوده و در صورت وجود شرایط مذکور، گردو خاک‌ها توانسته‌اند تا هزاران کیلومتر فراتر از این قاره در نیمکره‌ی جنوبی پخش شوند (Hamish, 2001: 28). در ایجاد طوفان‌های غبار دوره گرم سال خاورمیانه، کم‌فشارهای سطح زمین بسیار موثر می‌باشد (Goudie & Midelton, 2002: 56). گرمایش زمین در بیابان مغولستان و سرمایش زمین در شمال کشور چین، عامل موثر در تشکیل گردو خاک بخش شمالی این کشور به خصوص در حوضه تاریم می‌باشد (Weihong & Shaoyinshi, 2001: 15). براساس مشاهدات ماهواره‌ای، سالانه حدود ۲۰ میلیون تن غبار از گودال بادیلی، نقطه‌ای واقع در صحرای آفریقا، به حوزه رود آمازون جابه‌جا شده و مواد معدنی مورد نیاز جنگل‌های آمازون را تأمین می‌نماید (Koren, 2006: 1). گسترش غبار صحرای صحارا بر روی اقیانوس اطلس، سطحی به وسعت ۴ میلیون کیلومتر مربع از این اقیانوس را می‌پوشاند که شامل ۱۰ مگاتن بوده و جرم ذراتی که قطر آن‌ها بیش‌تر از $4 \times 6 \text{ um}$ است در دو تراز فشاری ۷۸۰ و ۹۰۰ هکتوپاسکال به ترتیب ۱۶۰۰ میکروگرم بر متر مکعب و ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب تخمین زده شد (Karlson, 2002: 17). با مطالعه‌ی روابط بین شکل‌گیری طوفان‌های

گردوخاک و تحول سینوپتیک آن‌ها در شمال شرق آسیا ثابت شده است که یک طوفان گردوخاک زمانی توسعه می‌یابد که یک سیستم به سمت ناحیه‌ای بیابانی حرکت نماید (Wang, 2005: 13). در طبقه‌بندی گردش‌های جوّی براساس طوفان‌های گردوخاک آریزونا، چهار تیپ هوای غالب شناسایی گردید (Yarnal, 1993: 52-53). در تحلیل وضعیت همدیدی موثر در انتقال گردوخاک شمال آفریقا از روی دریای مدیترانه به جنوب و مرکز اروپا، ناوه‌ی منشأ گرفته از کم فشار ایسلند و پرفشار نیمه استوایی، دو عامل عمده‌ی انتقال غبار آفریقا به اروپا و به خصوص ایتالیا می‌باشند (H.Kutiel & P.Alpert, 2005: 13). براساس تحلیل سینوپتیکی امواج گردوخاک در غرب ایران، پرفشار آזור همراه با سیستم‌های مهاجر بادهای غربی مهم‌ترین عوامل سینوپتیک تأثیرگذار بر سیستم‌های گردوخاک منطقه به شمار رفته و فرودها و سیکلون‌های مهاجر زمانی به منطقه نفوذ می‌کنند که پرفشار جنب‌حاره‌ای آזור حضور نداشته و یا ضعیف شده باشد (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۸۴: ۲۷). در دوره‌ی سرد سال، فرودهای حاصل از بادهای غربی و در دوره‌ی گرم سال، سیستم‌های فشار سطح‌زمین و به خصوص کم‌فشار خلیج فارس مهم‌ترین عامل ایجاد گردوخاک در جنوب غرب ایران می‌باشند (رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۸). همتی (۱۳۷۴) با استفاده از اطلاعات آماری ۱۶ ایستگاه سینوپتیک طی سال‌های (۱۹۹۰ - ۱۹۸۱) در جنوب‌غرب کشور، علت طوفان‌های گردوخاک شدید این نواحی را حضور سیستم‌های چرخندی منشأ گرفته از نواحی شمالی عراق و مرکز عربستان می‌داند. حیدری (۱۳۸۶) با استفاده از تحلیل همدیدی، سیکلون‌های بسته روی عراق و شمال عربستان را عامل اصلی ایجاد گردوخاک در استان کرمانشاه بیان می‌کند. مطالعه‌ی طوفان‌های گردوخاک فراگیر ایران مرکزی نشان می‌دهد که در سطح ۵۰۰ میلی‌بار شرایط مساعدی از جهت شکل‌گیری و گسترش ناپایداری‌های سطحی زمین مهیا شده و همین امر منجر به طوفان گردوخاک می‌شود (دهقانپور، ۱۳۸۴: ۱۸۵). خسروی و سلیقه (۱۳۸۴) علت شکل‌گیری طوفان‌های سریع با سرعت حدود ۸۰ نات در ثانیه در منطقه‌ی سیستان را، مجاورت منطقه‌ی چرخندگی مثبت بادهای غربی با زبانه‌ی کم‌فشار فرعی موسمی بیان نمودند. حسین‌زاده (۱۳۷۶) عامل اصلی به وجود آورنده‌ی بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان را یک مرکز کم‌فشار نسبتاً قوی در جنوب شرق ایران و هم‌چنین دو مرکز فشار زیاد یکی بر روی دریای خزر و دیگری در ارتفاعات شمال شرقی خارج از کشور می‌داند که در این میان نقش فرابار روی دریای خزر از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌باشد. برخلاف مطالعات پیشین که بادهای ۱۲۰ روزه را بیش‌تر پدیده‌ای مربوط به سطح زمین تلقی نموده‌اند، این بادهای تا سطوح بالای اتمسفر را با ذرات میکرونی غبار آلوده نموده و در موارد استثنایی تمرکز گردوغبار حتی تا ارتفاع ۲۰۰ هکتوپاسکالی مشاهده گردید (خسروی، ۱۳۸۹: ۱۴۷). پس از وقوع خشک‌سالی در منطقه سیستان، تعداد و شدت طوفان‌های گردوخاک افزایش یافته و تعداد روزهای توأم با طوفان گردوخاک از ۳۳ روز در سال ۱۳۷۸ به ۷۴ روز در سال ۱۳۸۰ افزایش یافته است (راشکی و همکاران، ۱۳۸۶: ۷۵).

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در جنوب شرقی ایران، شمال استان سیستان و بلوچستان و در جنوب غربی مرز مشترک ایران و افغانستان واقع شده و به دشت سیستان و چاله‌ی سیستان نیز معروف می‌باشد (نگارش، ۱۳۸۶: ۲۷). این حوضه با وسعت حدود ۱۰۶ هزار کیلومتر مربع ۶/۵ درصد از وسعت کشور را به خود اختصاص می‌دهد (صداقت، ۱۳۸۹: ۳۲). بر اساس آمار ۳۰ ساله‌ی هواشناسی زابل (۱۹۸۰-۲۰۰۹)، در این منطقه، به طور متوسط سالیانه بیش از ۳۰۰ روز خشکی وجود دارد. اقلیم آن به روش‌های گوسن و

سلیانیونوف، بیابانی و به روش کوپن، خشک بسیار گرم با تابستان خشک و به روش تحلیل خوشه‌ای بسیار کم بارش، گرم و خشک می‌باشد (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۶: ۱۴۶). از خصوصیات مهم اقلیمی این منطقه می‌توان به وزش بادهای ۱۲۰ روزه، تعداد روزهای آفتابی سالیانه بیش از ۲۶۰ روز، تابش زیاد آفتاب، دامنه‌ی زیاد تغییرات دما در شبانه‌روز، بارندگی متوسط سالیانه ناچیز (۶۴ میلی‌متر) با پراکندگی نامناسب، بالا بودن دما و تعداد ساعات آفتابی زیاد نام برد (سلیقه، ۱۳۸۲: ۴۲). مجموعه‌ی این عوامل باعث شده تا این منطقه بیش‌ترین مقدار تبخیر بالقوه سالانه کشور (۵۰۰۰-۴۰۰۰ میلی‌متر در سال) را داشته‌باشد (راشکی و همکاران، ۱۳۸۶: ۷۵). به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی دشت سیستان و نحوه توزیع الگوهای فشار در اطراف آن، وزش باد به عنوان یکی از عناصر مهم اقلیمی منطقه در طول سال و به ویژه در ایام استقرار پدیده‌ی موسمی باد ۱۲۰ روزه در این ناحیه از کشور امری بدیهی است (حیدری‌نسب، ۱۳۸۶، ۴۵).



شکل (۱) موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در استان سیستان و بلوچستان

۳- روش‌شناسی تحقیق

جهت تحلیل آماری طوفان‌های گردو خاک، از داده‌های بادسنجی ۳ ساعته ایستگاه همدید زابل (۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه طول جغرافیایی، ۳۱ درجه و ۳ دقیقه عرض جغرافیایی و ۴۸۹ متر ارتفاع از سطح دریا)، طی دوره‌ی آماری ۳۰ ساله (۱۹۷۹-۲۰۰۸) استفاده گردید. دوره‌ی آماری مذکور، کامل و فاقد خلأ آماری بوده است. در داده‌های هواشناسی، زاویه باد بر حسب درجه مشخص گردیده، اما نوع جهت تعیین نشده است، از این رو، در ابتدا زاویه‌های باد به صورت جهت مشخص گردید. از طرفی واحد سرعت در داده‌های هواشناسی نات یا گره می‌باشد که سرعت باد از واحد نات، به متر بر ثانیه تبدیل گردید. پس از تنظیم جدول ماتریس داده‌ها، با استفاده از نرم افزار SPSS داده‌ها Sort گردید. برای انتخاب روزهای همراه با طوفان گردو خاک، سرعت مینا 15 m/s و دید افقی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی (wmo) در نظر گرفته شد. طوفان‌های گردو خاک بر اساس شدت و ضعف، با کدهای هواشناسی به خصوصی (کدهای ۳۰ تا ۳۵) در داده‌های هواشناسی گزارش می‌شوند (جدول ۱). بنابراین روزهای با مشخصات مذکور،

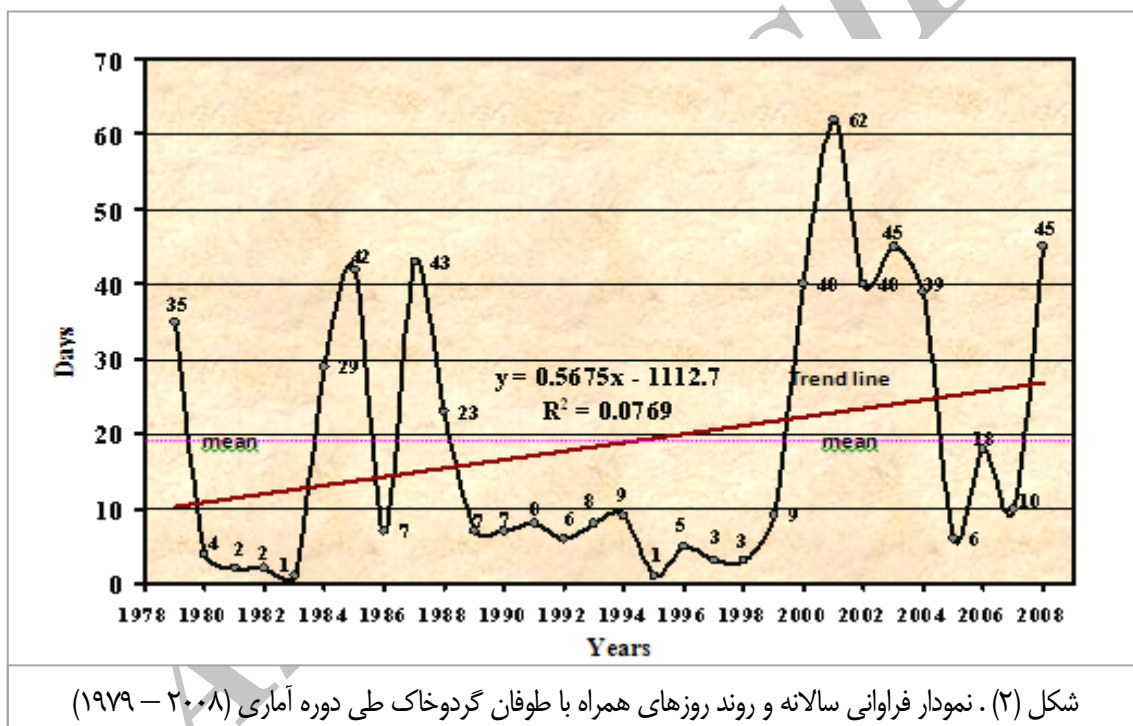
به عنوان روزهای توأم با طوفان گردوخاک (*Dust Storm*) محسوب گردیده و همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون دنباله‌ها (*RunTest*) حاصل شد. پس از انجام تحلیل‌های آماری، به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی، از نرم افزار *WRPLOT ver 5.2*، که برای انجام محاسبات آماری و رسم گلباد طراحی شده است، استفاده گردید. با استفاده از قابلیت نرم افزار مذکور و با در نظر گرفتن سرعت مینا 15 m/s برای طوفان گردوخاک، به ترسیم گلطوفان در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی اقدام گردید. با محاسبه‌ی سرعت مینای طوفان گردوخاک به جای سرعت پایه گلباد (حذف بادهای با سرعت کم‌تر از طوفان)، گلبادی حاصل می‌شود که گلطوفان نام دارد. در مطالعات همدید، هدف یافتن رابطه‌ی بین پدیده‌های طبیعی و الگوهای گردش جو است. بر این اساس در این پژوهش، از رویکرد محیطی به گردشی استفاده گردید. نقشه‌های مربوط به روزهای شروع و اوج طوفان، از داده‌های روزانه فراسنج‌های: فشار، دما، خطوط جریان، سرعت و جهت باد، در دو تراز زمین و 850 هکتوپاسکال از پایگاه داده‌های *NCEP/NCAR* وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس شناسی ایالات متحده استخراج و تحلیل گردید. این داده‌ها در تار نمای www.cdc.noaa.gov.com قابل دسترسی می‌باشد. دلیل انتخاب تراز 850 هکتوپاسکال به واسطه‌ی همراهی کردن جریانات این سطح با جریانات توده‌ی هوای سطح زمین است و در نقشه‌های سطوح بالاتر، پدیده‌ی خاصی که بتوان به وسیله‌ی آن‌ها رخداد طوفان‌های گردوخاک را توجیه نمود مشاهده نگردید. طوفان‌های گردوخاک بر اساس زمان وقوع به دو دوره‌ی سرد و گرم تفکیک شدند و جهت تحلیل همدیدی، شدیدترین طوفان گردوخاک به وقوع پیوسته طی هر دوره (یک مورد در دوره گرم و یک مورد در دوره سرد سال) انتخاب گردیدند. شدیدترین به این معنا که سامانه‌های انتخابی مذکور از بیش‌ترین سرعت باد و کم‌ترین دید افقی در میان تمام سامانه‌ها برخوردار بوده‌اند. جهت طراحی نقشه‌ها از نرم افزار *Grads* استفاده گردید. نقشه‌های مورد استفاده بر اساس شرایط جوی روزانه و از نظر پوشش مکانی از 15 درجه تا 50 درجه‌ی عرض شمالی و 45 درجه تا 90 درجه‌ی طول شرقی را در بر می‌گیرند. انتخاب این محدوده مکانی به این دلیل بوده که می‌تواند پدیده‌ی مذکور را در منطقه‌ی مطالعه، از زمان شروع تا خاتمه‌ی آن در برگیرد. برای مطالعه‌ی دقیق‌تر طوفان گردوخاک، تمامی نقشه‌های مورد استفاده در تحلیل همدیدی، در محیط *GIS* ژئورفرنس گردید و لایه‌ی مرزی استان سیستان و بلوچستان، افغانستان و پاکستان بر روی آن‌ها قرار گرفت. جهت شناسایی منشأ گردوخاک از تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده توسط سنجنده *MODIS* ماهواره معروف تراسا (*Terra*) ناسا استفاده گردید و مناطق برداشت غبار شناسایی شد.

جدول (۱) کدهای هواشناسی مورد استفاده جهت استخراج روزهای توأم با طوفان گردوخاک (منبع: علیجانی، ۱۳۸۱)

نوع پدیده	کد هواشناسی	توصیف
طوفان ماسه یا گرد و خاک سبک تا متوسط	۳۰	طوفان ماسه یا گردوخاک سبک تا متوسط طی ساعات گذشته تضعیف شده است.
	۳۱	طوفان ماسه یا گردوخاک سبک تا متوسط طی ساعات گذشته تغییری نکرده است.
	۳۲	طوفان ماسه یا گردوخاک سبک تا متوسط طی ساعات گذشته تشدید شده است.
طوفان ماسه یا گرد و خاک شدید	۳۳	طوفان ماسه یا گردوخاک شدید طی ساعات گذشته تضعیف شده است.
	۳۴	طوفان ماسه یا گردوخاک شدید طی ساعات گذشته تغییری نکرده است.
	۳۵	طوفان ماسه یا گردوخاک شدید طی ساعات گذشته تشدید شده است.

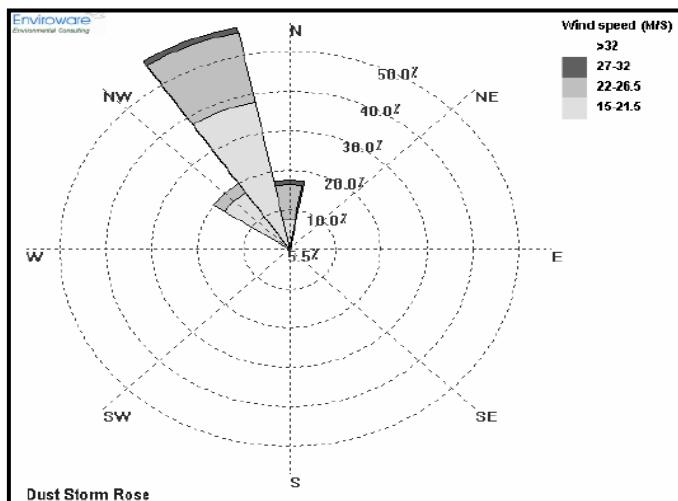
۴- بحث و تحلیل

الف) تحلیل آماری: در بررسی آماری، کل مشاهدات روزهای توأم با طوفان گردوخاک با سرعت مینا ($15 m/s$) و دید افقی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر، ۵۵۷ روز (شکل ۲) بوده است. در میان سال‌های آماری، سال ۲۰۰۱ با ۶۲ روز بیش‌ترین، و سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۹۵ با ۱ روز از کم‌ترین وقوع طوفان برخوردار می‌باشند. کاهش قابل توجه فراوانی طوفان‌ها طی سال‌های ۱۹۸۳-۱۹۸۰ و سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۸۸ به دلیل همزمانی با سال‌های ترسالی منطقه و هم‌چنین پرآبی دریاچه هامون می‌باشد که دریاچه هامون در سال‌های پرآبی به طرز چشم‌گیری از فراوانی طوفان‌های گردوغبار منطقه می‌کاهد. میانگین روزهای طوفانی طی دوره‌ی آماری مذکور ۱۸/۵۶ روز بوده است که اکثر سال‌ها از تعداد روزهای طوفانی کم‌تری نسبت به میانگین برخوردار بوده‌اند. بر اساس بررسی آمار ۳ ساعته باد در ایستگاه زابل، حداکثر سرعت باد ثبت شده در روزهای طوفانی طی دوره آماری مورد مطالعه ($32 m/s$) بوده است، که در میان روزهای ثبت شده، سرعت طوفان در روزهای ۱۸ و ۱۹ ژوئن ۱۹۸۳ و ۱۶ ژوئن ۱۹۸۴، به مقدار مذکور رسیده است.



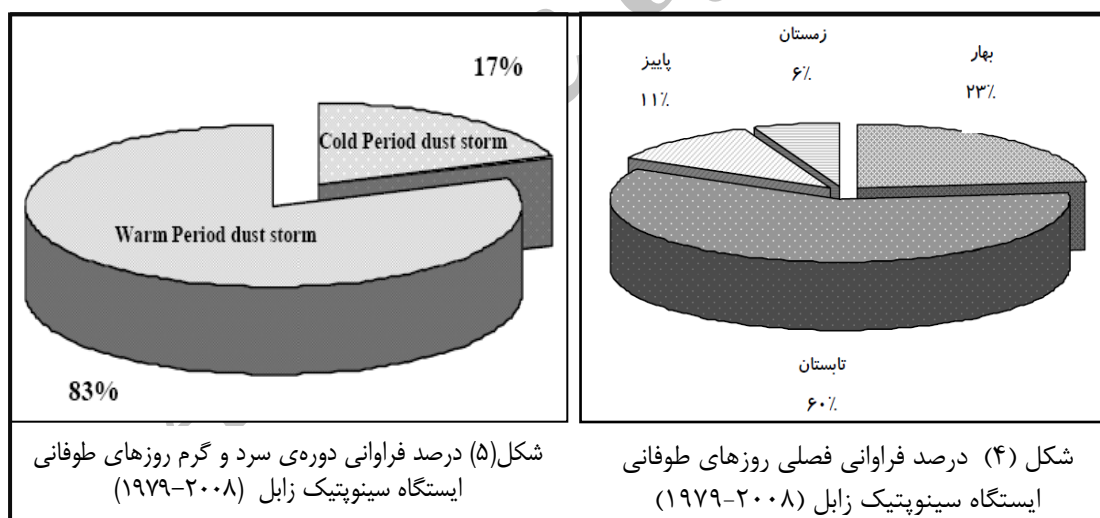
شکل (۲). نمودار فراوانی سالانه و روند روزهای همراه با طوفان گردوخاک طی دوره آماری (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

یک رژیم بسیار جالب روزانه هم در سری زمانی طوفان‌ها، در ایستگاه زابل مشاهده شده است، به این ترتیب که بیش از ۷۵ درصد از روزهای طوفانی در ساعت ۳ تا ۹ به وقت گرینویچ (حدود ۶ صبح تا ۱۲ ظهر در زابل) رخ داده‌اند. گلطوفان گردوخاک سالانه‌ی حاصل از تعداد روزهای طوفانی دوره‌ی آماری در شکل (۳) آمده است. گلطوفان مذکور بر اساس سرعت پایه ($15 m/s$) به جای سرعت پایه گلباد (حذف بادهای با سرعت کم‌تر از مقدار مذکور) حاصل شده است. بنابراین تمامی طوفان‌های مشاهده‌شده متعلق به جهات باد غالب منطقه هستند. به طوری که ۶۲ درصد از جهت شمال غربی (NNW)، ۱۸ درصد شمال (N)، و ۲۲ درصد از جهت شمال غربی (NW) برخوردار بوده‌اند. درحقیقت این جهات، مطابق با جهت وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان می‌باشد.



شکل (۳) گلطوفان سالانه‌ی
طوفانه‌های گردوخاک ایستگاه
سینوپتیک زابل
(۱۹۷۹-۲۰۰۸)

در بررسی فصلی و دوره‌ای (دوره‌ی سرد و گرم)، تابستان (۲۲ ژوئن تا ۲۲ سپتامبر) طوفان خیزترین فصل منطقه‌ی سیستان است (شکل‌های ۴ و ۵). پس از تابستان، بهار (۲۱ مارس تا ۲۱ ژوئن) در اولویت بعدی قرار می‌گیرد و در فصل زمستان (۲۲ دسامبر تا ۲۰ مارس) تعداد روزهای طوفانی به کم‌ترین تعداد خود می‌رسد شکل (۴). به طور کلی ۸۳ درصد طوفان‌های منطقه‌ی سیستان در دوره‌ی گرم (تابستان و بهار) و ۱۷ درصد در دوره‌ی سرد سال (پاییز و زمستان) اتفاق می‌افتد (شکل ۵). به لحاظ میانگین فصلی نیز فصل تابستان با میانگین ۱۱/۱۴ روز در ردیف اول و فصل زمستان با میانگین ۱/۱۲ روز کم‌ترین مقدار را شامل شده است.

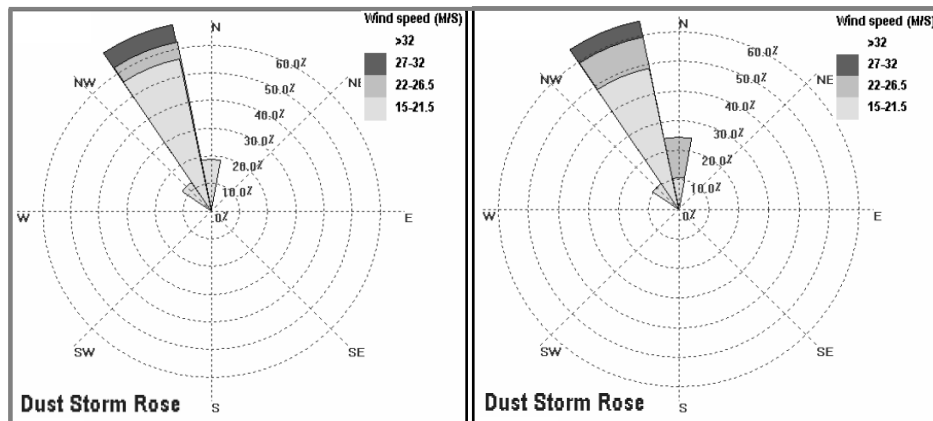


شکل (۵) درصد فراوانی دوره‌ی سرد و گرم روزهای طوفانی ایستگاه سینوپتیک زابل (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

شکل (۴) درصد فراوانی فصلی روزهای طوفانی ایستگاه سینوپتیک زابل (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

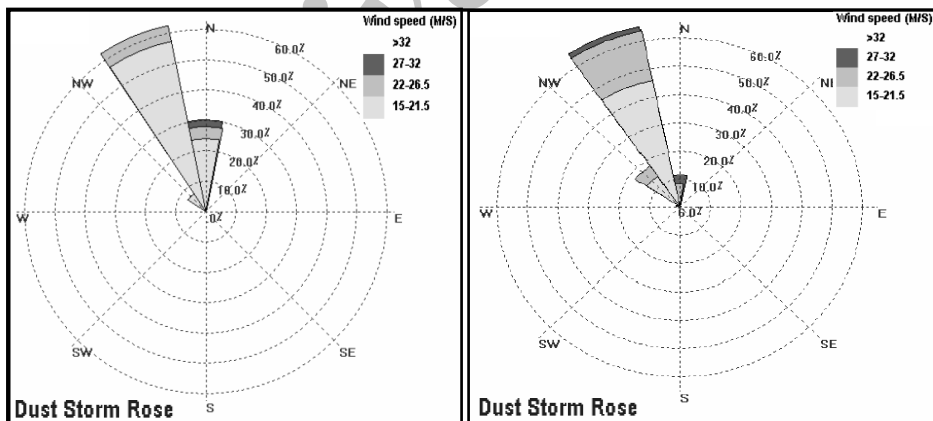
گلطوفان‌های فصول مختلف سال نیز در شکل‌های (۶ تا ۹) آمده است. در گلطوفان فصل بهار (شکل ۶)، ۶۵ درصد از روزهای طوفانی دارای جهت شمال شمال غربی (NNW)، ۲۵ درصد دارای جهت شمال (N)، و ۱۰ درصد دارای جهت شمال غربی (NW) بوده‌اند. در گلطوفان فصل تابستان، ۶۹ درصد جهت شمال شمال غربی (NNW)، ۱۹ درصد دارای جهت شمال (N)، و ۱۲ درصد دارای جهت شمال غربی (NW) بوده‌اند (شکل ۷). در دوره‌ی سرد سال (پاییز و زمستان) جهات وزش طوفان‌ها، وضعیتی مشابه با دوره‌ی گرم سال (بهار و تابستان) دارند. در شکل (۸) که بیانگر گلطوفان فصل پاییز می‌باشد، ۷۰ درصد از روزهای طوفانی با جهت شمال شمال غربی (NNW)، ۱۲ درصد با جهت شمال (N)، و ۱۸ درصد با جهت شمال غربی (NW) رخ داده‌اند. در گلطوفان فصل زمستان

بر اساس شکل (۹) ۶۴ درصد از روزهای طوفانی دارای جهت شمال شمال غربی (N_{NW})، ۳۰ درصد دارای شمال (N)، و ۶ درصد باقی مانده هم دارای جهت شمال غربی (NW) بوده‌اند. بررسی کلی حاصل از گلطوفان‌های فصلی ایستگاه زابل طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۸-۱۳۷۹) بیانگر این نکته است که جهت وزش تمامی طوفان‌های گردو خاک، بین دو زاویه ۲۹۲/۵ درجه تا ۲۲/۵ درجه بوده است. این وضعیت بیانگر انطباق جهات وزش تمامی طوفان‌ها با جهت وزش بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشد. در بررسی ماهانه، ماه ژوئن میانگین ۳/۵ روزه، بیش‌ترین و دسامبر با میانگین ۰/۳ روزه از کم‌ترین مقدار برخوردار بوده‌اند (جدول ۲ و شکل ۱۰). هم‌چنین بیش‌ترین تعداد روزهای توأم با طوفان گردو خاک در بازه‌ی زمانی ژوئن تا سپتامبر اتفاق می‌افتد (شکل ۱۰).



شکل (۷) گلطوفان گردو خاک فصل تابستان ایستگاه سینوپتیک زابل طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۸-۱۹۷۹)

شکل (۶) گلطوفان گردو خاک فصل بهار ایستگاه سینوپتیک زابل طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۸-۱۹۷۹)

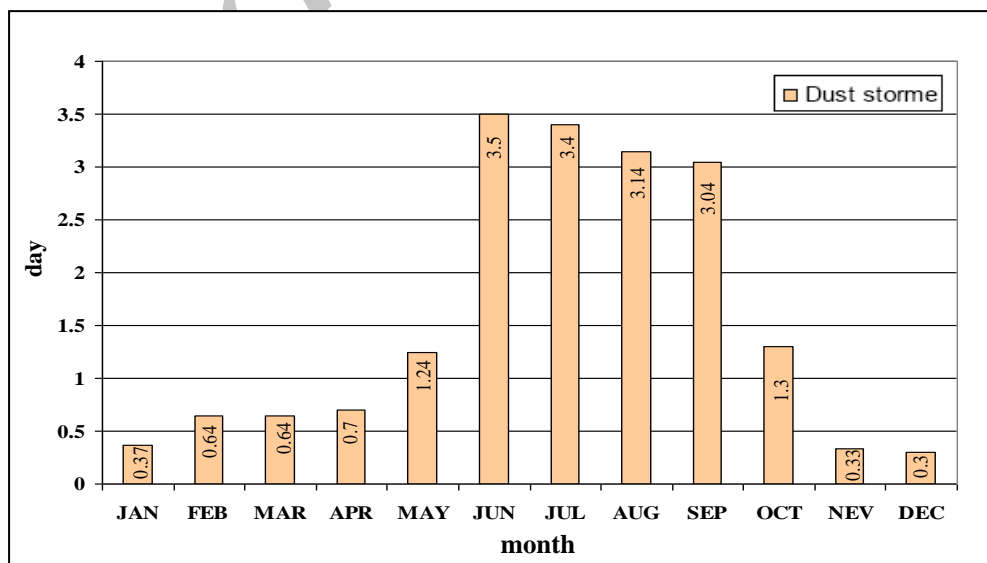


شکل (۹) گلطوفان گردو خاک فصل زمستان ایستگاه سینوپتیک زابل طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۸-۱۹۷۹)

شکل (۸) گلطوفان گردو خاک فصل پاییز ایستگاه سینوپتیک زابل طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۸-۱۹۷۹)

جدول (۲) فراوانی مشاهدات ماهانه و سالانه طوفان‌های گردوخاک منطقه‌ی سیستان طی دوره‌ی آماری (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

سال	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	جمع
1979	3	0	0	1	1	4	8	6	8	1	2	0	35
1980	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	4
1981	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
1982	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
1983	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1984	0	3	0	0	0	9	0	6	7	6	0	0	29
1985	0	3	4	3	3	7	9	5	6	2	0	0	42
1986	0	0	0	0	0	1	1	3	1	1	0	0	7
1987	1	1	0	0	1	7	9	8	12	3	1	0	43
1988	0	1	0	1	1	2	6	3	8	1	0	0	23
1989	1	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	7
1990	1	0	0	0	1	0	0	0	2	2	1	0	7
1991	0	0	0	1	0	2	0	2	1	2	0	0	8
1992	0	1	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	6
1993	0	0	0	0	0	2	0	1	3	2	0	0	8
1994	0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	0	1	9
1995	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1996	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	5
1997	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3
1998	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	3
1999	2	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1	2	9
2000	1	4	5	0	7	4	10	6	3	0	0	0	40
2001	1	0	2	3	7	12	18	9	5	5	0	0	62
2002	0	0	2	1	4	8	7	8	7	2	0	1	40
2003	0	1	0	0	3	16	12	8	2	0	0	3	45
2004	0	0	2	3	2	8	7	8	4	4	1	0	39
2005	0	0	0	4	1	0	0	0	1	0	0	0	6
2006	1	0	0	1	1	2	3	5	4	1	0	0	18
2007	0	0	3	0	0	0	2	1	1	1	1	1	10
2008	0	1	1	0	3	19	7	7	4	1	1	1	45
جمع	11	19	19	21	37	105	102	94	91	39	10	9	557



شکل (۱۰) میانگین ماهانه‌ی روزهای توأم با طوفان گردوخاک ایستگاه سینوپتیک زابل (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

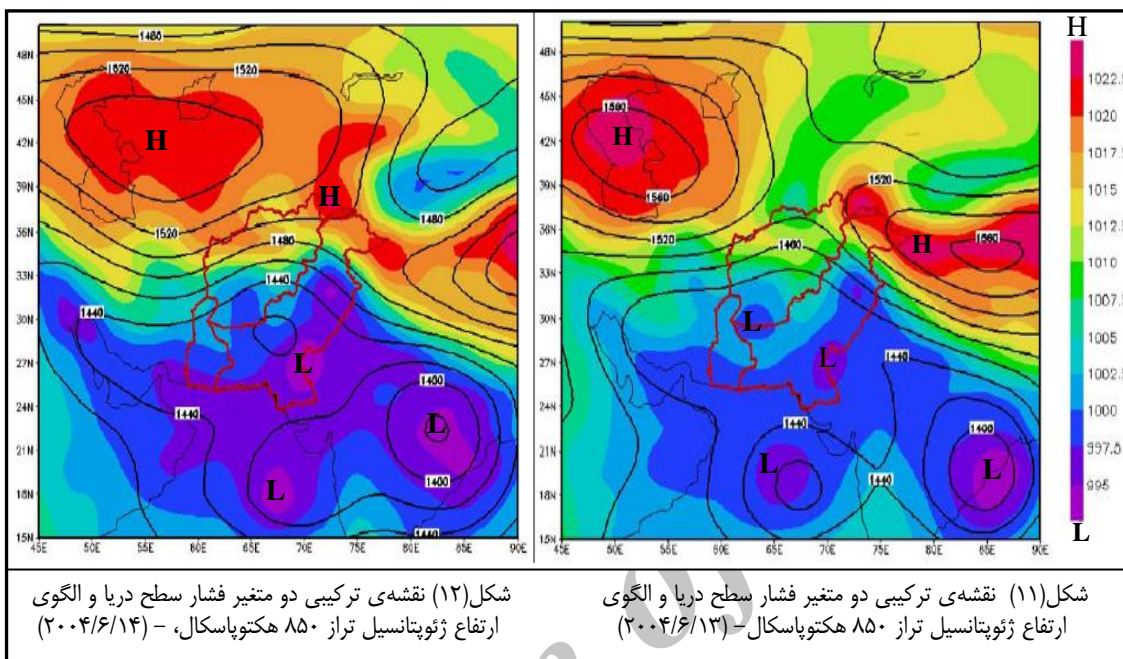
ب) تحلیل همدیدی:**۱- مطالعه‌ی موردی رویداد ۱۳ و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ (۲۳ و ۲۴ خرداد ۱۳۸۳)**

طوفان ۱۳ و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ یکی از شدیدترین طوفان‌های گردو خاک می‌باشد که طی دوره‌ی آماری در منطقه‌ی مطالعه به وقوع پیوست. تقریباً تمامی منابع تغذیه ماسه، شامل بسترهای خشکیده‌ی هامون‌های پوزک، صابری و شرق هامون هیرمند و بستر اکثر شاخه‌های هیرمند و رود سیستان در تغذیه‌ی طوفان نقش عمده‌ای را ایفا نموده‌اند. چگالی ماسه در نواحی شرقی دشت سیستان، دشت مارگو منطقه ریگستان، گودزره و رود رباط افغانستان به حدی بالا بوده است که دید افقی را در بسیاری از این مناطق به صفر رسانیده است.

۱-۱- نقشه‌های ترکیبی فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

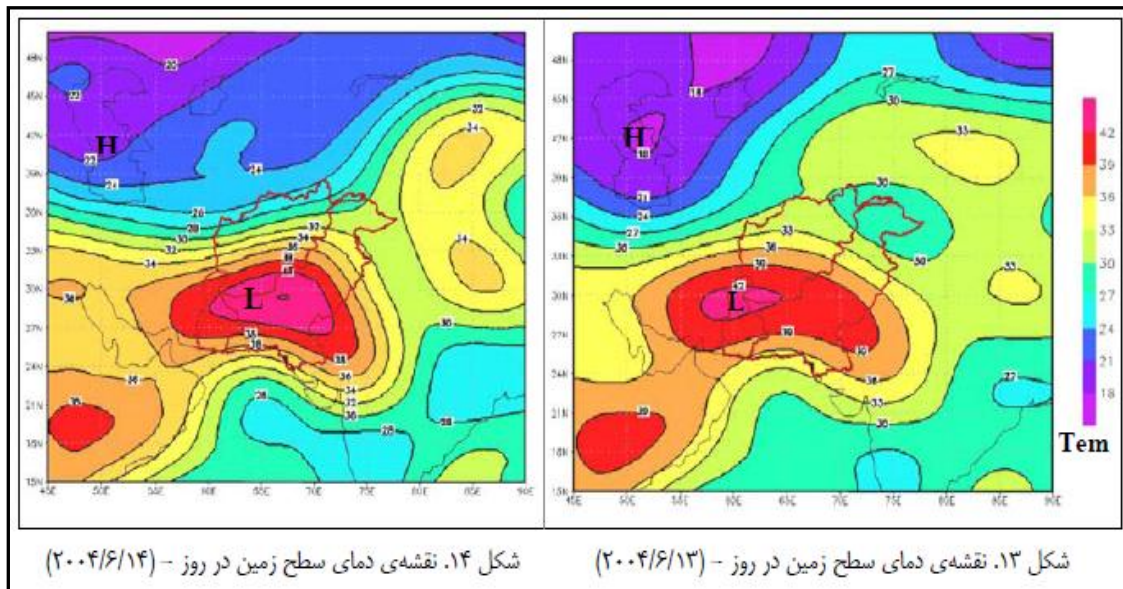
شکل‌های شماره‌ی (۱۱ و ۱۲) نقشه‌های ترکیبی فشار تراز دریا و الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روزهای ۱۳ و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ میلادی می‌باشند. در نقشه‌ی روز شروع طوفان (شکل ۱۱)، کم فشار موسمی هندوستان از گسترش زیادی برخوردار بوده و دارای سه مرکز اصلی با فشار کم‌تر از ۱۰۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد. یکی از این مراکز در ۷۰ درجه طول شرقی در جنوب شرق پاکستان مستقر می‌باشد که موقعیت متوسط آن بر روی دره‌ی رودخانه سند است. کانون کم فشار دیگر جنوب دشت مارگو در حوالی گودزره می‌باشد که به عنوان کانون فرعی‌تر سطوح است. کم فشار دیگری با هسته‌ی مرکزی کم‌تر از ۹۹۶ هکتوپاسکال در دریای عرب واقع شده است. در همین روز مرکز پرفشاری با فشار بیش از ۱۰۲۲ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر مستقر شده و زبانه‌ای از آن به سمت جنوب شرق کشیده شده است. این شرایط موجب ایجاد شیب وافشاری شدید بین سیستم پرفشار مذکور و زبانه‌ی کم فشار موسمی مستقر در منطقه مورد مطالعه گردیده است. برقراری گرادیان فشار بین مناطق مذکور، سبب تشدید سرعت باد در منطقه و ایجاد طوفان گردو خاک در دشت سیستان شده است. در همین زمان بستر خشکیده دریاچه هامون و بیابان مارگو در شرق منطقه مورد مطالعه منابع خوبی برای منشأ غبار طوفان در روز مذکور بوده‌اند. در نقشه‌ی روز اوج طوفان گردو خاک (شکل ۱۲)، کم فشار روی هند و پاکستان و افغانستان قلمرو وسیع‌تری را در بر می‌گیرد. تا جایی که بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این روز فشار مرکزی این فروبار کم‌تر از ۹۹۵ میلی بار است؛ بنابراین در روز ۱۴ ژوئن فروبار مذکور ماهیت وجودی بیش‌تری یافته و کم فشار موسمی هند نسبت به روز قبل گسترده‌تر و قوی‌تر می‌گردد. در این زمان فروبار حرارتی پاکستان هم‌چنان در ۷۰ درجه طول شرقی مستقر می‌باشد. سیستم پرفشار مستقر بر روی دریای خزر گسترش بیش‌تری یافته و به سمت شرق تا ارتفاعات هندوکش کشیده شده است؛ بنابراین اختلاف فشار بین سیستم پرفشار شمالی و کم فشار حرارتی گسترده موسمی هند - پاکستان، منجر به ایجاد گرادیان فشار شدید شده و طوفان گردو خاک را در منطقه مورد مطالعه شدت بخشیده است. در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۳ ژوئن (شکل ۱۱)، مرکز کم فشار موسمی هم‌چنان بر منطقه‌ی گسترده بوده و دارای دو هسته که یکی از آن‌ها به مرکزیت ۶۵ درجه‌ی شرقی و ۲۰ درجه‌ی شمالی و دیگری ۷۰ درجه‌ی شرقی و ۲۸ درجه‌ی شمالی (جنوب شرق پاکستان) بسته شده است. در این زمان منطقه سیستان در محدوده‌ی منحنی ۱۴۶۰ ژئوپتانسیل متر واقع شده است. بر اساس این آرایش می‌توان ادعا نمود، در این روز حرکت باد در امتداد سیستم موسمی هندوستان شکل گرفته و عامل به‌وجود آورنده‌ی آن حرکت چرخندی موجود در این سیستم می‌باشد. در نقشه‌ی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۴ ژوئن (شکل ۱۲)، کم فشار موسمی هند گسترده‌تر شده و منطقه‌ی

سیستان در سیطره‌ی منحنی ۱۴۴۰ ژئوپتانسیل متر واقع شده است. بر روی دشت سیستان خطوط هم‌ارتفاع به هم نزدیک شده‌اند که بیانگر افزایش شیب تغییرات فشار می‌باشد. افزایش شیب تغییرات فشار به سبب مجاورت سیستم پرفشار مستقر بر روی دریای خزر و ارتفاعات هندوکش با کم فشار موسمی هند می‌باشد که باعث افزایش سرعت باد در دشت سیستان و وقوع طوفان گردوخاک شده است.



۲-۱- پراکنش دمای سطح زمین

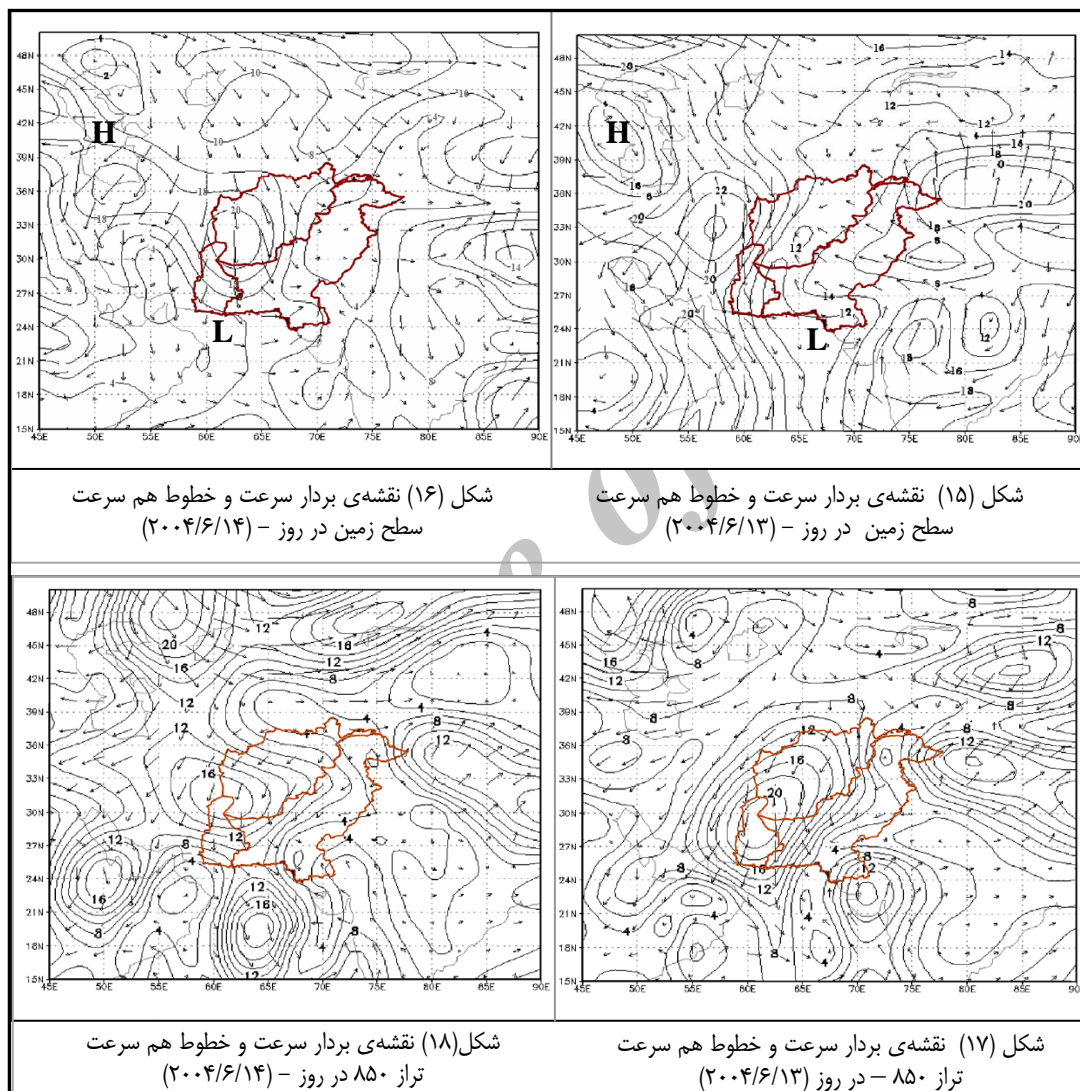
شکل‌های شماره‌ی (۱۳ و ۱۴) نقشه‌ی دمای سطح زمین روزهای ۱۳ ژوئن ۲۰۰۴ (شروع طوفان گردوخاک) و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ (اوج طوفان گردوخاک) در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. در نقشه‌ی روز شروع طوفان (شکل ۱۳)، یک هسته‌ی بیضوی شکل پُر دما با دمای بیش از ۴۲ درجه سانتی‌گراد بر روی بخش شمالی استان سیستان و بلوچستان مستقر می‌باشد که زبانه‌های آن به سمت شرق و غرب گسترش یافته‌اند. در همین زمان دشت سیستان و بیابان مارگو (منطقه مرزی مشترک بین سه کشور ایران، افغانستان و پاکستان) نیز گرادیان حرارتی بالایی را ایجاد نموده و از دمای بیش از ۴۲ درجه سانتی‌گراد برخوردار می‌باشد. در این روز بر روی ارتفاعات شمالی ایران و شمال غرب افغانستان دما کم‌تر از ۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد به طوری که یک هسته‌ی کم‌دما با دمای کم‌تر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد بر روی خزر مرکزی مشاهده می‌شود. تقابل حرارتی موجود بین دو منطقه‌ی مذکور، منجر به اختلاف فشار می‌گردد. این شرایط باعث ایجاد شیب تغییرات فشار از ارتفاعات شمالی به سمت منطقه‌ی سیستان می‌گردد. برقراری این شرایط باعث افزایش سرعت باد و ایجاد طوفان گردوخاک در منطقه‌ی سیستان می‌شود. در روز ۱۴ ژوئن (شکل ۱۴)، هم‌چنان تضاد حرارتی بین مناطق یاد شده برقرار بوده و با ایجاد شیب تغییرات فشار، وقوع طوفان در منطقه‌ی سیستان را تداوم بخشیده است.



۱-۳- نقشه‌های بردار سرعت و خطوط هم‌سرعت باد تراز دریا و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

نقشه‌ی بردار باد و خطوط هم‌سرعت تراز متوسط دریا برای روزهای ۱۳ و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) آمده است. در نقشه‌ی روز شروع طوفان (شکل ۱۵)، یک کانون بسیار قوی توزیع باد در موقعیت ۶۳ درجه‌ی طول شرقی و ۳۵ درجه‌ی عرض شمالی (حوالی مرز ایران و افغانستان در خراسان رضوی) است که باد برداری آن با حداکثر ۲۴ متر بر ثانیه از سرعت میانگین بالایی برخوردار است. این کانون وظیفه‌ی توزیع چرخش باد در شرق کشور را به عهده دارد. باد در حول این کانون با چرخش عکس عقربه‌های ساعت توزیع می‌گردد. با توجه به قرارگیری ضلع جنوبی آن بر روی دشت سیستان، چرخش شمالی جنوبی و شمال غربی - جنوب شرقی در دشت سیستان از آن منتج می‌گردد. در این روز تمام منطقه‌ی سیستان بین منحنی‌های ۱۶ تا ۲۰ متر بر ثانیه قرار گرفته است که بیانگر شرایط طوفانی باد در منطقه می‌باشد. حرکت ساعت گرد هوا در پرفشار مستقر بر روی دریای خزر و ارتفاعات هندوکش باعث می‌گردد که باد در ابتدا با جهتی شمال غربی (NW) به سمت شمال شرق افغانستان در جریان بوده و هنگام رسیدن به منطقه‌ی سیستان دارای جهتی شمالی (N) و پس از رسیدن به جنوب استان سیستان و بلوچستان به سمت جنوب شرق منحرف شود. در نقشه‌ی روز ۱۴ ژوئن (شکل ۱۶)، هسته‌ی پُرسرعت ۲۰ متر بر ثانیه بر روی منطقه‌ی سیستان بسته شده است. چرخش ساعت گرد هوا بر روی دریای خزر و ارتفاعات شمال غرب افغانستان هم‌چنان بیانگر حاکمیت شرایط پرفشار بر آن می‌باشد. جریان باد در واچرخند مذکور، ابتدا با جهتی شمال غربی در حال وزش می‌باشد که هنگام رسیدن به شمال شرق افغانستان دارای جهتی شمالی است. در این روز جریان باد در منطقه‌ی سیستان نیز دارای جهت شمالی بوده که پس از گذر از منطقه به سمت جنوب شرق منحرف می‌گردد. فراهم بودن شرایط محیطی سطح زمین از جمله خشک بودن بستر دریاچه هامون، بیابان مارگو و دشت سیستان، زمینه را برای ایجاد طوفان گردو خاک در منطقه‌ی مطالعه و گسترش آن به جنوب ولایت نیمروز افغانستان و غرب ایالت بلوچستان پاکستان فراهم نموده است. در نقشه‌ی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۳ ژوئن (شکل ۱۷)، هسته‌ی پُرسرعت ۲۰ متر بر ثانیه بر منطقه‌ی مطالعه مشاهده می‌شود. زبانه‌ی هسته سرعت به سمت جنوب کشیده شده که حاکی از وجود جریانات هوا در قسمت‌های جنوبی‌تر سیستان نیز می‌باشد. جهت جریان در این سطح شمال شرقی است که هنگام رسیدن به منطقه‌ی سیستان به صورت شمالی تغییر می‌یابد. در این سطح اثرات اصطکاک ناشی از

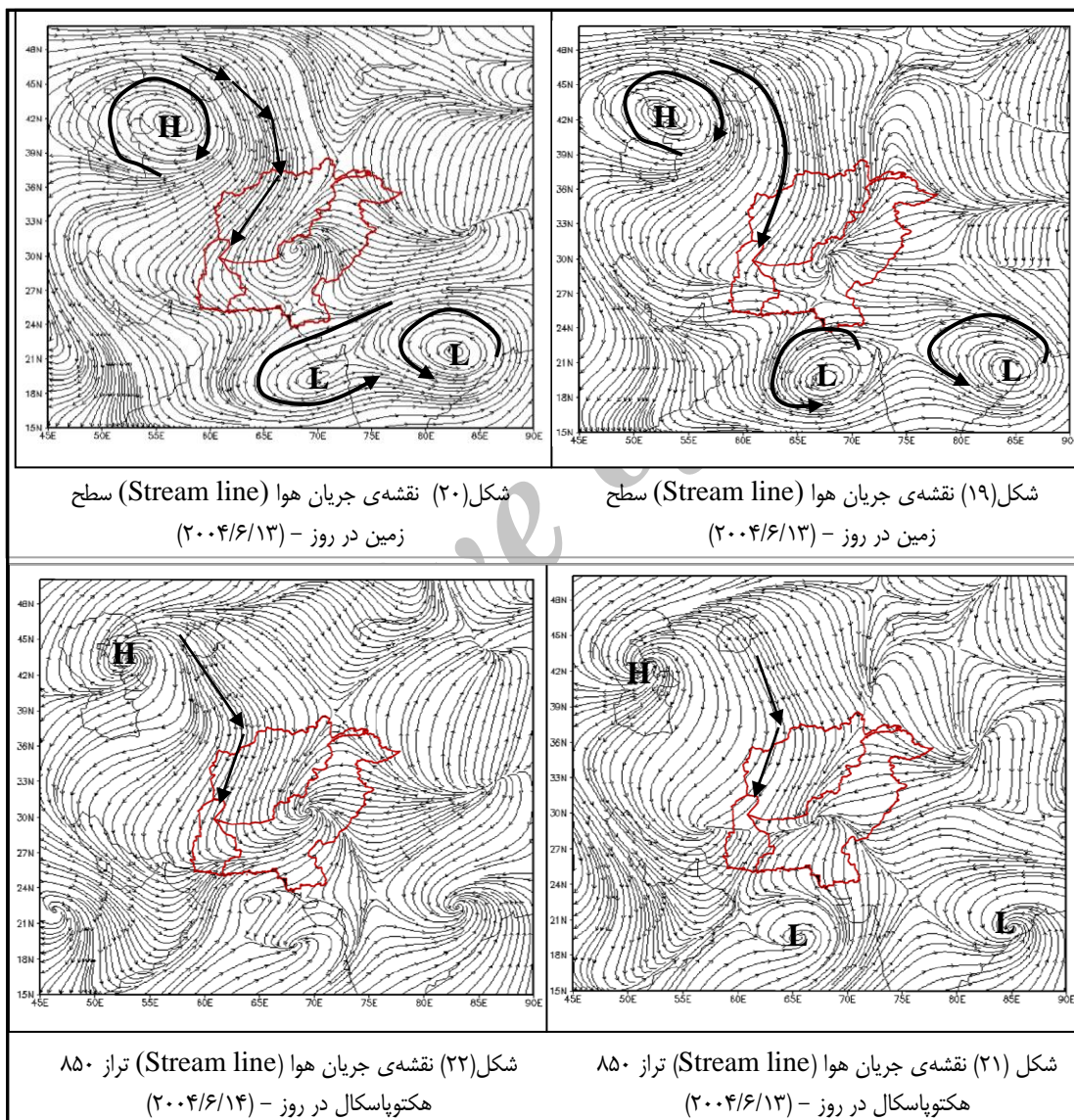
ناهمواری‌های زمین کاهش یافته و به همین دلیل جهت جریان باد به طور کامل از جهت جریانات سطح زمین تبعیت نمی‌کند. وجود جریان باد با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، به خوبی نشان می‌دهد که جریان باد تنها در سطح زمین برقرار نبوده بلکه تا سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز گسترش یافته است. در نقشه‌ی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۴ ژوئن (شکل ۱۸)، هسته‌ی پرسرعت ۱۶ متر بر ثانیه بر منطقه‌ی سیستان واقع شده است. گرچه سرعت آن نسبت به روز قبل ۴ متر بر ثانیه کاهش یافته است، اما همچنان شرایط لازم برای تداوم و تشدید طوفان گردوخاک در منطقه فراهم می‌باشد.



۴-۱- نقشه‌های خطوط جریان هوا (Stream line) تراز دریا و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

شکل‌های شماره‌ی (۱۹ و ۲۰) نقشه‌های جریان هوای سطح زمین را برای روزهای ۱۳ و ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ نشان می‌دهند. بر اساس نقشه‌ی روز ۱۳ ژوئن (شکل ۱۹)، جریان ساعت‌گرد هوا از مرکز واچرخندی مستقر بر روی دریای خزر و ارتفاعات هندوکش به صورت موجی شکل به سمت عرض‌های جنوبی سرازیر شده و با جهتی شمال شرقی از غرب افغانستان به منطقه‌ی سیستان وارد می‌شود. در همین روز جریان باد ساعت‌گرد هوا به وسیله یک مرکز چرخندی مستقر در جنوب کشور پاکستان، منجر به برقراری جریان هوا از سمت مرکز

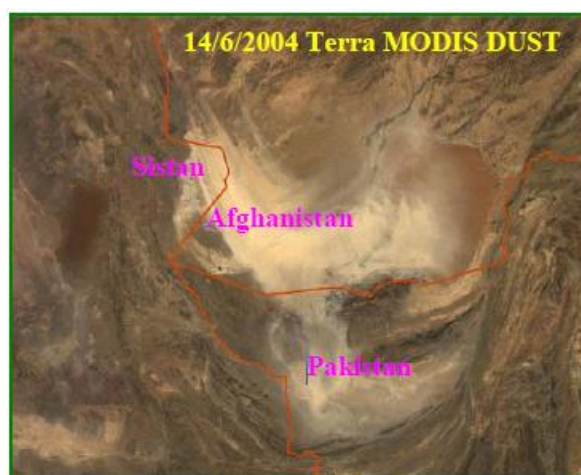
واچرخندی روی دریای خزر و ارتفاعات هندوکش به سمت چرخند مذکور می‌شود. در نقشه‌ی روز ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ (شکل ۲۰) جریان هوا هم‌چنان از مرکز واچرخندی مذکور به سمت منطقه‌ی مطالعه برقرار بوده و فشردگی خطوط جریان هوا، بیانگر سرعت زیاد باد در این روز می‌باشد. در نقشه‌های خطوط جریان هوای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل‌های ۲۱ و ۲۲) خطوط جریان هوا، وضعیتی نسبتاً مشابه با خطوط جریان سطح زمین دارند به طوری که از مرکز واچرخندی مستقر بر روی دریای خزر به سمت منطقه‌ی سیستان در حال جریان می‌باشند. افزایش فاصله بین خطوط جریان در این سطح بیانگر این نکته است که در روزهای مذکور سرعت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال منطقه‌ی مطالعه، نسبت به سطح زمین نسبتاً کم‌تر می‌باشد.



۵-۱- تصویر ماهواره‌ای سامانه‌ی گردو خاکی ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ (۲۴ خرداد ۱۳۸۳)

شکل (۲۳) سامانه‌ی گردو خاکی روز ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ را که توسط سنجنده‌ی *MODIS* ماهواره‌ی معروف *Terra* (ناسا) اخذ شده است نشان می‌دهد. این سامانه یکی از شدیدترین طوفان‌های گردو خاک دشت سیستان و

غرب افغانستان می‌باشد به طوری که دید افقی را به کم‌تر از ۵۰ متر تقلیل داده است. تقریباً تمامی منابع تغذیه گردوخاک شامل بسترهای خشکیده‌ی هامون‌های پوزک، صابری و شرق هامون هیرمند و بستر اکثر شاخه‌های هیرمند و رود سیستان در تغذیه طوفان سهیم بوده‌اند. چگالی گردوخاک در نواحی شرقی دشت سیستان، دشت مارگو، منطقه‌ی ریگستان، گودزره و رود رباط افغانستان به حدی بالا است که دید افقی را در بسیاری از این مناطق به صفر رسانیده است. مرز جنوبی هجوم طوفان بخش‌های وسیعی از ایالت بلوچستان پاکستان را پوشانده است و تمامی نواحی جنوبی مرز حوضه آبریز هیرمند و پاکستان پوشیده از ذرات گردوخاک است. کوه‌های سیاهان با امتدادی شمال غربی - جنوب شرقی مانع از گسترش بیش‌تر ماسه به سمت جنوب شده ولی طوفان تا محل اتصال رود ارغنداب در منطقه‌ی بست به شدت گسترش یافته است.



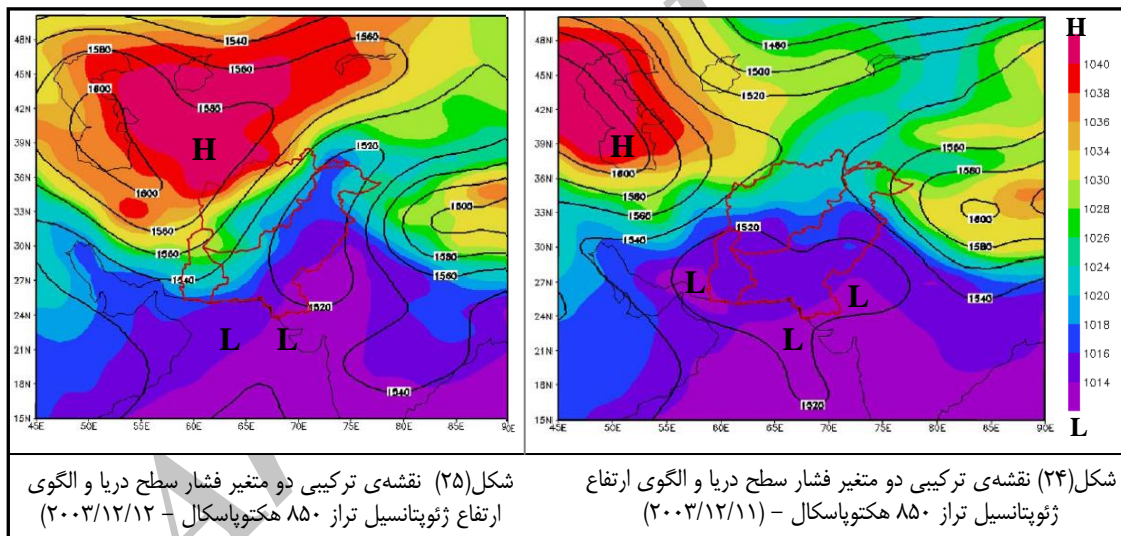
شکل (۲۳) طوفان ۱۴ ژوئن ۲۰۰۴ (۲۴ خرداد ۱۳۸۳) دشت سیستان در تصویر سنجنده MODIS

۲- مطالعه‌ی موردی رویداد طوفان گردوخاک ۱۱ و ۱۲ دسامبر ۲۰۰۳ - (۲۰ و ۲۱ آذر ۱۳۸۲)

۲-۱- نقشه‌های ترکیبی فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

براساس نقشه‌ی ترکیبی فشار سطح دریا و الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰، در روز ۱۱ دسامبر (شکل ۲۴) مرکز پرفشاری بر روی دریای خزر، کوه‌های قفقاز و صحرای قره قوم گسترش یافته که فشار هسته‌ی مرکزی آن بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال می‌باشد. در همین زمان بر منطقه‌ی سیستان منحنی هم فشار ۱۰۱۶ هکتوپاسکال مستقر می‌باشد که زبانه‌ی آن تا جنوب ایران کشیده شده است. وجود گرادیان فشار ۲۴ هکتوپاسکالی بین دو منطقه‌ی یاد شده، شیو و افشاری نسبتاً شدیدی را ایجاد نموده است. چنین شرایطی منجر به برقراری جریان باد و ایجاد طوفان گردوخاک شده است. در این روز سرعت باد به بیش از ۱۵ متر بر ثانیه رسیده و دید افقی تا ۱۰۰ متر کاهش یافت. در روز ۱۲ دسامبر (شکل ۲۵)، با حرکت هسته پرفشار به سمت جنوب شرق و استقرار آن بر ترکمنستان، ارتفاعات شمال شرق ایران و شمال غرب افغانستان، تفاوت فشار بین مناطق مذکور نسبت به روز قبل به شدت کاهش یافت به طوری که فشار سطح زمین در منطقه‌ی سیستان به ۱۰۳۰ هکتوپاسکال رسید. این شرایط بیانگر خروج هوای گرم از منطقه و جایگزینی آن به وسیله‌ی هوای سرد عرض‌های بالا می‌باشد. هوای سرد ناشی از زبانه‌ی پرفشار سیبری است که در روز قبل، مرکز آن بر روی دریای خزر مستقر بوده ولی در روز ۱۲ دسامبر با حرکت به سمت جنوب شرق، بر روی صحرای قره قوم،

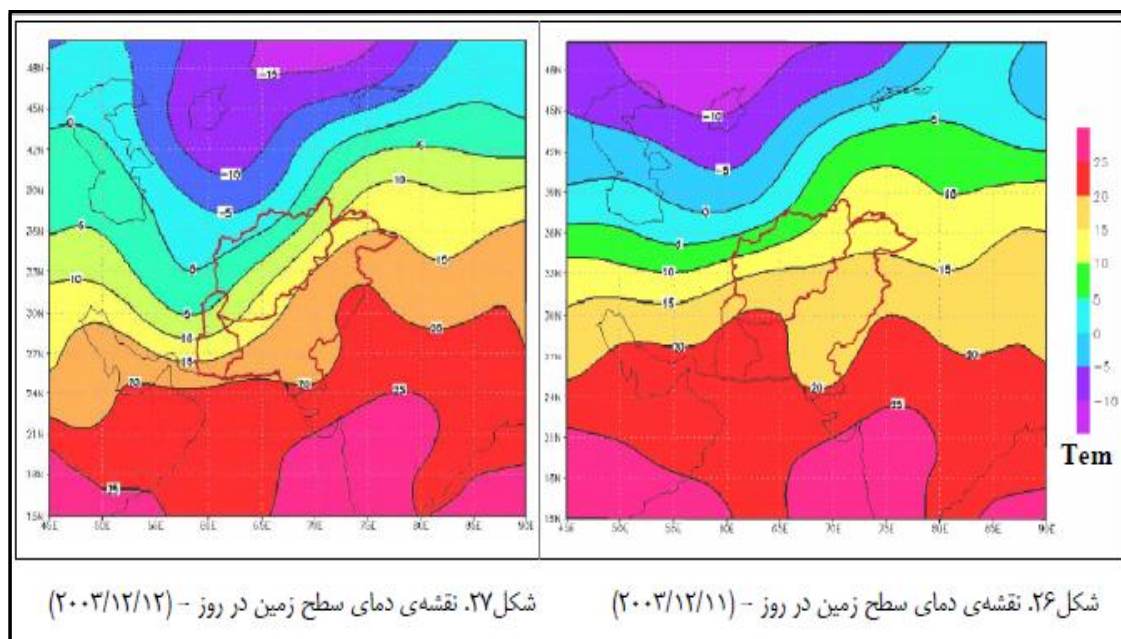
قزل قوم، جلگه توران و دریاچه‌ی آرال مستقر شده و زبانه‌ی از آن تا شمال غرب افغانستان کشیده شده است. این وضعیت توسط نقشه‌های دمای سطح زمین (شکل‌های ۲۶ و ۲۷) به وضوح دیده می‌شود. جایگزینی هوای سرد عرض‌های بالا بر منطقه‌ی مطالعه، باعث کاهش ناپایداری هوا نسبت به روز قبل شده به طوری که در روز ۱۲ دسامبر، شدت و وسعت طوفان گردو خاک کاهش یافت و دید افقی از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار گردید. براساس آمار ایستگاه هواشناسی زابل، در ساعت ۱۲ همان روز دید افقی به ۵۰۰ متر و در ساعت ۱۸ به ۴۰۰۰ متر افزایش یافت و شرایط جوی نسبتاً صاف و آرامی بر منطقه حاکم گردید. در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۱ دسامبر (شکل ۲۴) یک مرکز واچرخندی بر روی نیمه غربی دریای خزر مستقر بوده و منطقه‌ی سیستان نیز در محدوده منحنی ۱۵۲۰ ژئوپتانسیل متر واقع شده است. جهت جریانات نشان‌دهنده‌ی ریزش هوای سرد عرض‌های بالا بر منطقه‌ی سیستان و تشدید شیو در این روز می‌باشد. در نقشه‌ی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۲ دسامبر (شکل ۲۵)، منحنی ۱۶۰۰ ژئوپتانسیل متر بر نیمه‌ی جنوبی دریای خزر کشیده شده و بر منطقه‌ی سیستان، منحنی ۱۵۶۰ ژئوپتانسیل متر مستقر می‌باشد. این وضعیت بیانگر کاهش تضاد حرارتی بین مناطق مذکور نسبت به روز قبل بوده ولی هم‌چنان ریزش هوای سرد از مرکز واچرخندی حاکم بر مناطق یاد شده، با سرعت کم‌تری به سمت دشت سیستان تداوم دارد. این شرایط موجب گردید، سرعت جریان باد در روز ۱۲ دسامبر کاهش یافته و از شدت و وسعت طوفان گردو خاک کاسته شود.



۲-۲- پراکنش دمای سطح زمین

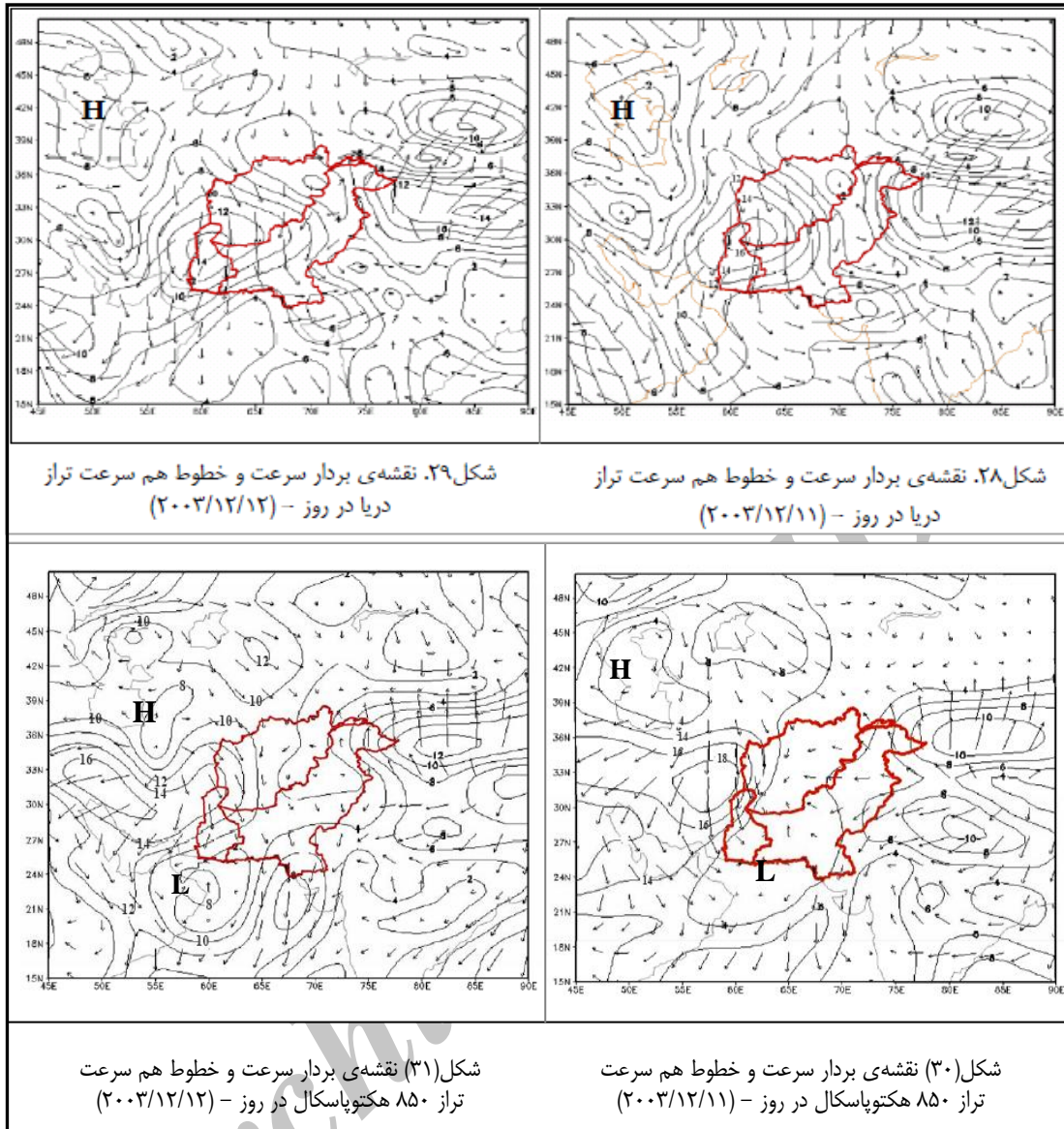
در روز ۱۱ دسامبر منحنی همدمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در منطقه سیستان و منحنی همدمای صفر درجه سانتی‌گراد بر جنوب دریای خزر، ارتفاعات البرز و ارتفاعات شمال غرب افغانستان گسترده شده و تضاد حرارتی حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد را بین این نواحی نشان می‌دهد (شکل ۲۶). این تضاد حرارتی منجر به افزایش گرادیان فشار بین مناطق مذکور شده که منجر به شکل‌گیری جریان باد با جهت شمالی در منطقه‌ی سیستان شده است. به طوری که سرعت باد از آستانه‌ی ۱۵ متر بر ثانیه گذشته و غلظت گردو خاک موجود در جو آن روز، دید افقی را به کم‌تر از ۱۰۰ متر کاهش داد. در روز ۱۲ دسامبر، هوای نسبتاً گرم از منطقه‌ی سیستان خارج شده و هوای سرد عرض‌های بالا بر آن کشیده شده به طوری که منحنی همدمای ۵ درجه سانتی‌گراد بر منطقه‌ی سیستان مشاهده می‌شود. تضاد حرارتی بین منطقه‌ی سیستان با ارتفاعات البرز و خزر جنوبی به شدت کم شده است. این شرایط باعث حاکمیت هوای

سرد (پرفشار سیبری) و نسبتاً پایداری بر منطقه شده به طوری که تا پایان روز ۱۲ دسامبر هوای نسبتاً صاف و آرامی بر منطقه گسترش یافت (شکل ۲۷).



۲-۳- نقشه‌های بردار سرعت و خطوط هم‌سرعت باد تراز دریا و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

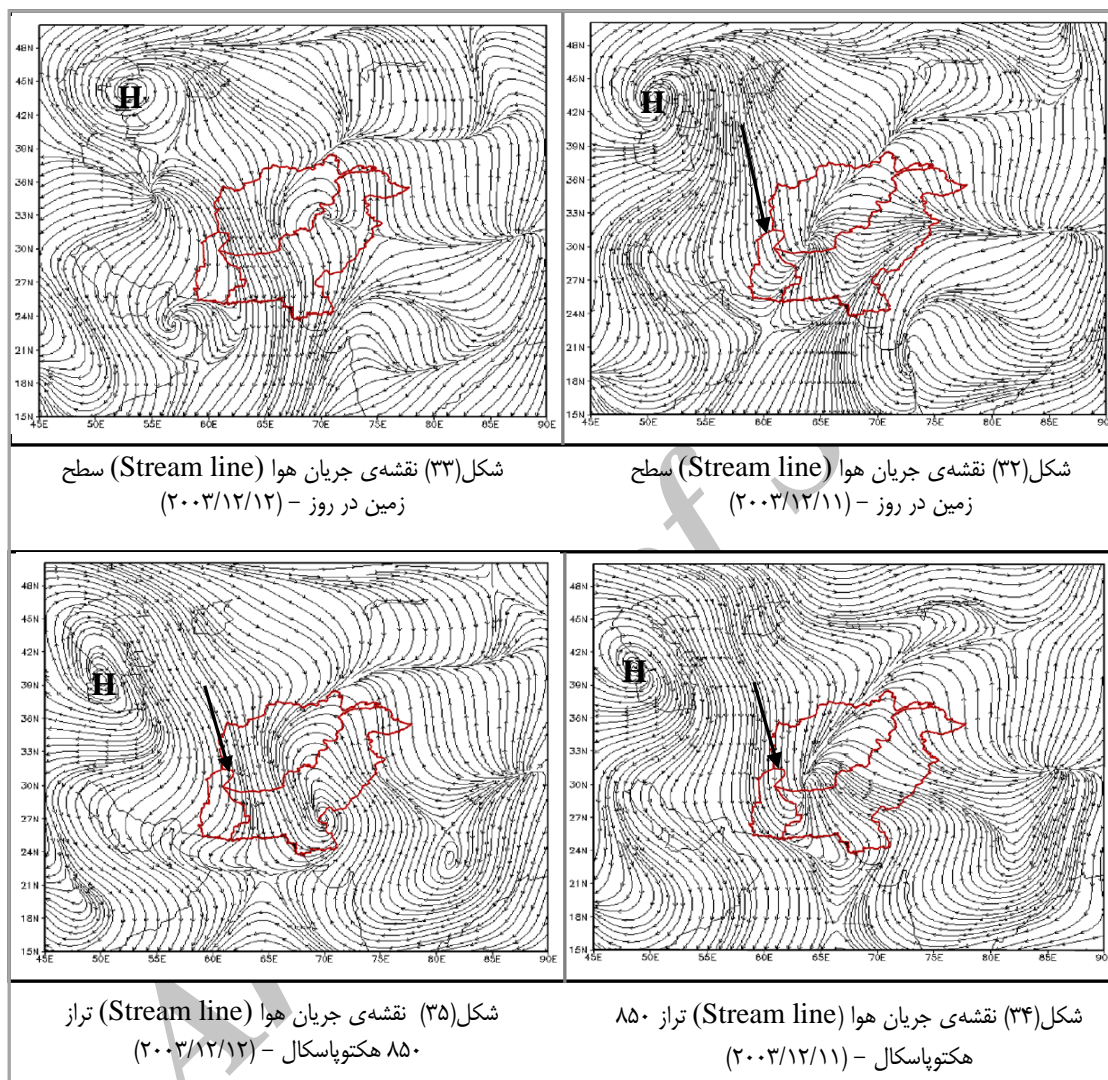
الگوهای بردار سرعت و خطوط هم‌سرعت باد تراز متوسط دریا و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در شکل‌های (۲۸ تا ۳۱) ترسیم شده‌اند. در الگوی جهت جریان و خطوط هم‌سرعت سطح زمین روز ۱۱ دسامبر (شکل ۲۸)، هسته پسرعت باد با منحنی هم سرعت ۱۶ متر بر ثانیه در منطقه‌ی سیستان بسته شده و فشردگی منحنی‌های هم‌سرعت باد، بیانگر سرعت زیاد باد در روز مذکور می‌باشد. خطوط جریان مبین جهت جریان باد در راستای شمال غربی (NNW) است، که از مرکز واچرخندی مستقر بر خزر جنوبی منشأ گرفته و هنگام رسیدن به منطقه‌ی مطالعه با راستای شمالی در حال وزش می‌باشد. عواملی از قبیل خشکی سطح زمین و بستر خشک و عاری از رطوبت دریاچه هامون، شرایط ایده آلی را برای رخداد طوفان گردوخاک مذکور به وجود آورده به طوری که غلظت گردوخاک موجود در جو، دید افقی را تا به کم‌تر از ۱۰۰ متر تقلیل داد. در نقشه‌ی الگوی باد سطح زمین روز ۱۲ دسامبر (شکل ۲۹)، منحنی ۱۴ متر بر ثانیه بر منطقه‌ی سیستان بسته شده و سرعت باد نسبت به روز قبل ۲ متر بر ثانیه کاهش یافته است. ولی جهت جریان همانند روز قبل، در جنوب غرب افغانستان شمال غربی (NNW) و هنگام رسیدن به منطقه‌ی سیستان با جهت شمالی می‌وزد. در این روز غلظت گردوخاک موجود در جو رو به کاهش نهاد به طوری که میزان دید افقی از ۲۰۰ متر در ساعت ۰۹:۴۰۰۰ متر در ساعت ۱۸ به وقت محلی رسید و جوی صاف و نسبتاً آرام حاکم گردید. در الگوی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۱ دسامبر نیز، هسته‌ی پسرعت باد بر جنوب استان خراسان جنوبی، جنوب غرب افغانستان و بخش غربی حوضه‌ی لوت مستقر بوده و منحنی هم سرعت ۱۶ متر بر ثانیه، بر فراز منطقه‌ی سیستان واقع شده است. جهت جریان باد نیز با راستای شمالی در حال وزش می‌باشد (شکل ۳۰). در الگوی جریان باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۲ دسامبر (شکل ۳۱)، سرعت باد نسبت به روز قبل کاهش یافته ولی هم‌چنان هسته‌ی پسرعت ۱۴ متر بر ثانیه بر فراز منطقه مستقر می‌باشد. جهت جریان باد نیز تا قبل از رسیدن به منطقه‌ی سیستان شمال غربی بوده و هنگام رسیدن به سیستان با جهت شمالی می‌وزد.



۲-۴- نقشه‌های خطوط جریان هوا (Stream line) تراز دریا و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

در نقشه‌ی جریان هوا روز ۱۱ دسامبر ۲۰۰۴ (شکل ۳۲)، یک مرکز واچرخندی بر روی دریای خزر مستقر می‌باشد. حرکت ساعت گرد هوا از این مرکز واچرخندی، در راستای شمال غربی به سمت غرب افغانستان و منطقه‌ی سیستان در حال جریان می‌باشد. این خطوط جریان بیانگر جهت جریان هوا می‌باشد و به روشنی نشان می‌دهد که جریان شمال غربی باد در هنگام گذر از بیابان‌های جنوب غرب افغانستان و هم چنین بستر خشک دریاچه‌های هامون، رخداد طوفان گردو خاک ۱۱ دسامبر را به دنبال داشته است. فشردگی خطوط جریان هنگام رسیدن به منطقه‌ی سیستان، بیانگر سرعت بالای باد می‌باشد. در نقشه‌ی روز ۱۲ دسامبر، مرکز واچرخندی با کمی جابه‌جایی به سمت شرق، بر روی شرق دریای خزر مستقر شده است. کاهش فاصله میان خطوط جریان بیانگر کاهش سرعت است ولی جریان شمال غربی باد هم‌چنان بر منطقه‌ی سیستان مستقر بوده که پس از طی مسافتی به سمت جنوب غرب منحرف می‌شود (شکل ۳۳). در نقشه‌ی خطوط جریان تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۱ دسامبر، جهت جریان به وضوح همراهی جریان‌ات این تراز را با جریان‌ات سطح زمین

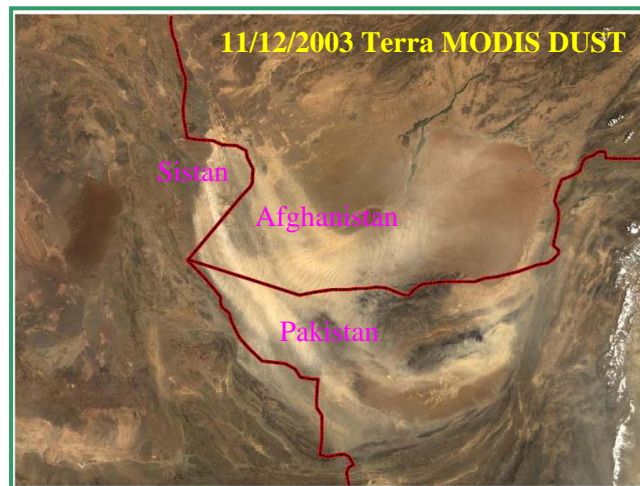
نشان می‌دهد. به طوری که خطوط جریان و جهت جریان مشابه وضعیت آن در سطح زمین می‌باشد (شکل ۳۴). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۱۲ سپتامبر (شکل ۳۵)، خطوط جریان راستای شمال غربی جریان باد را نشان می‌دهد که هنگام رسیدن به جنوب غرب افغانستان و شمال منطقه‌ی سیستان فشرده‌تر شده و سرعت باد افزایش یافته است. این جریانات با عبور از منطقه سیستان به سمت جنوب غرب منحرف شده‌اند.



۲-۵- تصویر ماهواره‌ای سامانه‌ی گردو خاکی ۱۱ دسامبر ۲۰۰۳ (۲۰ آذر ۱۳۸۲)

تصویر ماهواره‌ای طوفان گردو خاکی ۱۱ دسامبر ۲۰۰۳ که توسط سنجنده MODIS ماهواره ترا (Terra) ناسا اخذ شده در شکل (۳۶) آمده است. در این طوفان سرعت باد به بیش از ۱۵ متر بر ثانیه و دید افقی به کم‌تر از ۱۰۰ متر رسید. این سامانه دارای تداوم ۲ روزه بوده که در روز ۱۱ دسامبر شروع شده و به اوج خود رسید و در روز ۱۲ دسامبر با شدت کم‌تری تداوم داشت و نهایتاً در پایان روز دوازدهم خاتمه یافت. بر اساس این شکل محدوده‌ی گسترش طوفان گردو خاکی، در پی خشکی کامل دریاچه‌ی هامون محدوده‌ی وسیعی از دشت سیستان، منطقه‌ی نیمروز افغانستان و نهایتاً دشت مارگو و مرزهای غربی کشور پاکستان تا حوالی جنوب میرجاوه را فرا گرفته است. حداکثر شدت گردوغبار در امتداد شمال غربی - جنوب شرقی به سمت

گودزره کشانیده شده است. منشأ بار جامد طوفان بستر خشکیده‌ی هامون صابری و پوزک بوده و جریان غربی نیز به وسیله‌ی بستر هامون هیرمند تغذیه می‌گردد. به لحاظ منطقه‌ای محدوده‌ی گسترش طوفان محدود به دشت سیستان، غرب ایالت هلمند و مناطق اطراف گودزره و دشت مارگو می‌باشد. در نواحی دیگر استان سیستان و بلوچستان و جنوب خراسان جنوبی اثر مشهودی از وقوع طوفان گردو خاک مشاهده نمی‌شود.



شکل (۳۶) طوفان ۱۱ دسامبر ۲۰۰۳ (۲۰ آذر ۱۳۸۲) دشت سیستان در تصویر سنجنده MODIS

۳- نتیجه گیری:

طوفان‌های گردو خاک پدیده‌ی متداول منطقه‌ی سیستان می‌باشد، به طوری که طی دوره‌ی (۲۰۰۸ - ۱۹۷۹) هیچ سالی عاری از طوفان گردو خاک نبوده است. میانگین روزهای توأم با طوفان گردو خاک ۱۸/۵۶ روز بوده است که بیانگر طوفان خیزبودن منطقه‌ی سیستان است. این پدیده به دلیل خصوصیات اقلیمی و محیطی منطقه از قبیل وزش بادهای ۱۲۰ روزه، خشکی هوا، زاویه‌ی تابش بالا، دمای بالا و وجود ذرات ریزدانه بستر خشکیده‌ی دریاچه‌های هامون و دشت سیستان، به کرات اتفاق می‌افتد. جهت باد غالب طوفان‌های گردو خاک منطقه، شمال‌شمال غربی می‌باشد که از جهت عمومی بادهای ۱۲۰ روزه تبعیت می‌نماید. به طور کلی ۸۳ درصد طوفان‌های گردو خاک منطقه در دوره‌ی گرم (تابستان و بهار) و ۱۷ درصد در دوره‌ی سرد سال (پاییز و زمستان) اتفاق می‌افتد. در میان فصول، تابستان طوفان خیزترین و زمستان کم‌طوفان‌ترین فصل منطقه بوده و در میان ماه‌ها، ژوئن از بیش‌ترین و دسامبر از کم‌ترین فراوانی برخوردار بوده‌اند. بررسی فراسنج‌های مختلف (فشار، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، باد مداری و نصف النهاری، خطوط جریان و ...) در دو تراز دریا و ۸۵۰ هکتوپاسکال بهتر از نقشه سایر ترازها، شرایط رخداد طوفان گردو خاک در منطقه را توجیه نمود. به همین دلیل دو تراز مذکور جهت تحلیل همدیدی انتخاب گردید. پس از تفکیک رویدادها به دو دوره‌ی گرم (بهار و تابستان) و سرد (پاییز و زمستان)، شدیدترین سامانه‌ی هر دوره جهت تحلیل همدیدی انتخاب گردید. نتایج حاصل از تحلیل همدیدی نشان داد: هنگام شروع طوفان گردو خاک دوره‌ی گرم، در نقشه‌ی فشار تراز متوسط دریا، مراکز کم‌فشاری با فشار مرکزی ۹۹۵ هکتوپاسکال بر روی هندوستان و پاکستان تشکیل گردیده و یک مرکز کم‌فشار فرعی تر با فشار حدود ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در منطقه‌ی سیستان مستقر می‌شود. در روز اوج سامانه، کم‌فشار روی هند و پاکستان و جنوب افغانستان قلمرو وسیع‌تری یافته تا جایی که بخش‌هایی از جنوب شرق ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این روز فشار مرکزی فروبار حدود ۹۹۵ هکتوپاسکال بوده و

ماهیت وجودی بیش‌تری می‌یابد. در همین ایام یک مرکز فرابار با فشار مرکزی بیش از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر تا شمال غرب افغانستان استقرار می‌یابد. و بدین ترتیب گرادیان فشار بین نواحی شمالی و جنوب شرقی کشور افزایش یافته که منجر به رخداد طوفان گردوخاک در منطقه‌ی سیستان می‌شود. پرفشار روی دریای خزر به عنوان یک پدیده‌ی غالب در طی رخداد‌های طوفان دوره‌ی گرم، تقریباً حضور دائمی در منطقه داشته، ولی موقعیت آن جابه‌جایی‌هایی در اطراف خزر دارد؛ به طوری که نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز مؤید این وضعیت می‌باشد. در نقشه‌های دمای سطح زمین، وجود تباین حرارتی میان منطقه‌ی سیستان و منطقه‌ی خزر ایجاد‌گرادیان فشار نموده و شرایط را برای رخداد طوفان گردوخاک در منطقه فراهم می‌نماید. براساس نقشه‌های سرعت باد و خطوط جریان، در این زمان تمام بادهای غالب شرق و جنوب شرقی کشور مستقیماً از پرفشار مستقر بر نیمه جنوبی دریای خزر منشأ می‌گیرند که ناشی از چرخش ساعت‌گرد هوا از پرفشار مذکور و حرکت آن به سمت مرکز کم‌فشار جنوب شرق ایران است. در طوفان‌های گردوخاک دوره‌ی سرد سال، هنگامی که پرفشار سیبری با فشار مرکزی بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر مستقر شود و منطقه‌ی سیستان به دلیل عدم حضور زبانه‌های پرفشار مذکور، از شرایط کم‌فشارتری نسبت به پرفشار برخوردار باشد، اختلاف فشار بین مناطق یاد شده منجر به رخداد طوفان گردوخاک می‌شود. شرایط همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال این دوره، بیانگر استقرار مرکز و اچرخندی ۱۶۰۰ ژئوپتانسیل متر که تقریباً همانند مرکز و اچرخندی تراز سطح دریا بر روی دریای خزر بسته شده است. در این تراز همانند تراز سطح دریا، جهت جریانان شمال شرقی بوده و به علت چرخش و اچرخندی، هوای سرد عرض‌های بالا بر منطقه، مطالعه ریزش نموده و منجر به طوفان گردوخاک می‌شود. اما هنگامی که پرفشار سیبری گسترش یافته و زبانه‌ای از آن بر منطقه‌ی سیستان حاکم شود، تباین حرارتی بین منطقه‌ی سیستان و پرفشار سیبری که به سمت شرق دریای خزر منتقل شده است بسیار کاهش می‌یابد. با افت دمای حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه‌ی سیستان، بر روی آن نیز شرایط پرفشار حاکم می‌گردد. این وضعیت منجر به حاکمیت هوای سرد و پایدار سیبری بر منطقه‌ی گردیده و طوفان گردوخاک خاتمه می‌یابد. بنابراین وقوع طوفان‌های گردوخاک در دشت سیستان تنها ناشی از بادهای ۱۲۰ روزه نمی‌باشد، بلکه در ماه‌های دیگر سال، عوامل متعدد اقلیمی و هوا شناختی دیگر در وقوع آن نقش دارند که نحوه‌ی حضور پرفشار سیبری و همرفت‌های ناحیه‌ای از مهم‌ترین آنها هستند. در این دوره منشأ اصلی بادهای پرفشار روی خزر و بعد از آن هوای سرد روی ارتفاعات هندوکش و هیمالیاست. به عبارت بهتر با قوی‌تر شدن پرفشار روی دریای خزر این عامل به عنوان عامل برتر به ایفای نقش می‌پردازد و هوا را به سوی کم‌فشار جنوب شرق ایران می‌راند که هنگام رسیدن به منطقه‌ی سیستان جهت شمال شمال غربی داشته و پس از گذر از سیستان به سمت جنوب شرق منحرف می‌شود.

۴- فهرست منابع

- (۱) احمدی، حسن (۱۳۷)، نگرشی بر اقلیم سیستان، مرکز تحقیقات کشاورزی زابل، ص ۴۶.
- (۲) اکبری مقدم، حسین، و اعتصام، غلامرضا (۱۳۷۰)، کشاورزی و سیستان، مجموعه مقالات اولین همایش سیمای فردای سیستان، دانشکده‌ی کشاورزی زابل، صص ۶۸-۶۴.
- (۳) حسینی، سید باقر (۱۳۷۹)، مطالعه سینوپتیکی طوفان‌های شدید در تهران، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- (۴) حسین‌زاده، سیدرضا (۱۳۷۶)، بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره پیاپی ۴۶، صص ۱۲۷-۱۰۳.
- (۵) حیدری، محمد طالب (۱۳۸۶)، غبار و الگوی جوی مولد آن در غرب کشور، نشریه‌ی سازمان هواشناسی استان کرمانشاه، شماره ۱۱.
- (۶) حیدری‌نسب، مهدی (۱۳۸۶)، نقش باد در ایجاد لندفرم‌های بادی در منطقه سیستان، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی در برنامه ریزی محیطی، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- (۷) خسروی، محمود (۱۳۸۹)، بررسی توزیع عمودی گردوغبار ناشی از طوفان در خاورمیانه با استفاده از مدر NAAPS در منطقه‌ی سیستان ایران، مجموعه مقالات چهارمین کنگره‌ی بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- (۸) خسروی، محمود و محمد سلیقه (۱۳۸۴)، اثرات اکولوژیکی و زیست محیطی بادهای ۱۲۰ روزه‌ی سیستان، پژوهشکده‌ی علوم زمین و جغرافیا، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- (۹) دهقانپور، علیرضا (۱۳۸۴)، تحلیل آماری و سینوپتیکی طوفان‌های خاک در فلات مرکزی ایران، پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تهران.
- (۱۰) ذوالفقاری، حسن، و عابدزاده، حیدر (۱۳۸۴)، تحلیل سینوپتیکی طوفان‌های گردوغباری در غرب ایران، مجله‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۶.
- (۱۱) راشکی، علیرضا، و زرین، هدایت‌الله (۱۳۸۶)، پیامدهای بادهای ۱۲۰ روزه در خشک‌سالی‌های اخیر دشت سیستان، باشگاه پژوهشگران جوان، بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند.
- (۱۲) رئیس‌پور، کوهزاد، و طاوسی، تقی، و خسروی، محمود (۱۳۸۷)، تحلیل آماری همدیدی پدیده گردوغبار در استان خوزستان، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، صفحه ۱۵۷.
- (۱۳) رئیس‌پور، کوهزاد، و خسروی، محمود، و طاوسی، تقی (۱۳۸۹)، بررسی تأثیر طوفان‌های شن به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده‌ی توسعه در منطقه سیستان، مجموعه مقالات همایش ملی جغرافیا، امید و توسعه در جنوب شرق ایران، تهران، دانشگاه امام حسین (ع).
- (۱۴) صداقت، محمود (۱۳۸۹)، منابع و مسائل آب ایران، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- (۱۵) علیجانی، بهلول (۱۳۷۶)، آب و هوای ایران، تهران، انتشارات پیام نور.
- (۱۶) علیجانی، بهلول (۱۳۸۱)، اقلیم‌شناسی همدید، تهران، انتشارات سمت.
- (۱۷) مسعودیان، سید ابوالفضل، و کاویانی، محمدرضا (۱۳۸۶)، اقلیم‌شناسی ایران، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان.
- (۱۸) لشکری، حسن، و کیخسروی، قاسم (۱۳۸۷)، تحلیل آماری سینوپتیکی طوفان‌های گردوغبار استان خراسان رضوی، مجله‌ی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۵.
- (۱۹) نگارش، حسین (۱۳۸۶)، پیامدهای خشک‌سالی‌های اخیر در منطقه سیستان، همایش منطقه‌ای خشک‌سالی، پیامدها و راهکارهای مقابله با آن، بیرجند، معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد واحد بیرجند.

- (۲۰) همتی، نصرالله (۱۳۷۴)، بررسی فراوانی وقوع طوفان‌های خاک در نواحی مرکزی و جنوب کشور، پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد، تهران، دانشکده‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- (۲۱) یارنال، برنت (۱۳۸۵)، اقلیم شناسی همدید و کاربرد آن در مطالعات محیطی، ترجمه‌ی سید ابوالفضل مسعودیان، اصفهان، انتشارات دانشگاه.
- (22) Arimoto, R. (2002), *Relationships to source, troposphere chemistry, transport and deposition*, Earth science, pp: 30.
- (23) Carlson, L. (2002), *monthly weather*, review volume, no5, pp:17.
- (24) Dayan, Koch, J. (1986), *A Synoptic analysis of the meteorological conditions affecting dispersion of pollutants emitted from tallstacksin the coastal plain of Israel*, pp : 537 – 543.
- (25) Goudie and Middleton, (2002), *Saharan dust storms, nature and consequences*, Earth science review, pp : 56.
- (26) Hamish. A, Grant. M, tanish A, (2001), *Inter-regional transport of Australian dust storms Soil erosion reSearch for the 21 th century* , pp : 28 .
- (27) Koren I, Kaufman Y, (2006), *The Bode'le' depression : a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest*, pp: 1 - 4 .
- (28) Kutiel. H, Alpert. p, (2005), *Synoptic of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe*, pp : 1 - 14 .
- (29) Romanoff. B, (1961), *Dust storms in Gobi an Zone of Mongolia*, *The First PRC- Mongolia Workshop on climate change in arid and semi - arid Region over the Central Asia*, pp : 21.
- (30) Squires, Victor, R, (2002), *Dust and sand storms: An early warning of impending disaster, Global Alarm: Dust and sand storms from the word*. Pp:160-170.
- (31) Natsagdari, L.D. Jugder, Y.Schung, (2002), *Analysis of dust storms observed. Mongolia during, 1937-1999*, p12.
- (32) Lin, Gguanghai, (2002); *dust storm in the 1930 and sand storm in 1999 in the USA, Global Alarm; dust and sand storm from the world dry lands*, pp: 160-170.
- (33) Wang W, (2005), *A synoptic model on east Asian dust emission and transport , Atmospheric science and air quality conferences china* , pp : 13.
- (34) Weihong. Q. and Shaoyinshi, (2001), *Variations of the dust storm in china and its climate control*, *journal of climate* , pp : 15 .
- (35) www.cdc.noaa.gov.com