



## تحلیل فرسایندگی بادهای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان با استفاده از گل‌باد، گل‌طوفان و گل‌ماسه

سمیرا زمانی<sup>۱</sup>، \*مجید محمودآبادی<sup>۲</sup>، نجمه یزدان‌پناه<sup>۳</sup> و محمدهادی فرپور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، آانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، آانشیار گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران، <sup>۲</sup>استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

### چکیده

**سابقه و هدف:** فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند استان کرمان محسوب می‌شود. مهم‌ترین عوامل فرساینده مؤثر در فرسایش بادی و تولید رسوب، جهت و سرعت باد هستند. هدف پژوهش حاضر، تجزیه و تحلیل بادهای فرساینده به منظور تعیین جهت غالب بادهای طوفان‌زا و همچنین بررسی وضعیت و پتانسیل فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان در بازه ۸ تا ۱۱ ساله می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش، داده‌های ۱۲ ایستگاه سینوپتیک استان کرمان طی یک دوره آماری ۸ تا ۱۱ ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این راستا با استفاده از نرم‌افزار WR Plot View، تحلیل و رسم گل‌بادها و گل‌طوفان‌های ایستگاه‌های منتخب استان انجام شد. از طرفی، گل‌ماسه‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز با استفاده از نرم‌افزار Sand Rose Graph 3 رسم و شاخص‌های مختلف حمل ماسه و جهت حمل رسوب تعیین شد.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از تحلیل گل‌باد سالانه استان کرمان نشان داد که به‌طورکلی، در نیمه غربی استان، بادهای غربی و جنوب‌غربی و در نیمه شرقی، بادهای شمالی فراوانی بیش‌تری دارند. نتایج تحلیل گل‌طوفان گویای این مطلب بود که فرساینده‌ترین بادها در اغلب ایستگاه‌ها عمدتاً از جهت‌های غرب و جنوب‌غرب وزیده و تنها در ایستگاه‌های بم و شهداد از جهت شمال و در ایستگاه زرنند از جهت‌های جنوب‌غرب و شمال‌شرق وزیده است. طبق این تحلیل، ایستگاه‌های جیرفت، سیرجان و کهنوج به‌ترتیب با ۹۴/۹، ۸/۰ و ۱۲/۰ درصد بیش‌ترین درصد فراوانی باد را در کلاس‌های سرعت  $6/7 \leq$  تا  $7/7$  و  $7/7$  تا  $9/8$  متر بر ثانیه به خود اختصاص دادند. در کلاس‌های سرعت بالاتر یعنی  $9/8$  تا  $11/8$ ،  $11/8$  تا  $13/9$  و  $13/9 \geq$  متر بر ثانیه، ایستگاه رفسنجان به‌ترتیب با  $10/9$ ،  $5/0$  و  $4/1$  درصد، بیش‌ترین فراوانی را در بین همه ایستگاه‌ها داشت. تحلیل جهت بردار برآیند حمل ماسه (RDD) نشان داد که جهت حرکت ماسه در ایستگاه‌های واقع در نیمه غربی استان عمدتاً به‌سمت شرق و شمال‌شرق و در ایستگاه زرنند از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی و در ایستگاه‌های شهداد و بم از سمت شمال به سمت جنوب است. کم‌ترین مقادیر کل توان حمل ماسه ( $DP_1$ ) مربوط به ایستگاه‌های بافت و جیرفت به‌ترتیب با ۳۹۸ و ۴۰۰ واحد برداری و بیش‌ترین مقدار آن متعلق به ایستگاه رفسنجان با ۱۶۶۵ واحد برداری بود. به‌جز ایستگاه‌های بافت و جیرفت که دارای قدرت

\* مسئول مکاتبه: mahmoodabadi@uk.ac.ir

فرسایشی متوسطی بودند، در سایر ایستگاه‌ها قدرت فرسایش بادی بالا بود. تحلیل شاخص همگنی جهت باد (UDI) نیز نشان داد که به‌استثنای دو ایستگاه جیرفت و زرنده که بادهای، دارای تغییرپذیری زیاد و چند جهته هستند در سایر ایستگاه‌ها، تغییرپذیری بادهای متوسط و دو جهته با زاویه منفرجه است.

**نتیجه‌گیری:** یافته‌های این پژوهش نشان داد که هر چند تحلیل فرسایشی باد اطلاعات ارزشمندی در خصوص وضعیت فرسایش بادی و حمل ذرات رسوب به‌دست می‌دهد، ولی برای تحلیل واقعی‌تر فرسایش بادی استان لازم است داده‌های مربوط به سرعت آستانه فرسایش بادی و نیز فرسایش‌پذیری خاک‌ها نیز مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** استان کرمان، پتانسیل حمل ماسه، فرسایش بادی، گل‌باد، گل‌طوفان

### مقدمه

پدیده مخرب فرسایش بادی یکی از انواع مهم فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که آثار نامطلوبی بر محیط زیست دارد. شدت فرسایش بادی تحت‌تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، که این عوامل در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک بیش‌تر دیده می‌شود (۱۸ و ۳۳). این پدیده به‌شدت پویا و دارای تغییرات زمانی بوده و در عین‌حال در سطح وسیعی عمل می‌کند. از این‌رو، پتانسیل تخریب فرسایش بادی همواره بالا است و از این‌رو، در مقیاس جهانی و منطقه‌ای دارای اهمیت زیادی است (۵). فلات ایران با قرارگرفتن بر روی کمربند خشک نیم‌کره شمالی و اختصاص بخش قابل‌توجهی از مساحت آن به مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از مناطق حساس دنیا در برابر فرسایش بادی است. به‌عبارت دیگر دو سوم از گستره ایران‌زمین در این اقلیم واقع شده که نزدیک به ۴۵ میلیون هکتار آن را بیابان‌ها تشکیل می‌دهد (۸، ۱۲ و ۱۷). استان کرمان که در جنوب‌شرقی ایران واقع شده نیز از این قاعده مستثنی نبوده و اقلیم خشک، فقر پوشش گیاهی، همواری نسبی سطح زمین و همسایگی با دشت لوت از مهم‌ترین عواملی هستند که سبب بالا بودن شدت فرسایش بادی در آن شده است (۳۴ و ۳۵).

اختلاف فشار هوا است. جریان هوا (باد) به‌دلیل داشتن جرم و سرعت، دارای انرژی جنبشی و در نتیجه فرسایشی است. در حقیقت، انرژی باد در شرایطی باعث جداشدن ذرات خاک و انتقال ذرات رسوب می‌شود (۲۴). سرعت و جهت باد از عوامل مهمی هستند که در میزان فرسایشی باد نقش زیادی داشته و بنابراین شدت فرسایش بادی را کنترل می‌کند (۱۳، ۲۲، ۲۶، ۲۷ و ۳۹). در واقع، فرسایش بادی دارای ارتباط مستقیمی با سرعت باد است و در سرعت‌های بیش‌تر از مقدار آستانه، افزایش سرعت باد باعث تقویت فرسایشی باد و در نتیجه تشدید فرسایش بادی می‌شود (۴، ۲۲، ۲۸ و ۳۸). با افزایش نسبی سرعت باد حتی ممکن است شدت فرسایش بادی چند برابر افزایش یابد (۱۵، ۱۶ و ۳۷). از منظر دیگر، سرعت باد یکی از عواملی بسیار مهم و اثرگذار در شدت حمل ذرات رسوب است (۲۴) که در هر منطقه، از یک الگوی کلی بر اساس موقعیت جغرافیایی و فصلی آن پیروی می‌کند (۳۰). از طرفی، فراوانی، مدت و جهت بادهای فرسایشی از سالی به سال دیگر متفاوت است و حتی ممکن است از یک رخداد تا رخداد بعدی و یا حتی در طول یک رخداد تغییر کند (۳۲ و ۳۸). به‌طور معمول، بیش‌ترین مقدار ذرات رسوب در جهت باد غالب جابه‌جا می‌شود (۲۷).

پدیده شناسایی و اولویت‌بندی کرد. تفاوت گل‌ماسه با گل‌باد در این است که بازوهای گل‌ماسه برداری است و جهت آن‌ها پتانسیل حمل رسوب را نشان می‌دهد (۱ و ۳).

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه تحلیل بادهای مناطق مختلف ایران انجام شده است (۱۱) و (۱۹). بررسی بادهای فرساینده شهرستان دامغان توسط حنیفه‌پور و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که جهت بادهای غالب این شهرستان شمال‌غربی بوده و جهت وزش بادهای فرساینده با سرعت بیش از ۶/۵ متر بر ثانیه، در طول سال بیش‌تر از سمت شمال‌غربی می‌باشد هر چند، ۶۱/۲ درصد بادهای حاکم در منطقه آرام بود (۱۱). نظری سامانی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های ۴۷ ساله ایستگاه سینوپتیک تهران مهرآباد نشان دادند که جهت باد غالب در این منطقه، غربی بوده اما در فصل تابستان غالبیت باد به جهت جنوب‌شرقی تغییر می‌یابد. همچنین آن‌ها بر اساس سرعت آستانه باد برابر با ۶/۵ متر بر ثانیه، حدود ۱۲ درصد از داده‌های ثبت شده را در شرایط طوفانی کلاس‌بندی کردند (۱۹). نتایج مطالعه صارمی نائینی (۲۰۱۶) در تحلیل بادهای فرساینده و تحلیل گل‌ماسه‌ها در استان یزد نشان داد که جهت وزش بادهای، شمال‌غربی و غربی است و این بادهای جابجایی ماسه‌های روان نقش مهمی ایفا می‌کنند. آن‌ها دریافتند که احتمال وقوع بادهای فرساینده در استان یزد و در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل بهار و پاییز به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین فراوانی را دارد (۲۳). نتایج مطالعه انواری و محمدی (۲۰۰۹) در منطقه زابل نشان داد که طی ۸ ماه از سال بادهای از سمت شمال و در ۴ ماه دیگر سال از سمت شمال‌غربی می‌وزد. آن‌ها همچنین نشان دادند که مهم‌ترین رخساره‌های منطقه برداشت در این منطقه، در شمال‌غربی قرار گرفته است (۳). نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که تولید غبار در یزد

برای تحلیل وضعیت بادناکی و شرایط پویایی باد، از روش‌ها، پارامترها، شاخص‌ها و نمودارهای متفاوتی استفاده می‌شود که نمودارهای گل‌باد، گل‌طوفان و گل‌ماسه از آن جمله هستند. گل‌باد، ساده‌ترین روش آماری برای نمایش داده‌های بادسنجی است که در آن بادهای آرام و جهت بادهای تندتر از ۰/۵ متر بر ثانیه را به تفکیک کلاس‌های سرعت در هر یک از جهات مشخص می‌کند (۱۱). در واقع، گل‌باد صرفاً تحلیل سینوپتیکی و هواشناسی باد است و از طریق آن می‌توان تا حدی به جهت و فراوانی شدیدترین بادهای موجود در منطقه پی برد. با این وجود اما، گل‌باد شاخص دقیقی برای بررسی و تحلیل طوفان‌های فرساینده نیست زیرا درصد زیادی از بادهایی که در گل‌بادها نشان داده می‌شود، در ایجاد طوفان‌های گرد و غبار مؤثر نیستند (۱۹ و ۲۱). گل‌طوفان به‌منظور در نظر گرفتن هم‌زمان سرعت و جهت باد و سرعت آستانه فرسایش بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع گل‌طوفان نوعی گل‌باد است که با در نظر گرفتن شرایط مربوط به سرعت آستانه فرسایش تفسیر دقیق‌تری از وضعیت فرسایش هر منطقه ارائه می‌کند. در بیش‌تر پژوهش‌هایی که در زمینه بررسی فرسایش‌نگی باد و تحلیل آن در کشور انجام شده، روش فرایبرگر مورد استفاده قرار گرفته است (۹، ۱۱ و ۲۳). به‌طور معمول طبق این روش، سرعت آستانه فرسایش بادی ۶/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود (۱۹). لازم به ذکر است که تعیین مقدار واقعی سرعت آستانه در شرایط صحرائی وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و از طرفی، برای یک منطقه با ویژگی‌های متفاوت خاک، میزان سرعت آستانه متفاوت است (۳۷). علاوه بر این، برآورد پتانسیل حمل ماسه نیز یکی از مراحل تحلیل فرسایش‌نگی باد در ارتباط با فرسایش بادی است که با استفاده از رسم گل‌ماسه انجام می‌شود. با تفسیر گل‌ماسه می‌توان رخساره‌های فرسایش بادی را بر اساس پتانسیل حمل ماسه در راستای مهار این

خاک با استفاده از دستگاه تونل باد نشان از انتخاب‌پذیری ذرات ریز در حمل به‌وسیله باد داشت (۱۵). به‌طورکلی توزیع اندازه ذرات اولیه و ثانویه خاک اثر قابل‌توجهی بر شدت فرسایش بادی دارد (۱۴).

توانایی پیش‌بینی فرسایش بادی برای اهدافی مانند برنامه‌های حفاظتی، احیای منابع طبیعی و کاهش آلودگی هوا ضروری است. با توجه به ارتباط قدرت فرسایش‌دهی باد با مقدار سرعت باد، دانستن توزیع سرعت باد و همچنین چگونگی تغییرات جهت باد به‌منظور پیش‌بینی و کنترل فرسایش بادی دارای اهمیت است (۱۰، ۱۸ و ۲۵). از طرفی، تندبادها و وزش بادهای همراه با هجوم شن‌های روان در مناطق خشک باعث تخریب و خسارت زیادی در این نواحی شده است. استان کرمان همواره از این بادهای که خسارات و تخریب‌های قابل‌توجهی در پی داشته، متأثر بوده است. تاکنون هیچ پژوهش مدون و جامعی در زمینه تحلیل باد برای کل مناطق استان کرمان انجام نشده و اطلاعات و داده‌های موجود نیز به‌صورت پراکنده می‌باشد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف تعیین جهت غالب فراوانی، سرعت بادهای و طوفان‌های ایستگاه‌های استان کرمان بر اساس اطلاعات موجود و همچنین تعیین پتانسیل حمل ماسه و جهت آن انجام شد. در این راستا، با استفاده از آمار ۱۲ ایستگاه سینوپتیک فعال استان طی یک بازه ۸ تا ۱۱ ساله، تحلیل باد از طریق گل‌باد، گل‌طوفان و گل‌ماسه و شاخص‌های مرتبط انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند در راستای شناخت بهتر وضعیت سمت و سرعت بادهای استان کرمان و در نتیجه شناخت بهتر انتقال رسوبات بادی در راستای ارائه راهکارهای مدیریتی و حفاظتی مفید باشد.

### مواد و روش‌ها

**مشخصات محدوده مورد مطالعه:** استان کرمان با مساحت حدود ۱۸۰۴۲۴ کیلومترمربع بین ۲۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۳ درجه و

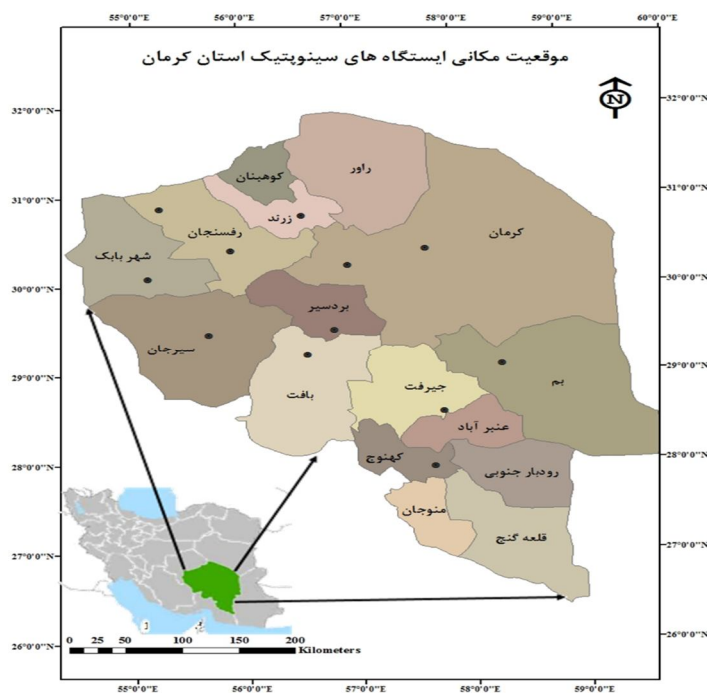
به‌طور عمده از جهت‌های غرب و شمال‌غرب صورت می‌گیرد. همچنین آن‌ها دریافتند مناطق حساس در برابر فرسایش نقش مهمی در تولید طوفان‌های گرد و غبار دارند (۲). در پژوهش جامعی، میرزامصطفی و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از آمار ۱۰ ساله مربوط به ۳۸ ایستگاه سینوپتیک کشور از توزیع ویبول برای پیش‌بینی سمت و سرعت باد استفاده کردند. این پژوهشگران دریافتند که داده‌های سرعت باد از توزیع ویبول پیروی می‌کند و بنابراین استفاده از این توزیع در شبیه‌سازی سرعت باد قابل‌قبول است (۱۸).

شدت و جهت حمل ذرات رسوب ناشی از فرسایش بادی نیز از طریق تحلیل باد قابل بررسی است. تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی پنج ایستگاه سینوپتیک مختلف در سواحل جنوبی ایران توسط اختصاصی و دادفر (۲۰۱۴) نشان داد که جهت باد غالب بیشتر غربی است و در عین‌حال، بادهای طوفان‌زا بیشتر از جهت غرب و جنوب‌غرب می‌وزد که با مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه منطبق است (۶). این پژوهشگران همچنین شاخص همگنی (UDI) را که نسبت بردار برآیند حمل ماسه به کل توان حمل ماسه است، به‌عنوان یکی از شاخص‌های مناسب تحلیل گل‌ماسه در ایستگاه‌های مورد بررسی عنوان کردند (۶). از طرف دیگر، یافتن ارتباط بین قطر ذرات ماسه و نیروی فرساینده باد می‌تواند نشانگر خوبی برای مسیر انتقال ماسه و حتی مکانیزم‌های حمل رسوب باشد. در برخی پژوهش‌ها، مقایسه داده‌های رسوب‌سنجی نشان از ارتباط آستانه فرسایش بادی با قطر ذرات و نیز مورفومتری تپه‌های ماسه‌ای داشته است (۱۳، ۱۵ و ۳۴). در این زمینه، یمانی (۲۰۰۱) به بررسی ارتباط بین قطر ذرات ماسه و فراوانی سرعت‌های آستانه باد در منطقه ریگ کاشان پرداخت (۳۴). نتایج محمودآبادی و زمانی (۲۰۱۲) در بررسی تأثیر متقابل سرعت باد و توزیع اندازه ذرات

تغییرات شدید درجه حرارت و وقوع گرد و غبار می‌شود. هر ساله به‌علت وزش این بادهای و جریان ماسه‌های روان به‌سمت مزارع و باغات، خسارت فراوانی به کشاورزان منطقه وارد می‌شود.

در پژوهش حاضر، به‌منظور تحلیل وضعیت بادناکی و بررسی بادهای فرساینده استان کرمان از داده‌های هواشناسی ۱۲ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۸ تا ۱۱ ساله بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. لازم به ذکر است که برای برخی ایستگاه‌های مورد مطالعه، تعداد سال آماری موجود کم‌تر از ۱۱ سال بود. موقعیت مکانی این ۱۲ ایستگاه بر روی نقشه استان کرمان در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ خلاصه‌ای از وضعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه همراه با دوره آماری آن‌ها و میانگین سرعت باد هر یک ارائه شده است. بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار متوسط سرعت باد در ایستگاه‌های رفسنجان و جیرفت به‌ترتیب با ۴/۱ و ۲/۲ متر بر ثانیه رخ داده است.

۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان با دربرگرفتن حدود ۱۱ درصد از مساحت کشور بخش وسیعی از ناحیه جنوب‌شرقی فلات مرکزی ایران را می‌پوشاند. به‌طورکلی استان کرمان از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی جز اقلیم نیمه‌خشک بیابانی گرم محسوب می‌شود. از ویژگی‌های این استان می‌توان به وسعت قابل‌توجه، وجود پستی و بلندی‌ها و شرایط خاص اقلیمی در نواحی مختلف آن اشاره کرد. از این رو، همه فعل و انفعالات پیچیده و خشن طبیعی مربوط به شرایط آب و هوای خشک و شدید کویری را دارد. دوری از دریا و وزش بادهای گرم و خشک از سمت کویر، باعث مقدار کم بارش در این استان و ضعف پوشش گیاهی می‌شود. علاوه بر این، بین فصول سرد و گرم و حتی در شب و روز درجه حرارت هوا اختلاف شدیدی را نشان می‌دهد و این موجب جابه‌جاشدن هوا از نقاط مرتفع کوهستانی به طرف نقاط پست و ایجاد جریان‌های نامنظم همراه با



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر روی نقشه استان کرمان.

Figure 1. Spatial location of the studied stations on the map of Kerman province.

جدول ۱- مشخصات کلی ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمان.

Table 1. General characteristics of the meteorological stations in Kerman province.

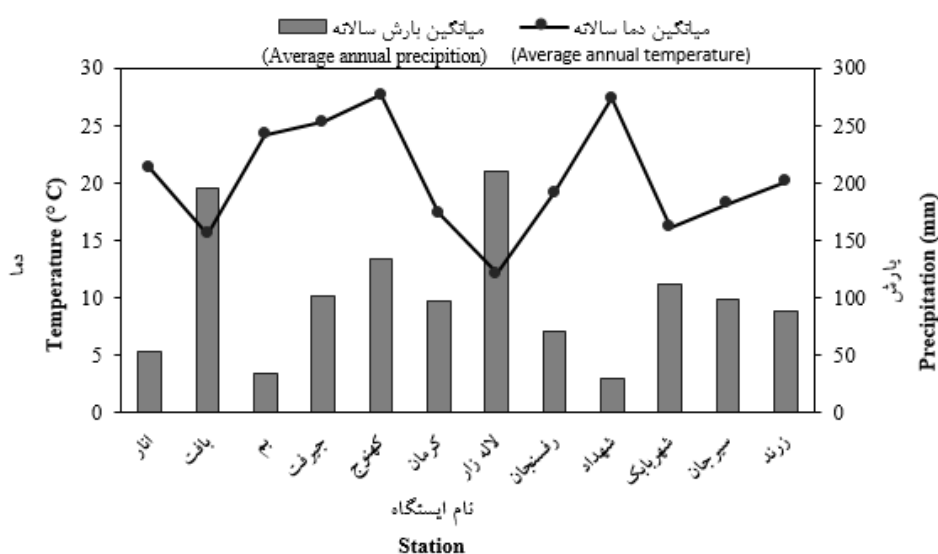
دوره آماری Statistical period (y)	میانگین سرعت باد Mean wind velocity (m s <sup>-1</sup> )	ارتفاع از سطح دریا (m)	عرض جغرافیایی Latitude		طول جغرافیایی Longitude		ایستگاه Station
			دقیقه Minutes	درجه Degree	دقیقه Minutes	درجه Degree	
2000-2010	2.6	2280	14	29	35	56	بافت Baft
2000-2010	3.8	1066.9	06	29	21	58	بم Bam
2000-2010	2.2	601	28	35	48	57	جیرفت Jiroft
2000-2010	3.4	469.7	58	27	42	57	کهنوج Kahnooj
2000-2010	2.7	1753.8	15	30	58	56	کرمان Kerman
2003-2010	3.8	2775	31	29	50	56	لاله‌زار Lalezar
2000-2010	4.1	1580.9	25	30	24	55	رفسنجان Rafsanjan
2003-2010	2.8	400	24	30	40	57	شهداد Shahdad
2000-2010	2.8	1834.1	06	30	08	55	شهربابک Shahrbabak
2000-2010	2.3	1739.4	28	29	41	55	سیرجان Sirjan
2003-2010	2.9	1670	48	30	34	56	زرند Zarand

شهداد با ۳۰ میلی‌متر به‌ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین متوسط بارش طی سال‌های مورد مطالعه برخوردار بوده‌اند. مقادیر میانگین بارش با ارتفاع از سطح دریا ایستگاه‌های مورد مطالعه همخوانی دارد به‌نحوی‌که، طبق جدول ۱، ایستگاه شهداد با ۴۰۰ متر کم‌ارتفاع‌ترین و ایستگاه لاله‌زار با ۲۷۷۵ متر از سطح دریا بلندترین ارتفاع را دارند.

در شکل ۲ میانگین درجه حرارت و بارش سالانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات این شکل، ایستگاه لاله‌زار با ۱۲ درجه سانتی‌گراد کم‌ترین و ایستگاه‌های شهداد و کهنوج با ۲۷ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین درجه حرارت را در بین ایستگاه‌های مورد نظر و در کل دوره آماری به خود اختصاص دادند. شکل ۲ همچنین نشان می‌دهد که ایستگاه لاله‌زار با ۲۰۹ میلی‌متر و ایستگاه

تبدیل داده‌ها به فرمت LAKE و پس از پردازش اطلاعات با استفاده از این نرم‌افزار، کلاس‌های سرعت باد تعریف و گل‌بادهای ایستگاه‌های سینوپتیک به صورت سالانه ترسیم شد. لازم به ذکر است که طبقه‌بندی کلاس‌های سرعت باد، مطابق پیش فرض نرم‌افزار WR Plot View.8 صورت گرفت.

روش‌های تجزیه و تحلیل باد: ساده‌ترین و متداول‌ترین روشی که در تحلیل داده‌های بادسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، رسم گل‌باد است. برای ترسیم گل‌باد نرم‌افزارهای متعددی ارائه شده که یکی از آن‌ها برنامه WR Plot View.8 است (۷) و در این پژوهش از آن استفاده شد. به این منظور بعد از



شکل ۲- مقایسه مقادیر میانگین درجه حرارت و بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Figure 2. Comparison of the annual mean values of temperature and precipitation for the studied stations.

بنابراین در نظر گرفتن هر عددی به عنوان سرعت آستانه نمی‌تواند گویای وضعیت کل منطقه باشد. البته فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) گزارش کردند که اگرچه با این فرض شاید نتوان با دقت زیادی پتانسیل حمل ماسه را پیش‌بینی کرد، اما برای مقایسه مناطق دنیا مناسب است (۹). همچنین، یانگ و همکاران (۲۰۱۴) عنوان کردند که سرعت آستانه بستگی به بسیاری از عوامل مانند اندازه ذرات، رطوبت خاک و ترکیب مواد دارد و تعیین آن در مطالعات صحرائی با مقیاس وسیع بسیار مشکل است (۳۶). از این‌روست که در بسیاری از پژوهش‌ها که با هدف بررسی پتانسیل حمل ماسه انجام می‌شود، سرعت آستانه فرسایش بادی ثابت در

در تحلیل داده‌های باد به منظور مطالعه فرسایش بادی، نمی‌توان به فراوانی، جهت و سرعت باد و صرفاً رسم گل‌باد اکتفا نمود. بنابراین علاوه بر گل‌باد، با حذف سرعت‌های کم‌تر از آستانه احتمالی فرسایش بادی (۶/۵ متر بر ثانیه)، گل‌طوفان ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم شد. لازم به ذکر است در پژوهش‌های متعدد گذشته این حد آستانه فرسایش بادی برای ترسیم گل‌طوفان مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱، ۱۹ و ۲۳). مقدار سرعت آستانه فرسایش بادی برای خاک‌های یک منطقه یک عدد واحد و ثابت نیست که به دلیل تفاوت در ویژگی‌های خاک‌های یک منطقه، مقدار آن متغیر است (۲۵).

(VU<sup>۲</sup>) تعریف می‌شود که با رسم آن‌ها در هشت جهت، گل‌ماسه ترسیم می‌گردد (۷ و ۹). مجموع این مقادیر محاسبه شده در جهات مختلف به‌عنوان کل توان حمل ماسه (DP<sub>T</sub><sup>۳</sup>) در نظر گرفته می‌شود (۳۶) و (۴۰). این شاخص بیانگر کل انرژی باد برای حمل ماسه در منطقه یا ایستگاه موردنظر می‌باشد. با جمع بردارهای بازوهای گل‌ماسه می‌توان به بردار برآیند حمل ماسه (RDP<sup>۴</sup>) دست یافت. شاخص RDP بیانگر مقدار یا اندازه بردار برآیند یا بردار منتهی‌توان حمل ماسه می‌باشد که از جمع برداری مقادیر DP در جهات مختلف حاصل می‌شود و وضعیت نهایی حمل ماسه را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. علاوه بر این، شاخص جهت حمل ماسه (RDD<sup>۵</sup>) نیز برای تعیین مسیر خالص حرکت ماسه یا جهت بردار منتهی‌توان ایستگاه‌های مورد نظر به‌دست آمد. طبق تقسیم‌بندی قدرت فرسایشی باد در محیط‌های بیابانی توسط فرایبرگر و دین (۱۹۷۹)، در منطقه‌ای که شاخص توان حمل ماسه (DP<sub>T</sub>) کم‌تر از ۲۰۰ و بیش‌تر از ۴۰۰ به‌دست آید، قدرت فرسایشی باد به‌ترتیب کم و زیاد است. همچنین اگر این شاخص بین ۲۰۰ و ۴۰۰ باشد، بیانگر آن است که منطقه مورد مطالعه از نظر انتقال ماسه بادی در وضعیت متوسط قرار دارد (۹). علاوه بر این موارد، شاخص همگنی جهت باد (UDI) نیز برای تحلیل جهت باد تعیین شد که طبق رابطه ۱ عبارت از نسبت مقدار نهایی حمل ماسه (اندازه بردار منتهی‌توان) به کل توان حمل ماسه است. فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) با استفاده از این شاخص، تغییرپذیری جهت باد را طبق جدول ۲ طبقه‌بندی کردند (۹).

$$UDI = \frac{RDP}{DPt} \quad (1)$$

- 2- Vector Unit
- 3- Total Drift Potential
- 4- Resultant Drift Potential
- 5- Resultant Drift Direction

نظر گرفته می‌شود (۴۰). با توجه به مطالب گفته شده و با در نظر گرفتن سرعت آستانه، گل‌طوفان قادر است که تحلیل بهتری نسبت به گل‌باد از وضعیت فرسایشی بادهای منطقه و جهت آن را در اختیار پژوهشگران قرار دهد (۲۱). با استفاده از نرم‌افزار WR Plot View علاوه بر رسم گل‌بادهای استاندارد با سرعت پایه ۱ نات (۰/۵ متر بر ثانیه)، با در نظر گرفتن سرعت پایه برابر با سرعت آستانه فرسایش بادی، گل‌طوفان مربوط به هر ایستگاه نیز ترسیم شد (۱۷ و ۲۸).

علاوه بر این، گل‌ماسه نیز برای ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم شد. با توجه به حجم بالای محاسبات برای این تعداد سال آماری و ایستگاه، برای تحلیل بادهای و نیز رسم گل‌ماسه از نرم‌افزار گل‌ماسه‌نما Sand Rose Graph 3 استفاده شد (۱۹ و ۲۱). این نرم‌افزار قادر است به نحو مطلوبی توان و جهت حمل ماسه توسط باد را نشان دهد (۱، ۱۹ و ۲۱). نرم‌افزار یادشده بر اساس معادله‌ها و روابط پیشنهادی فرایبرگر و لتو طراحی شده است (۷). پارسامهر و خسروانی (۲۰۱۷) گزارش کردند که گل‌ماسه‌های رسم شده به‌وسیله این نرم‌افزار قادرند توان حمل ماسه توسط باد و جهت آن را به‌خوبی توصیف کنند (۲۱). همچنین این نرم‌افزار قادر است با دریافت داده‌های بادسنجی ایستگاه‌های موردنظر و همچنین سرعت آستانه فرسایش بادی، تحلیل سریع داده‌های بادسنجی و محاسبه مقادیر رسوبات منتقل شده در جهات مختلف و دیگر شاخص‌های گل‌ماسه را که در شناخت فرسایش بادی بسیار اهمیت دارند، ممکن سازد.

برای رسم گل‌ماسه ابتدا سرعت‌هایی که بیش‌تر از سرعت آستانه فرسایش بادی بود به واحدهای برداری به نام توان حمل ماسه (DP<sup>۱</sup>) تبدیل شد (۷). واحد بازوها در گل‌ماسه بر اساس یک واحد برداری

- 1- Drift Potential



جدول ۲- طبقه‌بندی و تغییرپذیری جهت باد بر اساس شاخص همگنی جهت باد (UDI).

Table 2. The classification and variability of wind direction based on the Uni-Directional Index (UDI).

تغییرپذیری باد Variability of wind	طبقه‌بندی جهت‌های باد Classification of wind directions	شاخص همگنی جهت باد UDI index
کم Low	بادهای یک جهته One-way winds	> 0.8
متوسط Medium	بادهای دو جهته با زاویه منفرجه Bi-directional winds with an obtuse angle	0.3-0.8
زیاد High	بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند Multi-directional winds with an acute angle	< 0.3

### نتایج و بحث

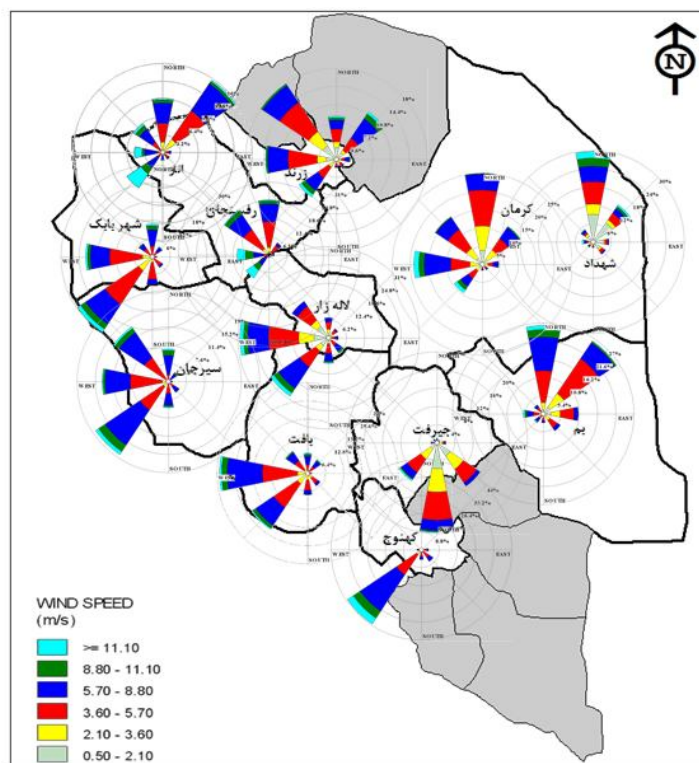
در ایستگاه‌های رفسنجان و بافت نیز به ترتیب ۸ و ۸/۱ درصد از داده‌های ثبت شده سرعت باد، کم‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه بود. در ایستگاه کرمان به عنوان مهم‌ترین ایستگاه استان، ۱۰ درصد از کل ساعات دیده‌بانی سالانه، هوا آرام است. در کل، گل‌بادهای سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بادهای غالب بین ایستگاه‌های مورد مطالعه متفاوت است که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از شرایط جغرافیایی، مرفولوژیکی و بادناکی هر منطقه باشد (۲۱، ۳۴ و ۳۵). ناگفته نماند که در کل استان، جهت بادهای غالب دارای روند نظام‌مندی است به نحوی که در نیمه غربی، بادهای با جهت غربی و جنوب‌غربی و در نیمه شرقی استان بادهای شمالی غالب هستند.

به منظور بررسی طوفان‌خیزی مناطق مختلف استان و مطالعه بادهای فرساینده آن، گل‌طوفان‌های ایستگاه‌های دوازده‌گانه ترسیم شد (شکل ۴). نتایج این قسمت نشان داد که اگرچه درصد فراوانی بادهای طوفان‌خیز نسبت به کل بادهای ثبت شده نسبتاً ناچیز است، اما همه فعالیت‌های فرسایشی ناشی از باد مانند برداشت، حمل و رسوب‌گذاری مربوط به این نوع بادها می‌باشد (۳۴). نتایج گل‌طوفان‌های سالانه بیانگر آن است که بادهای غربی و جنوب‌غربی در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین نقش را در

در شکل ۳ گل‌بادهای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان به صورت سالانه نمایش داده شده است. همان‌گونه که جهت این گل‌بادها نشان می‌دهد، در بیش‌تر ایستگاه‌ها، بادها چندجهته است که البته در یک یا دو جهت باد، غالب است. در مجموع، در ایستگاه‌های واقع در نیمه غربی استان، فراوان‌ترین بادها عمدتاً از جهت غرب و جنوب‌غربی وزیده و در ایستگاه‌های نیمه شرقی، جهت غالب باد شمالی است. نتایج گل‌بادها هم‌چنین نشان می‌دهد که ۳۵/۹ درصد بادهای ایستگاه جیرفت کم‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه سرعت داشته و از این نظر جز بادهای آرام قرار می‌گیرند و بنابراین، بین تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه جیرفت بیش‌ترین فراوانی باد آرام را دارد. در این خصوص ایستگاه‌های انار و شهداد به ترتیب با ۳۳/۲ و ۳۲/۶ درصد در رتبه دوم و سوم قرار دارند. از سوی دیگر، ایستگاه لاله‌زار که مرتفع‌ترین ایستگاه در بین همه ایستگاه‌ها است، با ۱/۹ درصد، کم‌ترین فراوانی باد آرام را به خود اختصاص داد. این مسأله نشان می‌دهد که بیش از ۹۸ درصد بادها در این منطقه دارای سرعت بالای ۰/۵ متر بر ثانیه هستند.

بادهای غربی و جنوب‌غربی است هر چند در فصل تابستان جریان‌های موسمی باد وجود دارد (۶). با توجه به حاکمیت شرایط اقلیمی خشک، همواری سطح زمین، رطوبت اندک خاک و وجود ذرات ریزدانه در سطح، فرسایش بادی در این منطقه شدید است.

فرسایش بادی به خود اختصاص داده است. البته در ایستگاه‌های شهداد و بم فرساینده‌ترین بادهای از جهت شمال و در ایستگاه زرنند نیز جهت غالب باد فرساینده از جهت‌های شمال‌شرق و جنوب‌غرب دیده می‌شود. در پژوهش‌های قبلی مشخص شده که بخش جنوبی ایران به‌طور عمده در تمام فصول سال تحت تأثیر

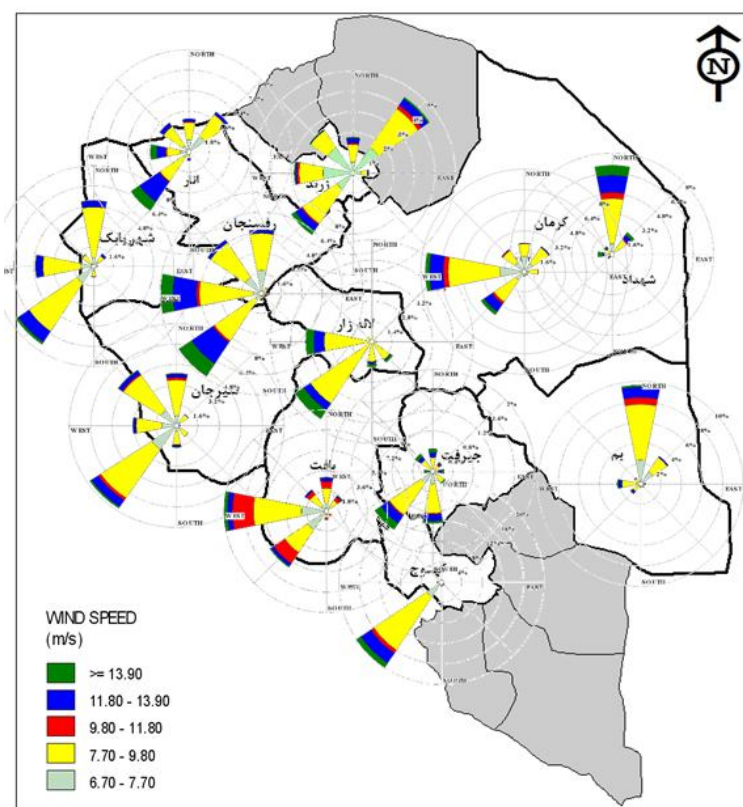


شکل ۳- گل‌باد سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان.

Figure 3. Annual Wind Roses of the synoptic stations of Kerman province.

باشند (۳۵ و ۳۷). در مجموع، نتایج تحلیل گل‌طوفان در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که با حذف بادهای غیرفرساینده، فرساینده‌ترین بادهای در اغلب ایستگاه‌ها از جهت‌های غرب و جنوب‌غرب وزیده و تنها در ایستگاه‌های بم و شهداد از جهت شمال و در ایستگاه زرنند از جهت‌های شمال‌شرق و جنوب‌غرب وزیده است. این موضوع از نظر تعیین منشأ رسوبات فرسایش بادی و نیز انجام عملیات حفاظتی دارای اهمیت است.

تحلیل گل‌طوفان‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که فرسایش بادی در این استان اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا از یک طرف به دلیل وزش بادهای طوفان‌زا، عامل فرساینده‌گی باد قابل‌توجه بوده و از طرفی با توجه به بارش‌های اندک و میزان تبخیر بالای نقاط مختلف استان (شکل ۲)، می‌توان انتظار داشت که در اثر رطوبت اندک خاک‌ها و در نتیجه ضعف پوشش گیاهی، خاک‌های این استان احتمالاً در اکثر مناطق حساسیت بالایی در برابر فرسایش بادی داشته



شکل ۴- گل طوفان سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان.

Figure 4. Annual Storm Roses of the synoptic stations of Kerman province.

کم‌تر از  $6/7$  متر بر ثانیه داشتند. ایستگاه سیرجان با  $8/0$  درصد و ایستگاه کهنوج با  $12$  درصد به ترتیب بیش‌ترین فراوانی را در کلاس‌های سرعت  $6/7$  تا  $7/7$  و  $7/7$  تا  $9/8$  متر بر ثانیه دارا بودند. در کلاس‌های سرعت  $9/8$  تا  $11/8$ ،  $11/8$  تا  $13/9$  و بیش‌تر از  $13/9$  متر بر ثانیه، ایستگاه رفسنجان به ترتیب با اختصاص  $10/9$ ،  $5/0$  و  $4/1$  درصد، بیش‌ترین فراوانی را در بین همه ایستگاه‌ها نشان داد. این موضوع نشان از فرسایندگی بیش‌تر باد به خصوص در کلاس‌های سرعت بیش‌تر باد در ایستگاه رفسنجان دارد.

در جدول ۳ فراوانی کلاس‌های سرعت باد در گل‌طوفان‌های حاصل، نشان داده شده که طبقه‌بندی این کلاس‌های سرعت، بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار است. مجموع طبقات مختلف سرعت باد در این جدول، برابر با  $100$  درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین فراوانی بادهای فرساینده مربوط به کدام کلاس سرعت باد است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه جیرفت با  $94/9$  درصد و ایستگاه رفسنجان با  $37/2$  درصد، به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین درصد فراوانی باد را در کلاس سرعت

جدول ۳- توزیع کلاس‌های مختلف سرعت باد طبق تحلیل گل‌طوفان در ایستگاه‌های استان کرمان طی دوره آماری مورد مطالعه.

**Table 3. Distribution of wind speed classes based on the Storm Rose analysis for different stations of Kerman province during the studied period.**

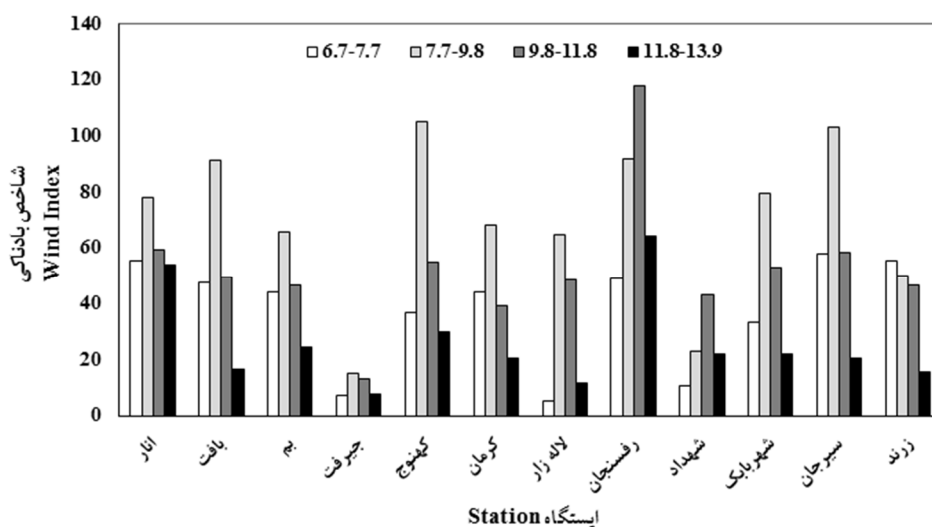
13.9≥	11.8-13.9	9.8-11.8	7.7-9.8	6.7-7.7	باد آرام Calm	سرعت باد	ایستگاه Station
						Wind Speed (m s <sup>-1</sup> )	
3.4	4.2	5.5	8.9	7.7	70.3	انار Anar	کل بادهای وزیده شده Total winds (%)
0.6	1.3	4.6	10.4	6.6	76.5	بافت Baft	
0.8	1.9	4.3	7.5	6.1	79.4	بم Bam	
0.7	0.6	1.2	1.7	1.0	94.9	جیرفت Jiroft	
2.2	2.3	5.1	12.0	5.1	73.3	کهنوج Kahnooj	
1.1	1.6	3.6	7.8	6.1	79.8	کرمان Kerman	
2.3	0.9	4.5	7.4	0.7	84.3	لاله‌زار Lalezar	
4.1	5.0	10.9	10.5	6.8	62.8	رفسنجان Rafsanjan	
2.1	1.7	4.0	2.6	1.5	88.1	شهداد Shahdad	
1.0	1.7	4.9	9.1	4.6	78.8	شهربابک Shahrabak	
0.7	1.6	5.4	11.8	8.0	72.5	سیرجان Sirjan	
0.9	1.2	4.3	5.7	7.7	80.2	زرند Zarand	

(۲۹). همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در ۱۰ ایستگاه از ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه، شاخص بادناکی در کلاس سرعت ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه بیش‌تر از سایر کلاس‌های سرعت است. این در حالی است که در دو ایستگاه رفسنجان و شهداد، شاخص بادناکی در کلاس سرعت ۹/۸ تا ۱۱/۸ متر بر ثانیه بیش‌تر از سایر کلاس‌های سرعت باد است. به‌طور

شکل ۵ شاخص بادناکی ایستگاه‌ها را در طول دوره آماری مورد مطالعه و در ۴ کلاس سرعت بیش‌تر از آستانه نشان می‌دهد. در محاسبه شاخص بادناکی، سرعت و فراوانی باد به‌طور توأم در نظر گرفته می‌شود، بنابراین هرچه این شاخص در هر یک از کلاس‌های سرعت باد مقدار بیش‌تری داشته باشد، قدرت فرساینده‌گی باد نیز در آن کلاس بیش‌تر است

کلاس‌های سرعت باد مربوط به ایستگاه جیرفت بود که از شدت فرسایش بادی کمی نیز نسبت به دیگر مناطق برخوردار است که به رطوبت بالاتر هوا و خاک‌های این منطقه و وجود کوه‌های مرتفع مشرف بر آن مرتبط است.

کلی در کلاس سرعت ۱۱/۸ تا ۱۳/۹ و همچنین ۹/۸ تا ۱۱/۸ متر بر ثانیه ایستگاه رفسنجان بیش‌ترین فرسایندها را در بین دیگر ایستگاه‌ها نشان داد. اگرچه در کلاس سرعت ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه بیش‌ترین شاخص بادناکی به ایستگاه کهنوج تعلق گرفت. همچنین کم‌ترین شاخص بادناکی در تمامی



شکل ۵- شاخص بادناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه در چهار کلاس سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه.

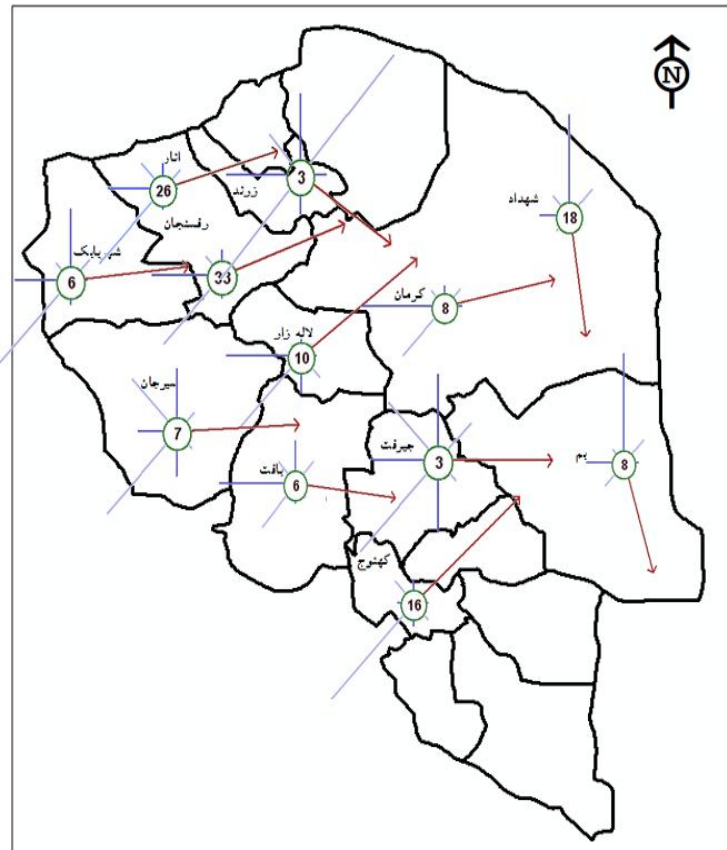
Figure 5. Wind index of the stations at four classes of wind speed (m s<sup>-1</sup>).

جنوب‌غربی هستند که از سمت دریا وارد سواحل ایران می‌شوند (۶). از طرفی، قدرت حمل مستقیم باد بیش‌تر محدود به ذراتی می‌شود که قطر کم‌تر از ۲ میلی‌متر داشته باشند (۳۴). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بالا بودن نسبت ذرات شن با اندازه ریزتر از ۲۵۰ میکرون، ضعف پوشش گیاهی و کمی بارش‌ها، محیط مناسبی را برای گسترش فرسایش بادی مهیا می‌سازد. نتایج لرستانی و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که تغییر در جهت، سرعت و فراوانی وزش باد در طول سال به‌عنوان عوامل مهم در فرسایندها و بادها است که پراکنش قطر ذرات شن در برخان‌ها و در نتیجه مرفولوژی آن‌ها را به‌عنوان یکی از رخساره‌های فرسایش بادی، تغییر می‌دهد (۱۳).

نتایج بررسی یمانی (۲۰۰۱) نشان داد که بادهای غالب در کرمان عمدتاً از دو نیمه شمالی و غربی می‌وزند که این تغییر جهت وزش فصلی بادها را به گسترش دامنه سامانه کم‌فشار حرارتی و مسلط در چاله لوت مرتبط دانست (۳۴). چاله لوت کم‌ارتفاع‌ترین و خشک‌ترین نقطه داخلی ایران است که منطقه کرمان را که در حاشیه آن قرار گرفته، متأثر از خود قرار داده است. به‌طورکلی، بررسی بادهای فرساینده در بیش‌تر مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، بیانگر قابلیت بالای فرسایش بادی در این مناطق است. در این زمینه، اختصاصی و دادفر (۲۰۱۴) به تحلیل گل‌طوفان‌های بخش جنوبی ایران پرداختند و دریافتند که این مناطق، بیش‌تر تحت‌تأثیر بادهای فرساینده غربی و

دارد. در حقیقت بردار برآیند انتقال و جابجایی رسوب در جهات مختلف، به‌عنوان جهت اصلی جریان ماسه در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که با استفاده از گل‌باد به‌تنهایی نمی‌توان به مؤثرترین بادهای دخیل در فرسایش بادی در جهت غالب باد دست یافت. بنابراین استفاده از گل‌طوفان و گل‌ماسه با در نظر گرفتن سرعت آستانه احتمالی فرسایش بادی، می‌توان به تحلیل دقیق‌تری از وضعیت فرسایش بادی منطقه دست یافت. به‌علاوه چون که در ترسیم گل‌طوفان و گل‌ماسه، از سرعت‌های باد کم‌تر از سرعت آستانه صرف‌نظر می‌شود، بنابراین ممکن است که تحلیل جهت بادهای فرساینده بر اساس گل‌باد با تحلیل گل‌طوفان و گل‌ماسه یکسان نباشد (۲۱).

در شکل ۶ گل‌ماسه‌های سالانه مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان مشاهده می‌شود. تحلیل جهت بردار برآیند حمل ماسه (RDD) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که جهت حرکت ماسه‌ها در ایستگاه‌های واقع در نیمه غربی استان (کرمان، جیرفت، بافت، سیرجان، شهربابک، انار، رفسنجان، کهنوج و لاله‌زار) به سمت شرق و شمال‌شرق است. جهت حرکت حمل ماسه در ایستگاه زرنند از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی و در ایستگاه‌های نیمه شرقی یعنی ایستگاه‌های شهداد و بم از سمت شمال به سمت جنوب است. این جهت‌ها با جهت‌های حاصل از تحلیل گل‌طوفان همخوانی نسبی دارد که نشان از نظام‌مند بودن روند تغییرات جهت باد و همچنین قابل قبول بودن نتایج حاصل از گل‌طوفان

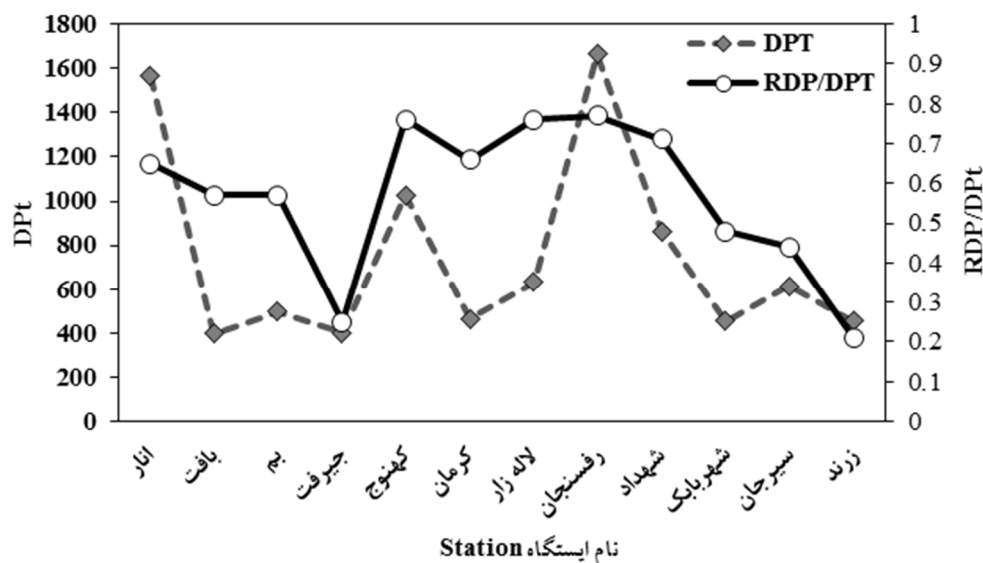


شکل ۶- گل‌ماسه‌های سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان.

Figure 6. Annual Sand Roses of the synoptic stations of Kerman province.

بین همه ایستگاه‌ها، ایستگاه رفسنجان قدرت فرسایش بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. ناگفته نماند که شدت فرسایش بادی، علاوه بر قدرت فرسایش بادی به فرسایش‌پذیری خاک نیز وابسته است. بنابراین برای تحلیل واقعی‌تر شدت فرسایش هر منطقه لازم است که اطلاعات فرسایش‌پذیری خاک‌ها و نیز سرعت آستانه فرسایش در دسترس باشد. هرچه قطر و فراوانی ذرات ریزدانه در سطح خاک بیشتر باشد، سرعت حرکت برخان نیز بیشتر می‌باشد. از همین رو، در فصل تابستان به دلیل خشکی هوا و خاک و کمبود رطوبت آن‌ها، چسبندگی بین ذرات ماسه از بین رفته و شرایط مناسب‌تری برای حرکت ماسه‌های روان فراهم می‌شود (۱۳).

نتایج حاصل از تعیین شاخص‌های گل ماسه در قالب شاخص‌های  $DP_t$  و  $UDI$  در ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت مقایسه‌ای، در شکل ۷ نشان داده شده است. تحلیل مقادیر  $DP_t$  نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار آن مربوط به ایستگاه‌های بافت، جیرفت و شهرابک به ترتیب با مقادیر ۳۹۸، ۴۰۰ و ۴۳۲ واحد برداری و بیش‌ترین مقدار آن متعلق به ایستگاه‌های رفسنجان، انار و کهنوج به ترتیب با ۱۶۶۵، ۱۵۶۳ و ۱۰۲۶ واحد برداری است. بر اساس طبقه‌بندی قدرت فرسایشی باد فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) (جدول ۲)، به جز ایستگاه‌های بافت و جیرفت که دارای قدرت فرسایشی متوسطی هستند، در سایر ایستگاه‌ها قدرت فرسایش بادی بالا است. در



شکل ۷- مقایسه مقادیر پتانسیل کل حمل ماسه و ضریب همگنی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Figure 7. Comparison of the total sand drift potential (DPT) and the uni-directional index (UDI) for the studied stations.

منفرجه در آن‌ها غالب است (شکل ۷). با استفاده از شاخص همگنی جهت باد، می‌توان به نوع رژیم باد مؤثر در شکل‌گیری رخصاره‌های فرسایش بادی مانند تپه‌های ماسه‌ای و مرفولوژی نهشته‌های رسوبی دست یافت (۲۱). در این زمینه، مطالعه شاخص همگنی

بررسی شاخص همگنی جهت باد ( $UDI$ ) همچنین نشان می‌دهد که به‌استثنای دو ایستگاه جیرفت و زرنده که دارای تغییرپذیری زیاد و همراه با وزش بادهای چند جهته هستند، در سایر ایستگاه‌ها تغییرپذیری متوسط بوده و بادهای دو جهته با زاویه

ایستگاه کل دبی حمل ماسه جابجاشده ۸۹/۹۳ مترمکعب بر متر در سال است که از نظر قدرت فرسایشی باد در کلاس شدید قرار می‌گیرد و به مقدار برآوردی در پژوهش حاضر برای ایستگاه یادشده (۸۷/۰ تن بر متر در سال) نزدیک است (جدول ۴). نتایج بررسی پارسامهر و خسروانی (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های بادسنجی ۶ ایستگاه استان اصفهان طی یک دوره ۲۰ ساله نشان داد که بیشترین مقدار کل دبی ماسه جابجاشده در جهات مختلف به میزان ۷۹/۱۹ تن بر متر در سال متعلق به ایستگاه اردستان بود که ۲۰/۰۳ تن بر متر در سال آن در جهت بردار برآیند جابجا شده بود. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل در این پژوهش، صرفاً برآوردی از حمل ماسه است و تعیین دقیق شدت حمل رسوبات بادی، با اندازه‌گیری و از طریق روش‌های استاندارد امکان‌پذیر است.

جهت باد در پنج ایستگاه واقع در جنوب کشور توسط اختصاصی و دادفر (۲۰۱۴) نشان داد که اکثر این مناطق دارای بادهای دو جهته هستند (۶).

نتایج برآورد مقادیر کل و برآیند دبی ماسه جابجاشده در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار کل دبی ماسه در جهات مختلف (TSF<sup>۱</sup>) در ایستگاه رفسنجان به میزان ۳۱۹/۱ تن بر متر در سال و کمترین آن در ایستگاه جیرفت به مقدار ۵۳/۴ تن بر متر در سال رخ داده است. از این مقادیر در دو ایستگاه یادشده، به ترتیب ۲۴۷/۶ و ۱۳/۸ تن بر متر در سال دبی ماسه جابجاشده در جهت بردار برآیند (DSF<sup>۲</sup>) است. نتایج مشابهی توسط احمدی و مصباح‌زاده (۲۰۱۱) در بررسی داده‌های ایستگاه کرمان طی دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ به دست آمد که نشان داد در این

جدول ۴- مقادیر برآورد کل و برآیند دبی حمل ماسه در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار گل‌ماسه‌نما.

**Table 4. The predicted amounts of the total sand flux and discharge sand flow at the studied stations using Sand Rose Graph 3.**

ایستگاه Station	کل دبی ماسه TSF (t m <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	برآیند دبی ماسه جابجاشده DSF (t m <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )
Anar انار	217.4	142.7
Baft بافت	76.2	43.6
Bam بم	92.4	53.5
Jiroft جیرفت	53.4	13.8
Kahnooj کهنوج	151.5	116.6
Kerman کرمان	87.0	58.1
Lalezar لاله‌زار	129.0	98.4
Rafsanjan رفسنجان	319.1	247.6
Shahdad شهداد	121.1	86.9
Shahrbabak شهر بابک	81.7	39.6
Sirjan سیرجان	90.5	39.8
Zarand زرند	74.2	16.2

1- Total Sand Flux

2- Discharge Sand Flow



این ذرات ریز در رسوب حاصل از فرسایش کاهش یافته و در عوض، شرایط برای حمل ذرات و خاکدانه‌های درشت‌تر به دلیل قدرت بیش‌تر باد فراهم خواهد شد (۱۴، ۱۵ و ۳۷).

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سرعت و جهت بادهای فرساینده و توان و جهت حمل ذرات رسوب ناشی از فرسایش بادی در ایستگاه‌های منتخب استان کرمان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج دلالت بر این داشت که در بین ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه، به دلیل پهناور بودن استان، جهت بادهای فرساینده و غالب کرمان متفاوت است. به‌طور کلی در نیمه غربی استان، بادهای غالب بیش‌تر جهت غرب و جنوب‌غربی دارند و در نیمه شرقی استان، بادهای بیش‌تر از جهت شمال وزیده است. این یافته، از نظر تعیین منشأ رسوبات فرسایش بادی و نیز انجام عملیات حفاظتی دارای اهمیت است. همچنین نتایج بررسی شاخص بادناکی و فراوانی بادهای فرساینده از طریق تحلیل گل‌باد و شاخص‌های گل‌ماسه نیز بیانگر این بود که ایستگاه رفسنجان بیش‌ترین و ایستگاه جیرفت کم‌ترین بادهای فرساینده و طوفان‌زا را دارند. در مجموع، می‌توان چنین عنوان داشت که تحلیل فرسایش بادی با هر چند اطلاعات ارزشمندی در خصوص وضعیت فرسایش بادی و حمل ذرات رسوب به‌دست می‌دهد، ولی برای تحلیل واقعی‌تر فرسایش بادی لازم است اطلاعات مربوط به سرعت آستانه فرسایش و نیز فرسایش‌پذیری خاک‌ها نیز مورد توجه و استفاده قرار گیرد. بنابراین، انجام پژوهش‌های بیش‌تر و علمی‌تر در زمینه نقش ویژگی‌های خاک‌های مختلف استان بر سرعت آستانه و فرسایش‌پذیری آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. تهیه نقشه‌های سرعت آستانه و فرسایش‌پذیری بروز می‌تواند تا حد زیادی در دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر و صحیح‌تر وضعیت فرسایش بادی و کمیّت و کیفیت حمل رسوبات بادی در مناطق مختلف استان، راه‌گشا باشد.

در پژوهشی، پارسامهر و خسروانی (۲۰۱۷) نشان دادند که بیش‌ترین مقدار حمل رسوب در منطقه توسط بادهایی با سرعت متوسط و فراوانی زیاد اتفاق می‌افتد، که دلیل آن را به این موضوع ارتباط دادند که بادهای با سرعت کم‌تر از سرعت آستانه فرسایش، در ترسیم گل‌ماسه حذف می‌شوند و بادهای با سرعت زیاد به دلیل فراوانی کم در تشکیل تپه‌های ماسه‌ای نقش قابل‌ملاحظه‌ای ندارند (۲۱). این در حالی بود که یمانی و همکاران (۲۰۱۱) نیز عنوان داشتند که بادهای با سرعت زیاد و تداوم کم نسبت به بادهای با سرعت کم‌تر ولی تداوم بیش‌تر، نقش بسیار بیش‌تری در فرسایش بادی دارند. بنابراین یک باد سریع با فراوانی کم می‌تواند حجم بیش‌تری از ماسه را نسبت به یک باد با سرعت کم‌تر و فراوانی بیش‌تر جابه‌جا کند (۳۵). طبق نظر این پژوهشگران، جهت حرکت ماسه‌های روان تابع جهت حرکت باد بوده و حجم انتقال ماسه‌ها به سرعت و تداوم وزش باد هر منطقه وابسته است. از طرفی، سرعت باد مهم‌ترین عامل در شروع و تداوم حرکت ذرات رسوب در رخدادهای فرسایش بادی است و قطر ذرات رسوب عامل مؤثری در تعیین سرعت آستانه فرسایش می‌باشد (۳۵ و ۳۷). در این زمینه، یافته‌های محمودآبادی و زمانی (۲۰۱۲) بیانگر آن بود که با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد که این افزایش سرعت باد علاوه بر میزان ذرات منتقل شده، اندازه ذرات و مکانیسم حمل ذرات رسوب را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۵). در واقع، بین قطر ذرات و میزان جابجایی آن‌ها رابطه معکوسی برقرار است به‌طوری‌که هرچه ذرات ریزتر باشند، میزان جابجایی آن‌ها بیش‌تر بوده و باد قادر است تا مسافت‌های طولانی‌تری این ذرات را حمل کند. طبق یافته‌های پژوهشگران اگرچه به دلیل انتخاب‌پذیری بیش‌تر ذرات ریز در فرسایش بادی، این ذرات در سرعت‌های کم‌تر باد به آسانی جدا و انتقال می‌یابند اما با افزایش سرعت باد، فراوانی

منابع

1. Ahmadi, H., and Mesbahzadeh, T. 2011. Comparison of sand drifts potential estimating using momentum method and Fryberger velocity classes method (Case study: Jask and Kerman). *J. Water Soil.* 25: 1. 11-18. (In Persian)
2. Ahmadi, H., Naeini, S., and Yadegari, M. 2013. Use of anemometric results and threshold velocities for determination of proper regions where sand storms are generated (Case study: around the synoptic station of Yazd). *Desert.* 17: 3. 225-231.
3. Anvari, S.M., and Mohammadi, H. 2009. Estimation of sand transport potential and the resultant of erosive winds of corridor Jezink. The 2<sup>nd</sup> Conference on Regional of Natural and Environment. Feb 2009, Arsanjan, Iran. (In Persian)
4. Buschiazzo, D.E., Zobeck, T.M., and Abascal, S.A. 2007. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. *J. Arid Environ.* 69: 29-39.
5. Diaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Jazcilevich, A.D., Garcia, A.R., Caetano, E., and Ruiz-Suarez, L.G. 2010. A modelling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City. *Aeolian Research.* 2: 143-157.
6. Ekhtesasi, M.R., and Dadfar, S. 2014. Investigation on relationship between coastal hurricanes and sand dunes morphology in South of Iran. *Physical Geography Research Quarterly.* 45: 4. 61-72. (In Persian)
7. Ekhtesasi, M.R., Saremi Naeini, M.A., and Saremi Naeini, A. 2006. Design of sand rose graph software, the processor of soil erosion power and sediment. The First National Conference of Wind Erosion, Yazd, Iran, 24-26 January. (In Persian)
8. Fatahi, M.M., Darvish, M., Javidkiya, H.R., and Adnani, S.M. 2011. Assessment and mapping of desertification total risk using FAO-UNEP method (case study: Qomroud watershed). *Iran. J. Range Des. Res.* 17: 4. 575-588. (In Persian)
9. Fryberger, S.G., and Dean, G. 1979. Dune forms and wind regime, P 137-169. In: E.D. McKee (ed.), *A Study of Global Sand Seas.* U.S. Geological Survey Professional Paper No. 1052.
10. Hagen, L.J. 1991. A wind erosion prediction system to meet user needs. *J. Soil Water Cons.* 46: 106-111.
11. Hanifepoor, M., Mashhadi, N., Mohammad Khan, Sh., and Amir Aslani, F. 2015. Determination of wind erosion patterns using the drawing of wind rose and storm rose (Case study: Damghan city) The 2<sup>nd</sup> National Conference on Desert with the Approach for the Management of Arid and Desert Areas. (In Persian)
12. Karimi Nazar, M., Fakhire, A., Feizniya, S., Rashki, A., and Miri Soleyman, S.G. 2009. Assessment of some geostatistics methods for evaluation of wind erosion threshold velocity in Sistan plain. *J. Range Water. Manage.* 62: 3. 405-417. (In Persian)
13. Lorestani, Gh., Shahriyari, A., and Maghsoudi, M. 2012. The effect of diameter distribution and frequency of sand particles on the deformation of the main components of Barkhan (The case study: Borkhan Maranjab). *J. Geograph. Dev.* 9: 25. 179-196. (In Persian)
14. Mahmoodabadi, M., and Rajabpour, H. 2017. Study on the effect of initial soil moisture content on wind erosion rate using a laboratory wind tunnel. *J. Water Soil Cons.* 24: 2. 167-182. (In Persian)
15. Mahmoodabadi, M., and Zamani, S. 2012. Effect of wind speed and soil particle size distribution on sediment transport mechanisms due to wind erosion. *Watershed Engineering and Management.* 4: 3. 141-151. (In Persian)
16. Mahmoodabadi, M., Dehghani, F., and Azimzadeh, H.R. 2011. Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *J. Soil Manage. Sust. Prod.* 1: 1. 81-96. (In Persian)
17. Mirzamostafa, N., Khalili, D., Nazemosadat, M.J., and Haderbadi, Gh. 2008. Hourly prediction of speed and direction of erodible winds using three hourly data (A case study: Zabol region). *Iran. J. Range Des. Res.* 15: 1. 69-85. (In Persian)

18. Mirzamostafa, S.N., Khalili, D., Kamali, G., Haderbadi, G., Dalaliyan, M.R., and Afzali, S.F. 2003. Simulation of wind speed and direction to predict wind erosion. Third Climate Change Conference, Esfahan. (In Persian)
19. Nazari Samani, A.A., Dadfar, S., and Shahbazi, A. 2013. A study on dust storms using wind rose, storm rose and sand rose (Case study: Tehran province). *Desert*. 18: 9-18.
20. Nordstorm, K.F., and Hotta, Sh. 2004. Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. *Geoderma*. 121: 157-167.
21. Parsamehr, A., and Khosravani, Z. 2017. Analysis of erosive winds and depositions drift potential in desert regions of Esfahan province. *Iran. J. Range Des. Res.* 23: 4. 832-842. (In Persian)
22. Presley, D., and Tatarko, J. 2009. Principles of wind erosion and its control. Kansas State University. Available at: <http://www.weru.ksu.edu>. (Visited August 18, 2011).
23. Saremi Naini, M.M. 2016. Estimation of the frequency of speed and direction of the erosive winds and dust storms in Yazd province by using wind rose, storm rose and sand rose. *Iranian Scientific Association of Desert Management and Control*. 8: 96-106. (In Persian)
24. Shi, F., and Huang, N. 2012. Measurement and simulation of sand saltation movement under fluctuating wind in a natural field environment. *Physica A*. 391: 474-484.
25. Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A.A., Mahmoodabadi, M., and Laurent, B. 2019. Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*. 333: 69-80.
26. Skidmore, E.L. 1974. A wind erosion equation: development, application and limitations. *Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants*. 38: 452-465.
27. Skidmore, E.L. 1987. Wind erosion direction factor as influenced by field shape and wind preponderance. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 51: 198-202.
28. Sterk, G. 2000. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64: 852-858.
29. Tavakolifard, A., Ghasemiye, H., Nazari Samani, A.A., Mashhadi, N., and Mirzavand, M. 2012. Investigation of role of different land uses in the sand storm by using wind rose and storm rose (Case study, Kashan). *Environ. Erosion Res. J.* 2: 2. 25-41. (In Persian)
30. Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K.G. 2002. Soil Erosion: Processes, Predication, Measurement and Control. 338p.
31. Van Pelt, R.S., and Zobeck, T.M. 2004. Effects of polyacrylamide, cover crops, and crop residue management on wind erosion. 13<sup>th</sup> Int. Soil Conserv. Org. Conf., Brisbane, Australia.
32. Visser, S.M., Sterk, G., and Ribolzi, O. 2004. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *J. Arid Environ.* 59: 699-717.
33. Whicker, J.J., Pinder, J.E., and Breshears, D.D. 2006. Increased wind erosion from forest wildfire: Implications for contaminant related risks. *J. Environ. Qual.* 35: 468-478.
34. Yamani, M. 2001. Relationship between the diameter of the sand particles and the frequency of wind speeds in the area of the Rig of Kashan. *Geographic Research*. 38: 115-132. (In Persian)
35. Yamani, M., Zahab Nazoori, S., and Goorabi, A. 2011. Morphometric study and causes of Kerman rig deployment through the analysis of wind characteristics and sand grain. *Arid Regions Geographic Studies*. 1: 4. 17-33. (In Persian)
36. Yang, Y., Qu, Z., Shi, P., Liu, L., Zhang, G., Tang, Y., Hu, X., Lv, Y., Xiong, Y., Wang, J., Shena, L., Lv, L., and Sun, S. 2014. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger deserts, central Alxa Plateau, China. *Aeolian Research*. 12: 143-156.

37. Zamani, S., and Mahmoodabadi, M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 59: 12. 1743-1753.
38. Zhang, C.L., Zou, X.Y., Gong, J.R., Liu, L.Y., and Liu, Y.Z. 2004. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel. *Soil and Tillage Research*. 75: 53-59.
39. Zhang, Z., Wieland, R., Reiche, M., Funk, R., Hoffmann, C., Li, Y., and Sommer, M. 2012. Identifying sensitive areas to wind erosion in the Xilingele grassland by computational fluid dynamics modelling. *Ecological Informatics*. 8: 37-48.
40. Zhang, Z., Dong, Z., and Li, C. 2015. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert. *Aeolian Research*. 17: 1-13.



---

## Analysis of wind erosivity at synoptic stations of Kerman province using wind rose, storm rose and sand rose

S. Zamani<sup>1</sup>, \*M. Mahmoodabadi<sup>2</sup>, N. Yazdanpanah<sup>3</sup> and M.H. Farpoor<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,

<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,

<sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran,

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

Received: 03.01.2018; Accepted: 01.12.2019

---

### Abstract

**Background and Objectives:** Wind erosion is one of the most important land degradation aspects especially in arid and semi-arid regions such as Kerman province. Wind direction and speed are two important erosive factors affecting wind erosion and sediment yield. The purpose of this study was to analyze the erosive winds of the province in order to determine the direction of predominant winds and the status and the potential of wind erosion during different periods of 8 to 11 years.

**Materials and Methods:** In this study, wind anemometric data for 8-11 y periods were analyzed using 12 synoptic stations in Kerman province. For this purpose, the WR Plot View software was applied in order to analyze the anemometer data and draw wind roses and storm roses of the selected synoptic stations of the province. Moreover, the sand roses of the studied stations were plotted using the Sand Rose Graph 3 software, accordingly different sand drift potential and direction indices were derived.

**Results:** The results of wind rose analysis generally indicated that the western and southwestern winds dominated in the western part of the province, whereas the northern winds were more frequent in the eastern part. Storm rose analysis showed that in most stations, the highest erosive winds were mainly blown from the west and south west directions, while at Bam and Shahdad stations the north and at Zarand the southwest and northeast winds were predominate. According to this analysis, the most frequent winds at the speed classes of  $\leq 6.7$ , 6.7-7.7 and 7.7-9.8  $\text{m s}^{-1}$  were allocated to Jiroft (94.9%), Sirjan (8.0%) and Kahnooj (12.0%) stations, respectively. Among all the stations, Rafsanjan with 10.9%, 5.0% and 4.1% showed the most frequent winds at the higher speed classes of 9.8-11.8, 11.8-13.9 and  $\geq 13.9$   $\text{m s}^{-1}$ , respectively. The analysis of resultant drift direction (RDD) implied that sand transport for the western stations of the province was mainly toward east and northeast directions, for Zarand station was from northwest to southeast and for Shahdad and Bam stations was from north to south directions. The minimum amount of total drift potential ( $DP_t$ ) was found at Baft and Jirof stations by 398 and 400 v.u., respectively, while Rafsanjan station with 1665 v.u. experienced the highest value of this index. Except for Baft and Jiroft stations with moderate wind potential, the other stations showed high wind potentials. The analysis of uni-directional index (UDI) indicated that except for Jiroft and Zarand stations which had high variability with multi-directional winds, for the other stations moderate variation with bi-directional winds and oblique angle were observed.

**Conclusion:** It was concluded that although wind erosivity analysis gives valuable information on wind erosion situation and sediment transport, it is necessary to be considered and used the threshold velocity as well as soil erodibility databases in order to achieve a more accurate analysis of wind erosion in the province.

**Keywords:** Kerman province, Sand drift potential, Storm rose, Wind erosion, Wind rose

---

\* Corresponding Author; Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir

