

مطالعه پتانسیل فرسایش بادی استان کرمان با استفاده از تحلیل فصلی گلباد و گلماسه

سمیرا زمانی^۱ - مجید محمودآبادی^{۲*} - نجمه یزدان پناه^۳ - محمدهادی فرپور^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷

چکیده

فرسایش بادی یکی از پدیده‌های مخرب و مؤثر در بیابانی شدن اراضی است که در اثر وزش بادهای فرساینده بر سطح خاک‌های حساس و سطوح هموار رخ می‌دهد. برای شناخت بهتر این پدیده، تحلیل داده‌های بادسنجی هر منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر با هدف بررسی پتانسیل فرسایش بادی در استان کرمان بصورت فصلی و بر اساس داده‌های بادسنجی طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ انجام شد. به این منظور، هشت ایستگاه سینوپتیک دارای داده‌های معتبر انتخاب و گلباد و گلماسه هر یک با نرم‌افزارهای WR Plot View.8 و Sand Rose Graph 3 ترسیم شد. کلاس سرعت بادهای فرساینده، جهت غالب بادهای هر ایستگاه و همچنین شاخص‌های گلماسه شامل پتانسیل توان حمل ماسه، دبی رسوب و شاخص همگنی به صورت فصلی و نیز برای کل دوره مورد مطالعه تعیین شد. نتایج بررسی بادهای فرساینده نشان داد که کلاس سرعت متوسط ۹/۸-۷/۷ متر بر ثانیه با جهت غربی و جنوب غربی بیشترین فراوانی را در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه داشت. بیشترین بادهای فرساینده در فصل‌های زمستان و تابستان و کمترین آن در فصل پاییز رخ داده است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین مقادیر پتانسیل حمل ماسه و دبی رسوب مربوط به ایستگاه رفسنجان به ترتیب با ۱۶۳۷ واحد برداری و ۱۰۲/۶ کیلوگرم بر متر در ثانیه برآورد شد. بررسی شاخص همگنی نیز نشان داد که در فصل‌ها و مناطق مختلف استان، رژیم بادخیزی متفاوت است. مقایسه جهت بردار برآیند توان حمل ماسه بادی نشان داد که جهت حرکت ماسه در ایستگاه‌های کرمان، جیرفت، سیرجان، رفسنجان و شهرابک از غرب به شرق، در ایستگاه لاله‌زار از جنوب غربی به شمال شرقی، در ایستگاه بم از شمال به جنوب و در ایستگاه زرناد از شمال غربی به جنوب شرقی است. یافته‌های این پژوهش اهمیت بررسی داده‌های بادسنجی را به منظور شناخت بهتر فرسایش بادی و مکانیسم حمل ذرات رسوب ناشی از فرسایش بادی برای مناطق مختلف استان کرمان نشان داد.

واژه‌های کلیدی: استان کرمان، بادهای فرساینده، پتانسیل حمل ماسه، شاخص همگنی، فرسایش بادی

مقدمه

اختلاف فشار یا درجه حرارت بین دو نقطه ایجاد می‌شود (۲۷). انرژی باد هرچند می‌تواند منبعی برای تولید انرژی باشد، با این وجود محدودیت‌ها و مشکلاتی نظیر وقوع فرسایش بادی را نیز می‌تواند ایجاد کند (۱۳). ایران از جمله کشورهایی است که بخش وسیعی از آن طی دهه‌های اخیر، به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت ناصحیح اراضی، به بیابان تبدیل شده است (۲۰). بنابراین، دستیابی به روش‌های آسان، سریع و کاربردی برای تحلیل داده‌های بادسنجی به منظور شناخت رژیم وزش بادهای فرساینده اهمیت ویژه‌ای دارد (۲۲). علاوه بر فرسایش بادی، ویژگی‌های خاک از طریق تأثیر بر فرسایش پذیری خاک، بر شدت فرسایش اثرگذار است. در این بین، توزیع اندازه ذرات اولیه و ثانویه خاک و همچنین رطوبت خاک سطحی نقش بسزایی در کنترل فرسایش بادی ایفا می‌کنند (۱۵ و ۳۰). اگرچه کاهش سرعت باد به عنوان عامل فرساینده نسبت به افزایش رطوبت اولیه خاک، نقش بیش‌تری در مهار فرسایش بادی

فرسایش بادی به عنوان یکی از پدیده‌های مخرب و تأثیرگذار در روند بیابانی شدن اراضی است که حساسیت بالای خاک سطحی به همراه وزش بادهای فرساینده، از عوامل اصلی ایجادکننده آن می‌باشند. در نتیجه وزش بادهای فرساینده و شرایط خاص محیطی، سالانه میلیون‌ها تن خاک از سطح اراضی دچار فرسایش و هدررفت می‌شود (۱۵ و ۱۶). به عبارتی، شدت فرسایش بادی تابع دو عامل فرسایش بادی و فرسایش پذیری است (۳۱). به طور کلی، باد در نتیجه

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
(*) نویسنده مسئول: (Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان
DOI: 10.22067/jsw.v33i1.73224

(۲۰۱۱) نیز بیشترین پتانسیل برداشت ماسه در منطقه بستان در خوزستان را در فصل تابستان گزارش کردند (۴). همچنین، خیری و همکاران (۲۰۱۵) در تبریز بیشترین فراوانی شدت و سرعت باد را در فصل تابستان مشاهده کردند (۱۲).

در تحلیل داده‌های بادسنجی، استفاده از گلباد، گلپوفان و گلماسه، کاربرد وسیعی دارد. برای نمونه، اختصاصی و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی داده‌های بادسنجی با استفاده از گلباد، گلپوفان و گلماسه، میزان فرسایش بادی دشت بافق را مورد مطالعه قرار دادند و همچنین جهت و فراوانی بادهای غالب و نیز سرعت آستانه فرسایش بادی مناطق مختلف این دشت را با استفاده از تونل باد تعیین کردند (۷). نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی شش ایستگاه سینوپتیک استان اصفهان در یک دوره ۲۰ ساله توسط پارسامهر و خسروانی (۲۰۱۷) نشان داد که حاکمیت بادهای غالب بر مناطق مختلف بیابانی استان اصفهان متفاوت است و مقدار انرژی باد و تغییر آن در جهت‌های مختلف تاثیر زیادی بر مورفولوژی و تغییر شکل رخساره‌های فرسایش بادی دارد (۲۳). توکلی فرد و همکاران (۲۰۱۲) نیز داده‌های بادسنجی کاشان را مورد بررسی قرار دادند و عنوان داشتند که با تحلیل گلپوفان‌های فصلی در اراضی مختلف می‌توان طراحی بادشکن را انجام داد (۲۷). در مجموع، تحلیل داده‌های بادسنجی به وسیله گلباد، گلپوفان و گلماسه در ارتباط با وضعیت فرسایش بادی در مناطق مختلف ایران انجام شده است که برای نمونه می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط مصفايي و همکاران (۲۰۱۷) در حوضه آبخیز ورتوان، حنیفه پور و همکاران (۲۰۱۵) در دامغان، مهربانی و همکاران (۲۰۱۵) در خوزستان و همچنین امیدوار و نکونام (۲۰۱۱) در سبزوار اشاره کرد (۱۰، ۱۸، ۱۹ و ۲۲).

در مجموع، تحلیل داده‌های بادسنجی در ایران نشان داده که جهت عمومی وزش بادهای عمدتاً از شمال غربی تا جنوب غربی متغیر است (۲۰ و ۲۹). البته در بعضی نواحی ایران به دلیل شرایط خاص منطقه‌ای و همچنین عوامل جوی، جهت وزش باد متفاوت از جهت عمومی وزش بادهای ایران و همچنین سرعت وزش باد هم از سرعت متوسط وزش بادهای غربی بیش تر است. بر اساس آمار مربوط به سرعت و جهت وزش باد کشور ایران به ۱۰ پهنه بادی بزرگ تقسیم می‌شود که هر پهنه از نظر سمت و سرعت وزش باد در زمان‌های مختلف سال دارای ویژگی‌های خاص خود است. در این بین، وسیع‌ترین پهنه بادی ایران پهنه بادی وزش باد سیستان است که محدوده وسیعی از استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، خراسان جنوبی، خراسان رضوی، یزد و اصفهان را شامل می‌شود (۲۹). استان کرمان با دربرگرفتن حدود ۱۱ درصد از مساحت کشور بخش وسیعی از پیکر جنوب شرقی فلات مرکزی ایران را می‌پوشاند و کلیه فعل و انفعالات پیچیده و خشن طبیعی مربوط به شرایط آب و هوای خشک و شدید کویری را دارا می‌باشد. نتایج بررسی‌های انجام شده در این

ایفا می‌کند (۱۵ و ۱۷). پرواضح است که با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش بادی به طور معنی‌داری افزایش یافته و در مقابل، با افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی، پتانسیل حمل ماسه کاهش می‌یابد (۳) و (۳۱).

بررسی و تحلیل سرعت و جهت باد به عنوان دو ویژگی مهم باد در انتقال و رسوبگذاری حاصل از فرسایش بادی و در نهایت در شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲۱، ۲۴ و ۳۰). همچنین در بررسی اثرات زیست‌محیطی نظیر پایش کیفیت و آلودگی هوا، تحلیل باد کاربرد دارد. غلظت آلاینده‌ها با سرعت باد متناسب است، از طرفی جهت باد غالب نشان می‌دهد که این آلاینده‌ها بیشتر در کدام جهت منتقل می‌شوند (۲۸). گرومکاوآ و بوتچواروو (۲۰۱۰) با استفاده از گلباد سالانه و تحلیل داده‌های باد در کشور بلژیک، مدلی را در رابطه با آلودگی هوا از منابع نقطه‌ای را طراحی نمودند (۹). یکی دیگر از کاربردهای تحلیل بادهای هر منطقه، برآورد میزان رسوبدهی حاصل از فرسایش بادی با استفاده از مدل‌های مختلف است. از دیگر کاربردهای تجزیه و تحلیل آمار باد، بررسی نقش آن در شکل‌گیری انواع تپه‌های ماسه‌ای می‌باشد (۵ و ۲۶). بطور کلی، آنالیز باد در زمینه تعیین سرعت و جهت بادهای فرسایشی، توان حمل ذرات رسوب به‌وسیله باد، مطالعه گرد و غبار، دبی و جهت حرکت ذرات رسوب، مورفولوژی نهشته‌های بادی، احداث بادشکن و نیروگاه‌های بادی قابل استفاده است (۱۱، ۲۳ و ۲۷).

از طریق تحلیل داده‌های بادسنجی می‌توان به جهت حمل ماسه‌های بادی و نیز فراوانی بادهای فرسایشی در فصل‌های مختلف پرداخت (۴، ۱۲ و ۲۰). در این زمینه، احمدی و همکاران (۲۰۱۳) از طریق تحلیل بادهای دشت یزد- اردکان و با توجه به سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه، به شناسایی مناطق با قابلیت طوفان‌های ماسه‌ای پرداختند و جهت حرکت ماسه‌ها را تعیین نمودند. یافته‌های این پژوهشگران نشان داد که مناطق با سرعت آستانه کمتر از ۸ متر بر ثانیه، حساسیت بالایی در برابر فرسایش بادی دارند (۲). نظری سامانی و همکاران (۲۰۱۳) جهت غالب باد و داده‌های بادسنجی مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک تهران طی یک دوره ۴۷ ساله را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که بیش‌ترین پتانسیل حمل ماسه در جهت‌های جنوب، شمال غربی و جنوب غربی رخ می‌دهد و همچنین بیش‌ترین فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در فصل‌های بهار و تابستان مشاهده شد (۲۰). صارمی نایینی (۲۰۱۶) نیز بیشترین فراوانی بادهای فرسایشی در استان یزد را در فصول بهار و تابستان و کمترین آن را در فصل پاییز گزارش کرد (۲۵). یمانی (۲۰۰۱) نیز با توجه به تحلیل بادهای منطقه زابل نشان داد که وزش باد در فصل تابستان شدیدتر از فصل‌های دیگر است و جهت غالب باد در فصل‌های مختلف متفاوت است (۲۹). عیدیان و همکاران

انتخاب شدند. جدول ۱ نشان می‌دهد که ایستگاه لاله‌زار با ۲۷۷۵ متر بیش‌ترین ارتفاع را از سطح دریا دارد و جیرفت با تنها ۶۰۱ متر، دارای کم‌ترین ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. میانگین دما و بارش سالانه نیز نشان می‌دهد که کم‌ترین میانگین دما متعلق به ایستگاه لاله‌زار با ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین دما مربوط به ایستگاه‌های جیرفت و بم به ترتیب با ۲۵/۱ و ۲۴/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در مورد مقدار بارش سالانه نیز ایستگاه لاله‌زار با ۱۹۱/۵ میلی‌متر بیش‌ترین و ایستگاه بم با میانگین ۳۳/۵ میلی‌متر، کم‌ترین میزان بارش را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده است.

از آنجا که بارش بر میزان رطوبت خاک نقش بسزایی دارد، بنابراین استفاده از اطلاعات هواشناسی نظیر میزان بارش فصلی ایستگاه‌های مختلف می‌تواند از طریق تأثیر بر فرسایش‌پذیری و نیز سرعت آستانه خاک‌های مورد مطالعه در پژوهش‌های فرسایش بادی حائز اهمیت باشد. به منظور شناخت بهتر وضعیت ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان در شکل ۱ میانگین بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت فصلی طی دوره آماری مورد مطالعه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین بارش در فصل زمستان و کمترین آن در فصل تابستان رخ داده است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، لاله‌زار و جیرفت بیشترین و ایستگاه بم کمترین بارش را دریافت کرده‌اند.

استان، نشان از شدت بالای فرسایش بادی در نتیجه وزش بادهای فرساینده دارد (۱). از این رو، تحلیل بادهای آن می‌تواند در مدیریت صحیح و مهار فرسایش بادی در این منطقه از کشور ایران راهگشا باشد. این پژوهش با هدف مطالعه وضعیت بادهای سالانه و فصلی از طریق تحلیل گلباد و گلماسه و تعیین شاخص‌های مربوطه در هشت ایستگاه فعال استان کرمان با استفاده از داده‌های معتبر موجود طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ انجام شد.

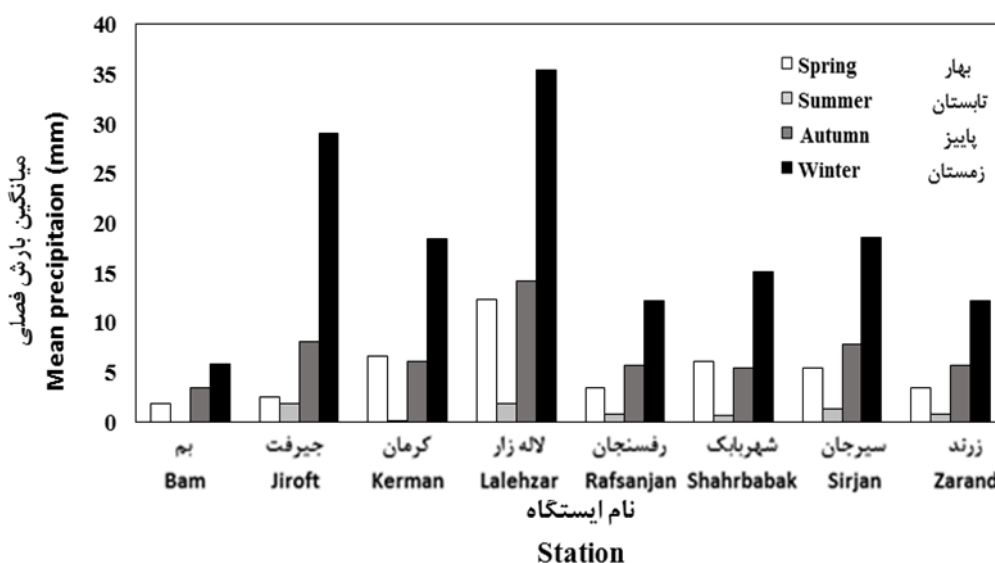
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان کرمان با مساحت حدود ۱۸۰۴۲۴ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیایی بین ۲۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۲ درجه شمالی و طول جغرافیایی بین ۵۳ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی قرار گرفته است. به طور کلی، اقلیم استان کرمان از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی در زمره اقلیم نیمه‌خشک بیابانی گرم محسوب می‌شود. به منظور تحلیل بادهای فرساینده در ارتباط با وضعیت فرسایش بادی در این استان، از داده‌های هواشناسی هشت ایستگاه سینوپتیک و فعال طی یک دوره آماری پنج ساله (۲۰۰۶-۲۰۱۰) استفاده شد. موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه و همچنین میانگین دما و بارش سالانه طی این بازه زمانی برای هر ایستگاه در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که این ایستگاه‌ها به دلیل داشتن آمار منظم و دقیق‌تر

جدول ۱- ویژگی‌های ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه استان کرمان مربوط به دوره آماری (۲۰۱۰-۲۰۰۶)

Table 1- The characteristics of synoptic stations in Kerman province for the statistical period (2006-2010)

ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude		عرض جغرافیایی Latitude		ارتفاع از سطح دریا Altitude above sea level (m)	میانگین بارش Precipitation (mm)	میانگین درجه حرارت Temperature (°C)
	درجه Degree	دقیقه Minuets	درجه Degree	دقیقه Minuets			
بم Bam	58	21	29	06	1067	33.5	24.3
جیرفت Jiroft	57	48	35	28	601	101.1	25.1
کرمان Kerman	56	58	30	15	1754	93.8	17.3
لاله‌زار Lalehzar	56	50	29	31	2775	191.5	12.1
رفسنجان Rafsanjan	55	24	30	25	1580	75.6	18.2
شهربابک Shahrabak	55	08	30	06	1834	81.7	16.1
سیرجان Sirjan	55	41	29	28	1740	99.5	18.1
زرنند Zarand	56	34	30	48	1670	75.4	20.1



شکل ۱- میانگین بارش فصلی ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان در طول دوره آماری (۲۰۰۶-۲۰۱۰)

Figure 1- Mean seasonal precipitation of synoptic stations in Kerman province for the statistical period (2006-2010)

۵. رسم گل‌ماسه^۲ در مقیاس سالانه به عنوان یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل آماری باد در ارتباط با سرعت‌های آستانه فرسایش بادی با استفاده از نرم افزار 3 Sand Rose Graph. طراحی این نرم‌افزار بر اساس معادلات و روابط پیشنهادی فرایبرگر (۱۹۷۹) و لتو و لتو (۱۹۷۸) انجام شده است (۲۵). این نرم افزار قادر است با دریافت داده‌های بادسنجی ایستگاه‌های موردنظر و همچنین لحاظ سرعت آستانه فرسایش باد، امکان تحلیل سریع داده‌های بادسنجی و محاسبه مقادیر دبی حمل ماسه در جهت‌های مختلف و دیگر شاخص‌های گلماسه را که در شناخت فرسایش بادی بسیار حائز اهمیت هستند، فراهم آورد. محاسبه شاخص‌های گلماسه و ترسیم نمودارهای مربوطه به صورت سالانه و در فصل‌های مختلف شامل دبی حمل رسوب (کیلوگرم بر متر در ثانیه)، پتانسیل حمل ماسه (DP^۳) در واحد برداری (V.U^۴)، پتانسیل کل حمل ماسه یا Dpt^۵. این شاخص بیانگر کل انرژی باد برای حمل ماسه در منطقه یا ایستگاه مورد نظر می‌باشد. شاخص UDI یا شاخص همگنی جهت حمل ماسه که عبارت از نسبت مقدار نهایی حمل ماسه (RDP^۶) به کل توان حمل ماسه (Dpt) است. بر این اساس، فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) تغییرپذیری جهت باد را بر پایه شاخص همگنی به

مراحل انجام کار در این پژوهش شامل مراحل زیر است:

- تهیه داده‌های روزانه بادهای هشت ایستگاه سینوپتیک استان کرمان شامل جهت و سرعت باد از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰.
- تبدیل داده‌های هواشناسی از فرمت IRIMO به یکی از فرمت‌های LAKE با استفاده از نرم‌افزار WD Convert.
- ترسیم گلباد^۱های سالانه به عنوان یکی از متداولترین روش‌های تحلیل و نمایش داده‌های بادسنجی با کمک یکی از برنامه‌های مناسب ارائه شده در این زمینه با نام WR Plot View.8. این نرم افزار قادر است پس از پردازش اطلاعات، با تعریف کلاس‌های سرعت باد گلبادهای مورد نظر را به صورت سالانه ترسیم کند (۶). کمترین سرعت باد لحاظ شده در رسم گلبادها ۰/۵ متر بر ثانیه می‌باشد (۲۵ و ۲۹).
- تحلیل داده‌های باد به صورت فصلی و سالانه در کلاس‌های مختلف سرعت باد و در جهت‌های مختلف با در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش بادی ۶/۵ متر بر ثانیه بر اساس منابع پیشین (۲۰ و ۲۵) با استفاده از نرم‌افزار WR Plot View.8 (۷). بر اساس مطالعه پارسامهر و خسروانی (۲۰۱۷) تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی بنا به پیشنهاد فرایبرگر (۱۹۷۱) و بر طبق رابطه بگنولد (۱۹۴۱) برابر با ۱۲ نات (حدود ۶/۵ متر بر ثانیه) در نظر گرفته می‌شود (۲۳). به عبارتی این سرعت به عنوان سرعت پایه آستانه فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری مورد استفاده قرار می‌گیرد (۵).

2- Sand Rose
3- Drift potential
4- Vector unit
5- Total drift potential
6- Resultant drift potential

1- Wind Rose

وضعیت بادهای منطقه تصمیم‌های مدیریتی بهتری در مناطق حساس تر و بحرانی تر انجام گیرد. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، اگرچه ترسیم گلبادها اطلاعات خوبی را از فراوانی و سرعت بادهای منطقه مورد مطالعه در اختیار قرار می‌دهد، اما برای کسب اطلاعات دقیق‌تر مربوط به فرسایش بادی و وضعیت انتقال رسوب به تجزیه و تحلیل‌های دیگری نیز نیاز می‌باشد که در ادامه ارائه می‌گردد.

شکل ۳ درصد بادهای با سرعت کم‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه را به همراه میانگین سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ایستگاه جیرفت با ۲۶/۵ درصد بیش‌ترین بادهای با سرعت کم‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه و دو ایستگاه لاله‌زار و بم به ترتیب با ۱/۰ و ۴/۴ درصد، کم‌ترین درصد بادهای آرام را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که میانگین سرعت باد برای دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰ در این ایستگاه‌ها ۲/۲ متر بر ثانیه برای ایستگاه جیرفت و ۴/۵ و ۴/۱ متر بر ثانیه به ترتیب برای ایستگاه‌های بم و لاله‌زار ثبت شده است. نتایج حاصل از شکل ۲ با اطلاعات به دست آمده از جدول ۲ همخوانی داشته و در هر دو ایستگاه جیرفت به عنوان ایستگاه با وقوع بادهای با سرعت کم در بین ایستگاه‌ها شناخته شد.

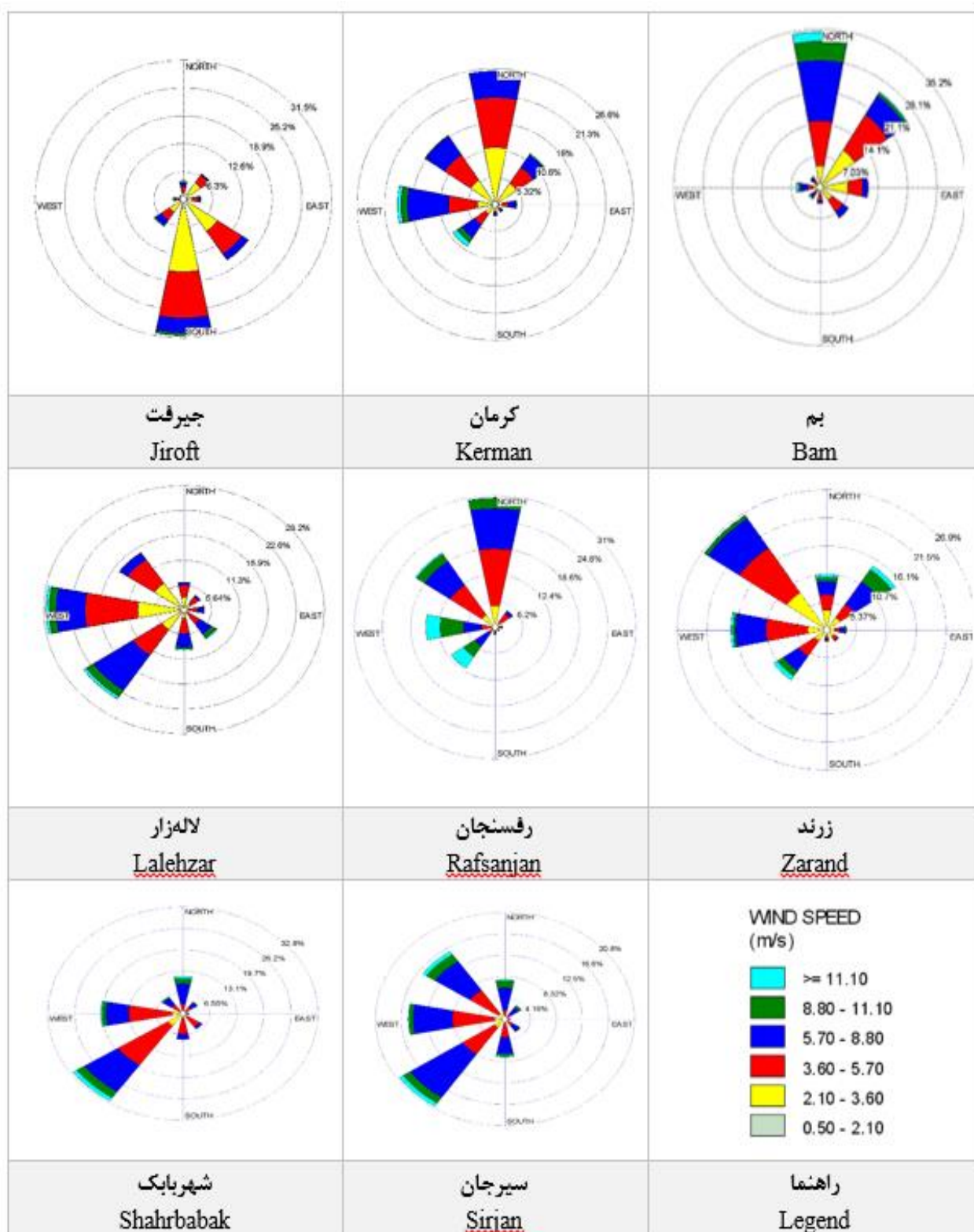
طبقه‌بندی سرعت بادهای فرساینده در ۵ کلاس مختلف سرعت باد در مقادیر بیشتر از سرعت آستانه فرسایش بادی در جدول ۳ ارائه داده شده است. نتایج این جدول بیانگر این مطلب است که ایستگاه رفسنجان با ۱۱/۳۹ درصد بیش‌ترین فراوانی بادهای فرساینده را در کلاس سرعت ۹/۸ تا ۱۱/۸ متر بر ثانیه در بین دیگر ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. کمترین میزان فراوانی با ۰/۴۹ درصد مربوط به ایستگاه جیرفت و در کلاس سرعت ۱۱/۸ تا ۱۳/۹ متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که به غیر از ایستگاه زرنند که در کلاس ۶/۷ تا ۷/۷ متر بر ثانیه و ایستگاه رفسنجان که در کلاس ۹/۸ تا ۱۱/۸ متر بر ثانیه بیشترین فراوانی سرعت را دارند در سایر ایستگاه‌ها، سرعت باد در کلاس ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده است.

این مطلب بیانگر این است که در بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان، فراوانی بادهای فرساینده با سرعت ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه بیش‌تر از سایر کلاس‌های سرعت باد می‌باشد. نتایج به دست آمده از این تحلیل، بیانگر این واقعیت است که نه کلاس‌های سرعت کم و نه زیاد، بلکه کلاس سرعت متوسط بیشترین فراوانی را داشته که البته این نتیجه در یافته‌های برخی پژوهش‌ها نیز مورد اشاره بوده است (۲۵).

صورت سه کلاس طبقه‌بندی نمودند (۸). طبق این دسته‌بندی، مقدار شاخص UDI^1 بزرگ‌تر از ۰/۸ بیانگر بادهای یک جهته با تغییرپذیری کم، شاخص بین ۰/۳ تا ۰/۸ گویای بادهای دو جهته با زاویه منفرجه با تغییرپذیری متوسط و مقادیر کوچکتر از ۰/۳ نشان‌دهنده بادهای چند جهته با تغییرپذیری زیاد است. طبق تقسیم‌بندی قدرت فرسایشی باد در محیط‌های بیابانی توسط فرایرگر و دین (۱۹۷۹)، در منطقه‌ای که شاخص پتانسیل حمل ماسه (DPT) کمتر از ۲۰۰ و بیشتر از ۴۰۰ باشد، قدرت فرسایشی باد به ترتیب کم و زیاد در نظر گرفته می‌شود. همچنین اگر این شاخص بین ۲۰۰ و ۴۰۰ باشد، منطقه مورد مطالعه از نظر قدرت فرسایشی بادی، در حد متوسط است (۸). از آنجا که انجام محاسبه‌ها بصورت دستی بسیار پیچیده و وقت‌گیر است و با طولانی‌شدن دوره آماری مورد مطالعه، محاسبه مقادیر DP بدون استفاده از کامپیوتر دشوار می‌باشد. به همین دلیل برای تحلیل بادهای و رسم گلماسه‌ها از نرم‌افزار Sand Rose Graph 3 استفاده شد که قبلاً نیز توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است (۶ و ۷).

نتایج و بحث

در شکل ۲ گلبادهای ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان کرمان در جهت‌های هشت‌گانه و در ۶ کلاس سرعت باد نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی به وسیله گلباد نشان داد که در ایستگاه‌های بم، کرمان و رفسنجان وزش باد از جهت شمال بیشترین فراوانی را دارد. فراوانترین بادهای ایستگاه‌های جیرفت، زرنند و لاله‌زار در دوره آماری مورد مطالعه به ترتیب از جهت‌های جنوب، شمال غرب و غرب مشاهده شد. دو ایستگاه سیرجان و شهر بابک، بیش‌ترین بادهای را از جهت جنوب غرب دریافت کرده‌اند. همچنین نمایش گلبادها بیانگر این مطلب بود که ایستگاه جیرفت در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها، فراوانی بیشتری در سرعت‌های پایین باد دارد. به علاوه، جدول ۲ تعداد بادهای در کلاس‌های مختلف سرعت در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. طبق این جدول، ایستگاه جیرفت با تعداد فراوانی ۱۳۰ باد در کلاس کمترین سرعت باد یعنی ۲/۱-۰/۵ متر بر ثانیه بیشترین فراوانی را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد که نشان‌دهنده فراوانی بیش‌تر بادهای با سرعت کمتر در این ایستگاه نسبت به سایر مناطق استان کرمان است. در مقابل، بیشترین فراوانی در کلاس سرعت باد بیش‌تر از ۱۱/۱ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه رفسنجان به تعداد ۱۳۳ مورد می‌شود (جدول ۲). از این نتایج در بررسی و تحلیل داده‌های بادسنجی و انجام مقایسه بین ایستگاه‌های مناطق مختلف استفاده می‌شود تا با شناخت بهتر از

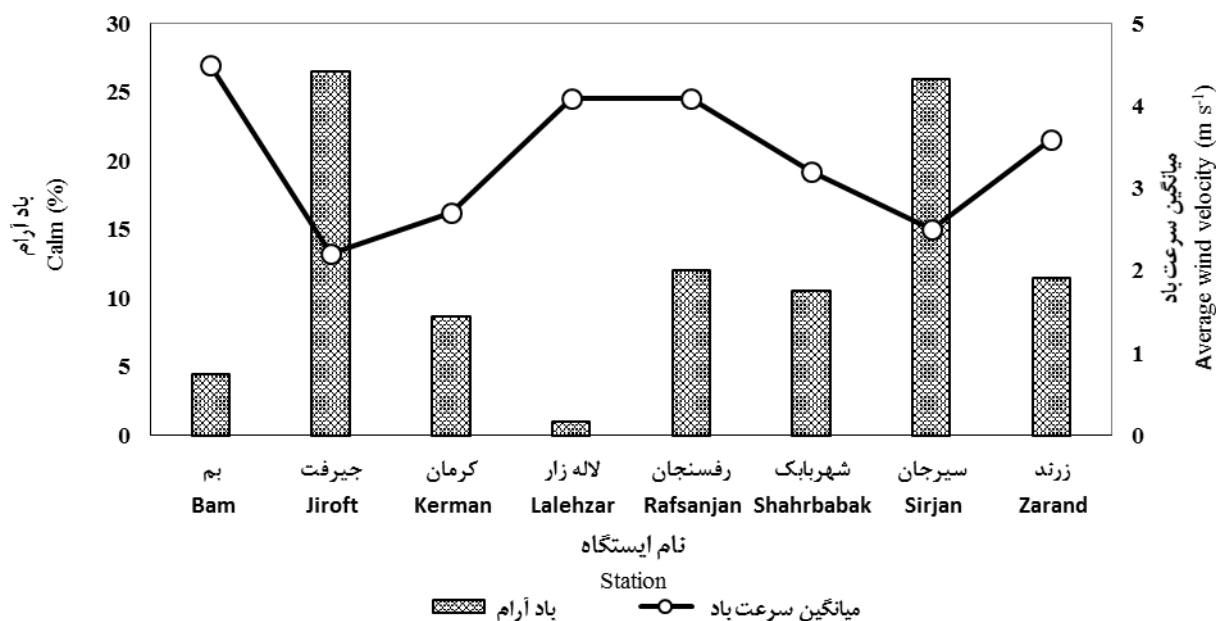


شکل ۲- گلبادهای سالانه ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه در استان کرمان طی دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰
 Figure 2- The annual wind roses of synoptic stations in Kerman province during the statistical period 2006-2010

جدول ۲- فراوانی سرعت های باد در ایستگاههای مختلف استان کرمان در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰

Table 2- Frequency of wind speeds at various stations in Kerman province during the statistical period of 2006-2010

نام ایستگاه Stations	کلاس سرعت بادهای فرساینده Classes of wind speed (m s ⁻¹)					
	0.5-2.1	2.1-3.6	3.6-5.7	5.7-8.8	8.8 - 11.1	≥ 11.1
بم Bam	18	532	551	461	108	67
جیرفت Jiroft	130	565	447	148	28	23
کرمان Kerman	21	561	516	469	52	48
لاله زار Lalehzar	48	557	521	468	86	33
رفسنجان Rafsanjan	16	199	551	466	241	133
شهربابک Shahrbabak	59	210	710	510	100	45
سیرجان Sirjan	24	123	433	614	114	40
زرند Zarand	31	443	535	445	117	53



شکل ۳- درصد بادهای آرام (با سرعت کم تر از ۰/۵ متر بر ثانیه) و میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه) در ایستگاههای مختلف استان کرمان به صورت سالانه طی دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰

Figure 3- Calm winds (wind speeds less than 0.5 m s⁻¹) and the averaged wind speed (m s⁻¹) at different stations in Kerman province during the statistical period of 2006-2010

برداشت، جابجایی و رسوبگذاری و نیز شکل دهی رخساره های فرسایش بادی دارد (۲۵).

با توجه به نقش عامل فرساینده باد در کنترل شدت فرسایش بادی (۲۴)، تحلیل نتایج درصد فراوانی بادهای استان کرمان، نشان از اهمیت این کلاس سرعت در فرآیندهای فرسایش بادی نظیر

جدول ۳- طبقه‌بندی سرعت بادهای فرساینده (سرعت‌های بیشتر از آستانه فرسایش بادی) در ایستگاه‌های مختلف استان کرمان بر حسب درصد در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰

Table 3- Classification of erosive winds (speeds higher than the threshold velocity) at various stations of Kerman province (%) during the statistical period of 2006-2010

نام ایستگاه Station	کلاس سرعت بادهای فرساینده Classes of wind speed (m s ⁻¹)				
	6.7 - 7.7	7.7 - 9.8	9.8 - 11.8	11.8 - 13.9	≥ 13.9
بم Bam	6.35	9.58	5.91	2.40	1.26
جیرفت Jiroft	1.42	1.70	1.42	0.49	0.76
کرمان Kerman	6.73	7.55	2.84	0.93	1.15
لاله‌زار Lalehzar	1.04	7.61	4.70	0.82	0.98
رفسنجان Rafsanjan	5.58	10.78	11.39	4.10	3.17
شهربابک Shahrbabak	6.19	9.46	5.47	1.53	0.93
سیرجان Sirjan	10.13	10.89	5.48	1.75	0.44
زرند Zarand	10.89	5.58	5.80	1.58	1.31

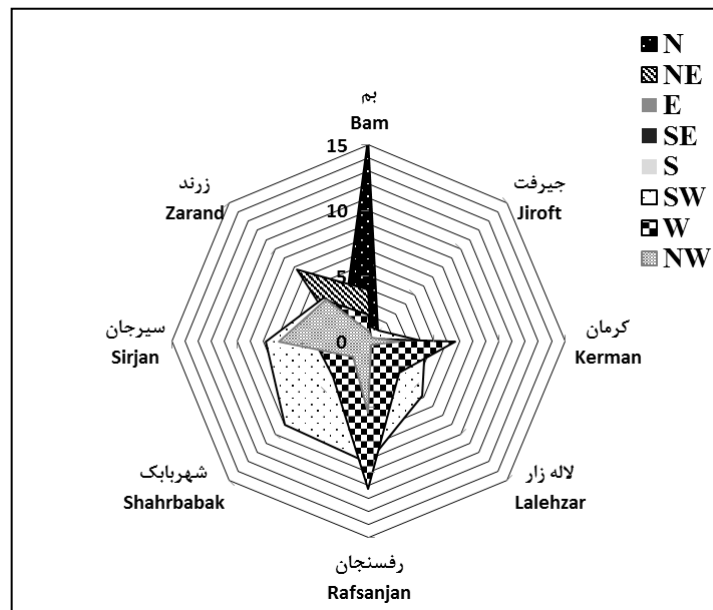
را در تمامی ایستگاه‌های این استان و استفاده صحیح از این اطلاعات در راستای پیش‌بینی‌ها و برنامه‌های مدیریت فرسایش بادی نشان می‌دهد. در واقع از طریق تحلیل داده‌های حاصل از باد در نقاط مختلف استان می‌توان به شناخت بهتری از وضعیت فرسایش بادی منطقه و ارائه راهکارهای حفاظتی دست یافت. هم‌گونه که در بالا گفته شد، ممکن است جهت بادهای گلباد با گطوفان و با در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش یکی نباشد که این مسأله در مقایسه بین شکل‌های ۲ و ۴ برای برخی از ایستگاه‌ها محرز است.

در شکل ۵ درصد فراوانی کلاس‌های سرعت بادهای فرساینده به صورت فصلی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود. بیش‌ترین بادهای فرساینده برای ایستگاه‌های بم، جیرفت، شهربابک، سیرجان و زرند در گرمترین فصل سال یعنی تابستان رخ داده است که طبق شکل ۱ کمترین دریافت بارش را نیز در همین فصل داشته‌اند. همچنین در ایستگاه‌های کرمان و رفسنجان به ترتیب در فصل‌های زمستان و تابستان و در ایستگاه لاله‌زار در فصل زمستان بادهای فرساینده بیشتری وزیده است. از طرفی، به جز ایستگاه لاله‌زار که جز مناطق کوهستانی استان کرمان محسوب می‌گردد، کم‌ترین بادهای فرساینده در سایر ایستگاه‌ها در فصل پاییز وزیده شده است. یافته‌های این شکل همچنین بیانگر بیشترین فراوانی سرعت باد در کلاس ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه زرند است. درصد فراوانی بادهای فرساینده همچنین نشان می‌دهد که فراوانی بادهای فرساینده ایستگاه جیرفت از سایر ایستگاه‌های مورد

نمودار تار عنکبوتی بادهای فرساینده در جهت‌های مختلف باد در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرساینده‌ترین بادهای در ایستگاه رفسنجان و از سمت غرب با فراوانی ۱۱/۲۸ درصد ثبت شده است. ایستگاه بم به عنوان یکی از ایستگاه‌های مهم در معرض فرسایش بادی در استان کرمان که در معرض مستقیم بادهای ۱۲۰ روزه سیستان نیز قرار دارد، بیش‌ترین بادهای فرساینده این منطقه را در دوره آماری ۵ ساله از سمت شمال با فراوانی ۱۵/۵۵ درصد دریافت کرده است. ایستگاه کرمان نیز بیش‌ترین بادهای فرساینده را از سمت غرب به میزان ۶/۶۸ درصد دریافت کرده است. بر اساس شکل ۴، ایستگاه جیرفت در جنوب استان کرمان کم‌ترین فراوانی بادهای فرساینده را دارا می‌باشد هر چند که همان میزان کم (۱/۶۰ درصد) نیز از سمت جنوب این ایستگاه ثبت گردیده است. جهت فرساینده‌ترین بادهای برای ایستگاه‌های سیرجان، لاله‌زار و شهربابک از سمت جنوب غربی به ترتیب با فراوانی ۹/۳۰، ۵/۸۶ و ۸/۹۷ درصد و زرند از سمت شمال شرقی با فراوانی ۷/۷۱ درصد می‌باشد. با استفاده از این نتایج و با در نظر گرفتن سرعت و جهت بادهای فرساینده می‌توان مناطق بحرانی‌تر از نظر بادناکی را شناسایی کرد و بر این اساس، راهکارهای حفاظتی و مهار فرسایش بادی نظیر کاشت گیاهان بومی مناسب و یا احداث بادشکن‌ها (۵) را با هدف کاهش پتانسیل فرسایش بادی در مد نظر قرار داد. با توجه به جهت‌های مختلف وزش بادهای فرساینده، نتایج همچنین اهمیت بررسی و تحلیل بادهای مناطق استان کرمان

فرسایش بادی در این فصل بیشتر فراهم سازد. اگر چه کلاس سرعت ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه در فصل تابستان بیشترین فراوانی را در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد، در فصل زمستان، کلاس با بیشترین سرعت یعنی بیش از ۱۳/۹ متر بر ثانیه فراوانی زیادی دارد. هر چند که در این فصل تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین بارش را نیز داشته‌اند (شکل ۱).

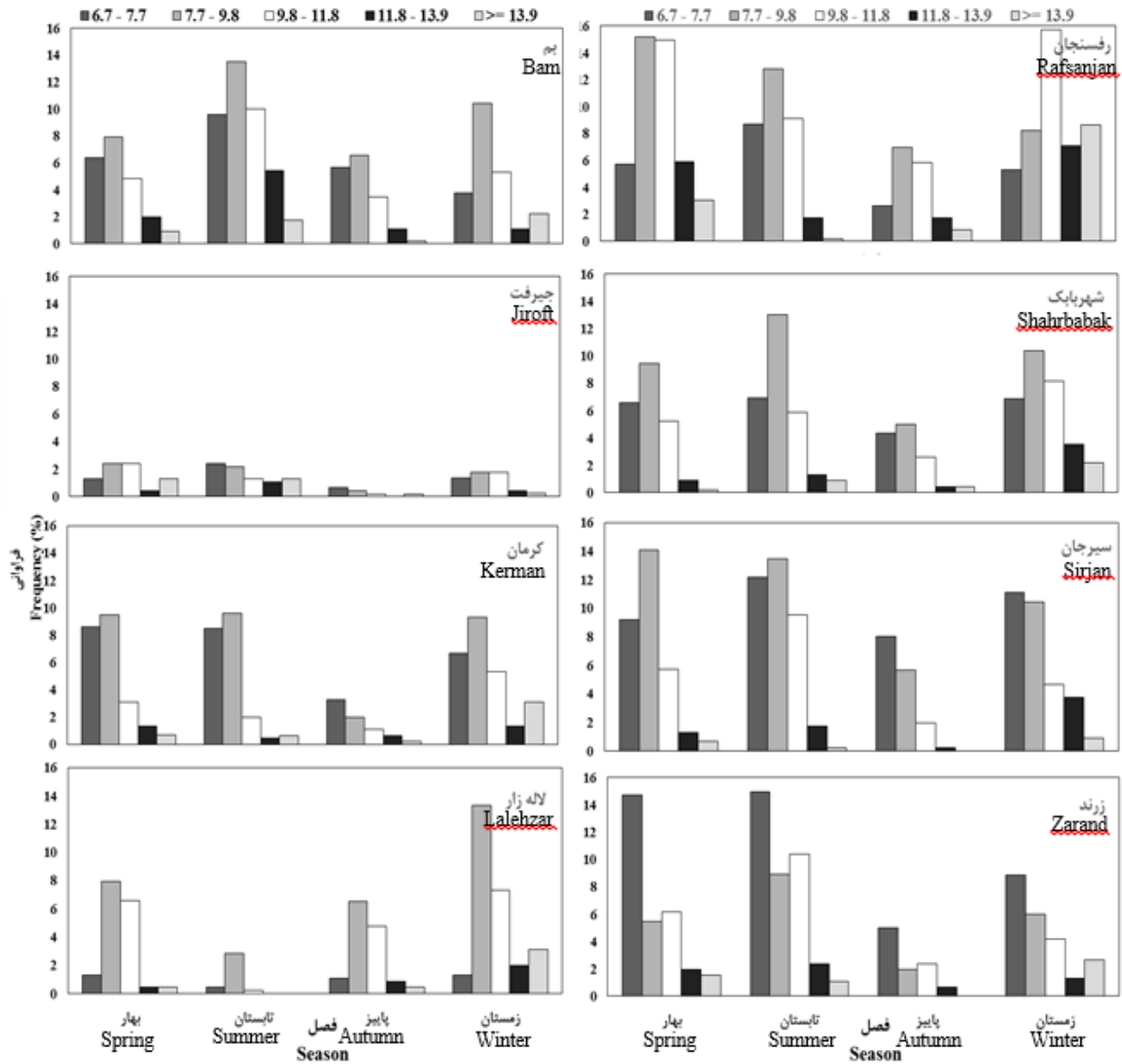
مطالعه کم‌تر است که یکی از دلایل آن، شرایط آب و هوایی این منطقه و رطوبت نسبی بالای هوا و ارتفاع کم آن از سطح دریا می‌باشد. شکل ۱ همچنین نشان می‌دهد که ایستگاه جیرفت بعد از ایستگاه لاله‌زار بیشترین بارش را به ویژه در فصل زمستان داشته است. از منظر دیگر، شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش کلاس سرعت باد همراه با افزایش درجه حرارت و کاهش رطوبت نسبی و همچنین بارش کم - به ویژه در فصل تابستان - می‌تواند زمینه را برای وقوع



شکل ۴- نمودار تار عنکبوتی بادهای فرساینده از جهت‌های مختلف در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۱۰
Figure 4- Radar graphs of erosive winds from different directions at synoptic stations in Kerman province during the statistical period of 2006-2010

می‌وزد. در واقع، فرسایش بادی تابع فرساینده‌گی باد و فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد (۳۱). بنابراین وجود بادهای فرساینده یک منطقه در طول یک فصل به تنهایی نمی‌تواند دلیلی بر زیاد بودن و یا کم بودن میزان فرسایش بادی یک منطقه باشد و نیازمند پژوهش‌ها و مطالعه بیشتر در زمینه خصوصیات خاک آن منطقه و سرعت آستانه فرسایش بادی می‌باشد. به عبارتی در اندازه‌گیری‌های شدت فرسایش بادی تحلیل و بررسی داده‌های حاصل از باد لازم است ولی به‌تنهایی کافی نیست. در مجموع نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، میزان پتانسیل بالقوه فرسایش بادی با وجود بادهای فرساینده بیشتر از ۱۳/۹ متر بر ثانیه و با در نظر گرفتن سرعت آستانه یکسان در بین فصل‌های مختلف، در فصل زمستان بیشتر از سایر فصل‌ها می‌باشد (شکل ۱) که بیانگر اثر تعدیل‌کننده بارش بر فرساینده‌گی بادهای با سرعت بالا در این فصل است.

در شکل ۶ فراوانی بادهای فرساینده در فصول و جهت‌های مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشترین بادهای فرساینده در فصل تابستان برای ایستگاه بم و زرنده به ترتیب از سمت شمال و شمال شرقی و برای ایستگاه‌های جیرفت، شهربابک، لاله‌زار و سیرجان از سمت جنوب غربی در فصل زمستان و نیز برای ایستگاه رفسنجان و کرمان از سمت غرب و در فصل زمستان وزیده است. از آنجا که سمت و سرعت باد مهمترین ویژگی‌های باد محسوب می‌شوند، بر این اساس و طبق شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نقش کلاس سرعت بادهای فرساینده و نیز جهت این بادهای را در هر فصل و برای هر ایستگاه می‌توان مقایسه نمود. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که شدیدترین بادهای (کلاس با سرعت بیشتر از ۱۳/۹ متر بر ثانیه) در استان کرمان، برای بیشتر ایستگاه‌ها در فصل زمستان و البته بسته به موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه از جهت‌های مختلف



شکل ۵- درصد فراوانی فصلی کلاس‌های سرعت بادهای فرساینده در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 5- Percentage of seasonal frequency of wind speed classes at stations studied

ذرات رسوب در جهت‌های مختلف، به عنوان جهت جریان ماسه در دوره آماری ۵ ساله از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ در نظر گرفته شده است. طبق جدول ۴، نتایج همچنین نشان داد که پتانسیل توان حمل ماسه در ایستگاه رفسنجان ۱۶۳۷ واحد برداری تعیین شد که ۲/۵ برابر ایستگاه بم با ۶۵۶/۷ واحد برداری است. دبی رسوب نیز در ایستگاه رفسنجان با میزان ۱۰۲/۶۵ کیلوگرم بر متر در ثانیه در بین دیگر ایستگاه‌ها از بیش‌ترین میزان برخوردار بود و پس از آن ایستگاه بم قرار گرفت. در این بین کم‌ترین دبی رسوب متعلق به ایستگاه جیرفت با ۲۲/۴۰ کیلوگرم بر متر در ثانیه می‌باشد (جدول ۳). شاخص

گلماسه‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه جهت بردار برآیند توان حمل ماسه (RDD^۱) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که جهت حرکت ماسه‌ها در ایستگاه‌های کرمان، جیرفت، سیرجان، رفسنجان و شهربابک از سمت غرب به شرق، در ایستگاه لاله‌زار از جنوب غربی به شمال شرقی، در ایستگاه بم از شمال به جنوب و در ایستگاه زرنند از شمال غربی به جنوب شرقی می‌باشد (شکل ۷). در حقیقت برآیند انتقال و جابجایی

1- Resultant drift direction

پتانسیل حمل ماسه و دبی حمل رسوب در فصل‌های مختلف یکسان است. لازم به ذکر است که شاخص پتانسیل حمل رسوب بیانگر کل انرژی باد جهت حمل ماسه در منطقه یا ایستگاه مورد نظر می‌باشد و دبی حمل رسوب میزان ذرات منتقل شده را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۸ (الف و ب) مشاهده می‌شود ایستگاه رفسنجان با میزان ۹۱۱ واحد برداری بیش‌ترین پتانسیل حمل ماسه را در فصل زمستان در بین ایستگاه‌ها دارد و در عین حال این ایستگاه با میزان ۲۳۱/۵ کیلوگرم بر متر در ثانیه بیش‌ترین میزان دبی حمل رسوب را نیز در فصل زمستان به خود اختصاص داده است. علاوه بر این، نتایج شکل ۹ (ج) نشان می‌دهد که ایستگاه‌های رفسنجان در فصل زمستان، کرمان در فصول زمستان و پاییز، جیرفت در فصل پاییز و بم در فصل تابستان با شاخص همگنی بیشتر از ۰/۸ دارای بادهای یک جهت و با تغییرپذیری کم می‌باشند. سایر ایستگاه‌ها در همه فصول دارای بادهای دو جهت و با تغییرپذیری متوسط هستند. با استفاده از شاخص همگنی شکل تپه‌ها و نوع جریان باد قابل پیش‌بینی می‌باشند. به علاوه جهت شکل‌گیری رخساره‌های بادی با بادهای طوفان‌زا تطابق دارد. هرچه شاخص همگنی به عدد ۱ نزدیکتر باشد بادهای یک جهت و هر چه این شاخص به سمت صفر میل کند بادهای قدرتمندتر و چند جهت خواهد بود (د). بنابراین می‌توان عنوان کرد که هر چه تغییرپذیری بادهای بیشتر شود از پتانسیل فرسایش بادی بیش‌تری برخوردار می‌باشند. لذا بادهای یک جهت نسبت به بادهای دو جهت دارای پتانسیل فرسایش بادی کمتری بوده و فرسایش کمتری را نیز به دنبال خواهند داشت.

همگنی نشان می‌دهد که ایستگاه‌های زرنند و جیرفت دارای بادهای چند جهت هستند و بقیه ایستگاه‌ها با شاخص همگنی بین ۰/۳ تا ۰/۸ دارای بادهای دو جهت با تغییرپذیری متوسط می‌باشند. شاخص همگنی در پیش‌بینی نحوه شکل‌گیری و پیشرفت رخساره‌های بادی نقش بسزایی دارد (د).

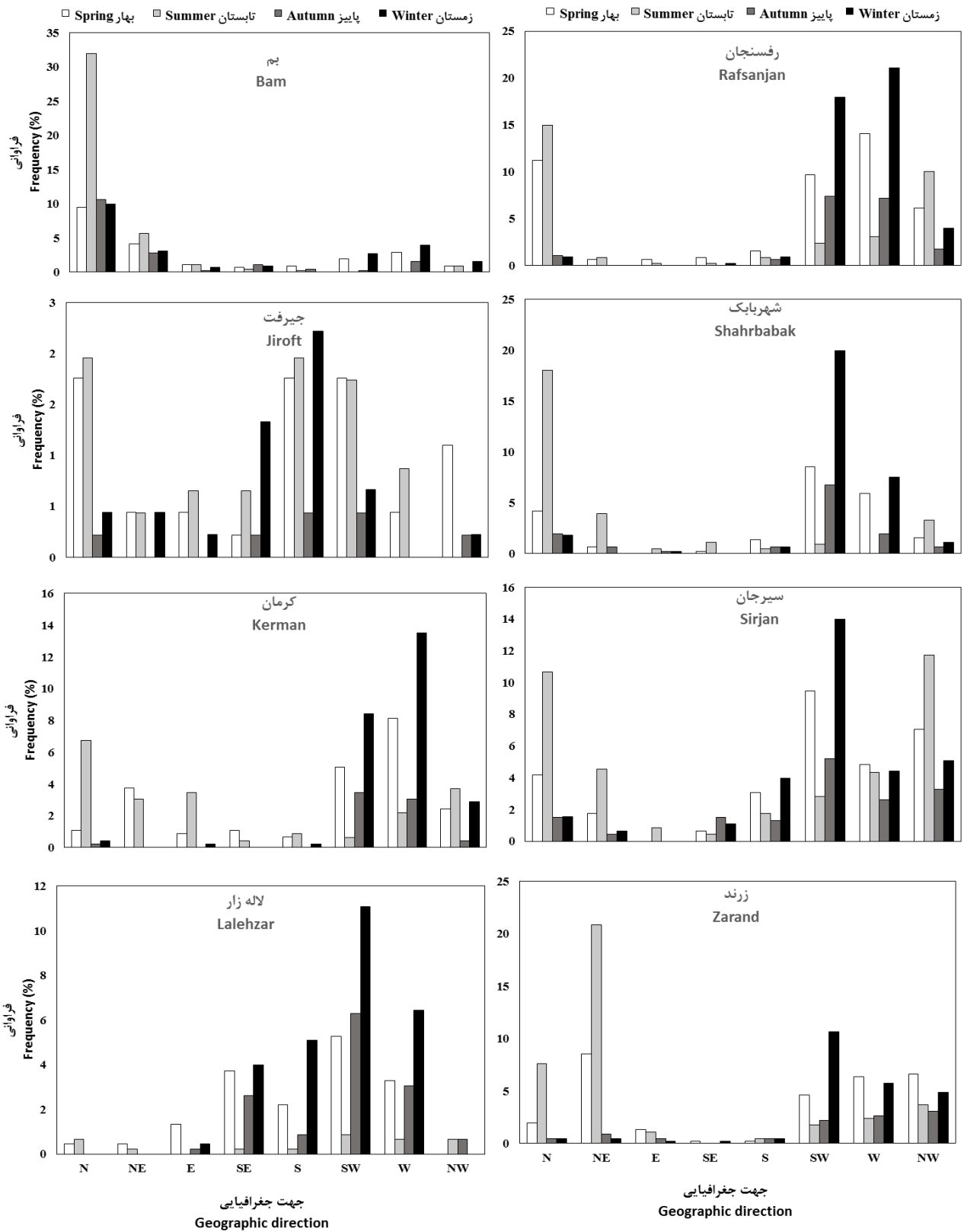
نمودار تار عنکبوتی پتانسیل توان حمل ماسه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، ایستگاه رفسنجان دارای پتانسیل حمل ماسه بیش‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها است. به غیر از ایستگاه لاله‌زار که از مناطق کوهستانی استان کرمان تلقی می‌گردد، در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقدار DPt بیشتر از ۴۰۰ بدست آمد. این یافته نشان از قدرت فرسایشی بالای باد در ایجاد فرسایش بادی در بیشتر مناطق استان کرمان دارد.

شکل ۹ مقایسه شاخص‌های گلماسه شامل پتانسیل توان حمل ماسه، دبی رسوب و شاخص همگنی را در فصول مختلف سال و در دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ (الف) مشخص است، پتانسیل توان حمل ماسه در ایستگاه‌های بم، جیرفت و زرنند در فصل تابستان و در ایستگاه‌های کرمان، رفسنجان، شهربابک، سیرجان و لاله‌زار در فصل زمستان به حداکثر مقدار خود رسیده است. مقایسه دبی رسوب بین ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز نشان داد که بیش‌ترین دبی رسوب در فصل تابستان در ایستگاه‌های بم، جیرفت و زرنند و بیش‌ترین مقدار آن در فصل زمستان در ایستگاه‌های کرمان، رفسنجان، شهربابک، سیرجان و لاله‌زار رخ می‌دهد (شکل ۹، ب). همانگونه که مشاهده می‌شود، روند تغییرات

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های گلماسه در ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت سالانه

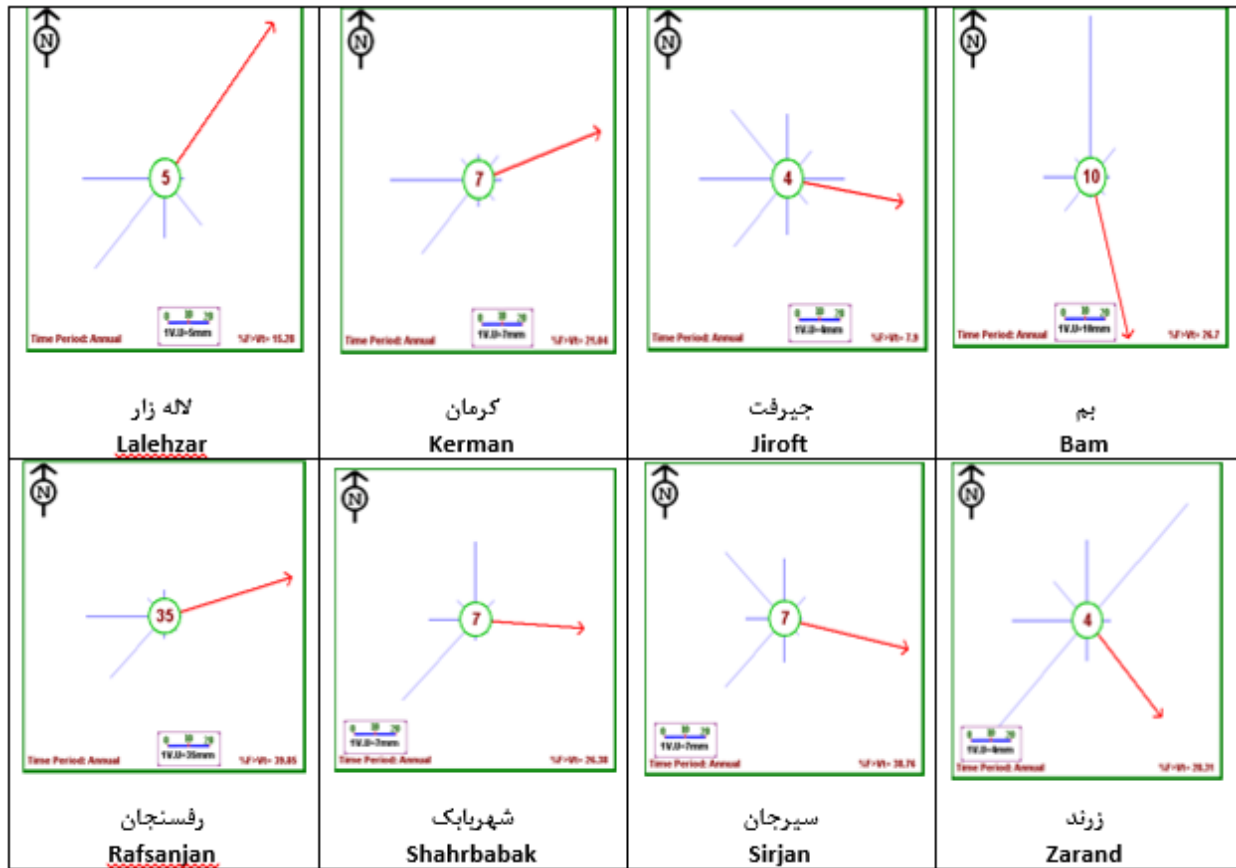
Table 4- Annual sand rose indices at the stations studied

شاخص‌های گلماسه Sandrose Index	واحد Unit	نام ایستگاه Station							
		زرنند Zarand	سیرجان Sirjan	شهربابک Shahrbabak	رفسنجان Rafsanjan	لاله‌زار Lalehzar	کرمان Kerman	جیرفت Jiroft	بم Bam
پتانسیل حمل ماسه Total drift potential	واحد برداری (V.U)	546.3	538.7	447.1	1637.0	366.9	418.1	427.9	656.7
بار رسوب Sediment load	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)	36.64	28.43	28.53	102.65	25.97	27.23	22.40	44.74
شاخص همگنی Uni-directional index	واحد برداری (V.U)	0.23	0.46	0.46	0.79	0.66	0.61	0.30	0.60

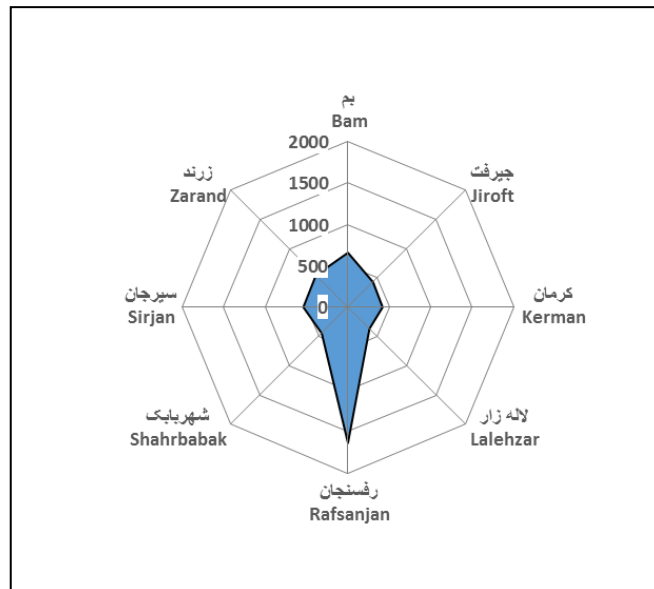


شکل ۶- درصد فراوانی فصلی بادهای فرساینده ایستگاه‌های مورد مطالعه در جهت‌های مختلف

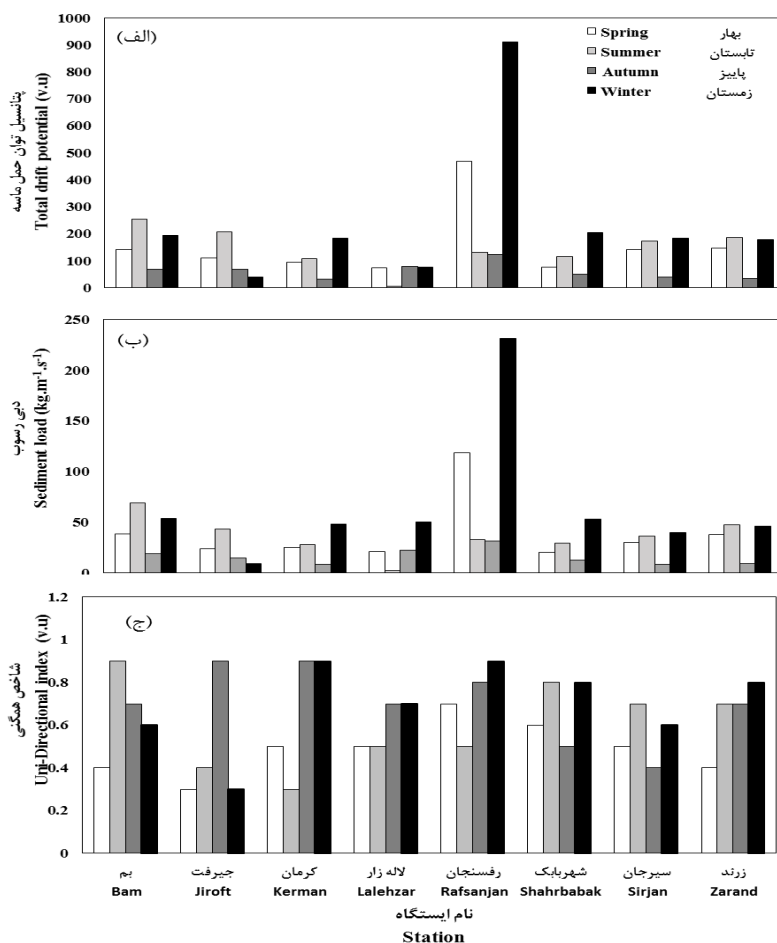
Figure 6- The percentage of seasonal erosive winds of stations studied from different directions



شکل ۷- گلماسه‌های سالانه ایستگاه‌های مختلف استان کرمان
Figure 7- Annual sand rose of different stations of Kerman province



شکل ۸- نمودار تار عنکبوتی توان حمل ماسه در ایستگاه‌های مختلف استان کرمان
Figure 8- The diagram of total drift potential at different stations in Kerman province



شکل ۹- شاخص‌های گلماسه ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت فصلی شامل توان حمل ماسه (الف)، بار رسوب (ب) و شاخص همگنی (ج)
 Figure 9- Seasonal sand rose indices of the studied stations including total drift potential (a), sediment load (b), and uni-directional index (c)

فرساینده‌ی باد در این منطقه قابل توجه است. هر چند که فراوانی بادهای با سرعت بالا نسبت به دیگر کلاس‌های سرعت باد زیاد نبود، اما اثر آن بر حمل و جابجایی رسوب ناشی از وقوع فرسایش بادی غیرقابل چشم‌پوشی است. هر چند با استفاده از ترسیم گلباد می‌توان جهت بادهای با فراوانی زیاد و در سرعت‌های مختلف را نشان داد اما در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش از طریق تعیین شاخص‌های گلماسه اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلیل اینکه بادهای با سرعت کم‌تر از آستانه فرسایش در محاسبه فرساینده‌ی بادهای حذف شدند، از این رو ممکن است جهت گلباد با جهت فرساینده‌ترین بادهای در برخی ایستگاه‌ها یکسان نباشد (۲۶). در همین خصوص بیشترین درصد بادهای آرام در ایستگاه جیرفت و کمترین درصد این بادهای در ایستگاه لاله‌زار به عنوان یک منطقه کوهستانی مشاهده شد. کلاس متوسط سرعت باد یعنی ۷/۷ تا ۹/۸ متر بر ثانیه در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه به عنوان کلاس با بیشترین فراوانی شناسایی شد و فراوانی بادهای با سرعت بیشتر، کمتر بود. در این زمینه، پارسامهر و خسروانی

نتایج پژوهش حاضر در زمینه پتانسیل حمل ماسه و فراوانی بادهای فرساینده نشان داد که استان کرمان در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر پتانسیل فرسایش بادی در وضعیت شدید قرار دارد. وقوع بادهای در جهت‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌تواند به دلیل وسعت و پهناوری این استان و همچنین داشتن آب و هوای متنوع و وجود کوه‌های مرتفع باشد. در این زمینه، نظری سامانی و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که شرایط محلی، زمین‌شناسی، عوامل انسانی و برخی عوامل دیگر که در فرسایش بادی دخالت دارند، می‌تواند از محلی به محل دیگر متفاوت باشد (۲۱). نتایج محدود پژوهش‌هایی که در زمینه وقوع گرد و غبار و شدت فرسایش بادی در استان کرمان انجام شده، دلالت بر این دارد که این استان در معرض جدی فرسایش بادی قرار داشته و این خطر هر ساله افزایش می‌یابد. برای نمونه، احمدی و مصباح زاده (۲۰۱۱) کلاس فرسایش بادی در این استان را شدید گزارش کردند (۱). فراوانی بادهای با کلاس سرعت متوسط به ویژه در ایستگاه رفسنجان نشان می‌دهد که

همسو و یا مخالف و یا بادهای چند جهته را تعیین کرد و بر این اساس نحوه شکل‌گیری انواع رخساره‌های فرسایشی را تفسیر نمود (۲۳). مشاهده شد که تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه‌های زرنده و جیرفت دارای بادهای دو جهته هستند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط اختصاصی و دادفر (۲۰۱۴) و یمانی و همکاران (۲۰۱۱)، عوارض حاصل از وزش بادهای یک جهته بیشتر از نوع بارخان و تپه‌های ماسه‌ای طولی است و در مورد بادهای چند جهته بیشتر از نوع تپه‌های ستاره‌ای خواهد بود (۵ و ۳۰).

جهت حرکت ماسه‌های روان بستگی به جهت باد دارد در حالی که حجم انتقال ماسه بادی به سرعت و تداوم وزش باد در یک منطقه وابسته است (۳۰). در واقع، سرعت باد مهمترین عامل در شروع حرکت ذرات رسوب در پدیده فرسایش بادی است و البته قطر ذرات رسوب عامل مهمی در تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی می‌باشد (۳۰ و ۳۱). نتایج مطالعه محمودآبادی و زمانی (۲۰۱۲) نشان داد که با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش به طور معنی‌داری افزایش یافته که این افزایش سرعت باد علاوه بر میزان ذرات منتقل شده، اندازه ذرات و مکانیسم حمل ذرات در حال انتقال را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۵). انواری و محمدی (۲۰۰۹) در پژوهش خود گزارش کردند که قطر ذرات رسوب در سرعت آستانه فرسایش بادی، بیشتر در کلاس اندازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر و ۰/۱ تا ۰/۰۵ میلی‌متر است (۳). یمانی و همکاران (۲۰۱۱) نیز عنوان داشتند که بادهای با سرعت بالا نسبت به بادهای با سرعت کمتر ولی با تداوم بیشتر، نقش بسیار بیشتری در فرسایش بادی به عهده دارند. بنابراین، یک باد سریع با فراوانی کم می‌تواند حجم بیشتری از ماسه را نسبت به یک باد با سرعت کم‌تر و البته فراوانی بیشتر حمل کند (۳۰). به طور کلی انجام پژوهش‌های مربوط به فرسایش بادی با استفاده از تحلیل داده‌های بادسنجی و یا رسم گلبادها، گلفوفان‌ها و گلماسه‌ها به تنهایی در تفسیر وضعیت فرسایش بادی یک منطقه کافی نیست و تعیین سرعت‌های آستانه فرسایش بادی با استفاده از دستگاه تونل باد، اطلاعات دقیق‌تری بدست می‌دهد (۷). بررسی سالانه، فصلی و حتی ماهانه بادها در مناطق مختلف می‌تواند اطلاعات مهم و کارآمدی را در اختیار کارشناسان قرار دهد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان از پتانسیل بالای بادهای منطقه در تولید رسوب ناشی از فرسایش بادی دارد. مناطق مختلف استان، وضعیت سمت و سرعت‌های مختلفی از باد را تجربه کرده که این موضوع بر جهت حمل ذرات رسوب و نیز شکل‌گیری عوارض و رخساره‌های مختلف فرسایش بادی مؤثر است. از طرفی، اهمیت تحلیل داده‌های بادسنجی در تعیین بهتر پتانسیل فرسایش بادی و نیز

گزارش کردند که بادهای با سرعت زیاد به دلیل فراوانی کم در تشکیل تپه‌های ماسه‌ای در استان اصفهان نقش قابل ملاحظه‌ای نداشته است. آنها اهمیت بادهای با سرعت متوسط اما با فراوانی بالا را در ایجاد رسوب ناشی از فرسایش بادی قابل تأمل دانسته‌اند (۲۳). توکلی فرد و همکاران (۲۰۱۲) نیز عنوان کردند که بیش‌ترین مقدار حمل رسوب در منطقه کاشان توسط بادهای با سرعت متوسط و فراوانی زیاد انجام شده است (۲۷). دلیل این موضوع چنین بیان شد که بادهای کم‌تر از سرعت آستانه در آنالیز داده‌های باد حذف شده و بادهای با سرعت زیاد نیز به دلیل فراوانی بسیار کم در تشکیل تپه‌های ماسه‌ای نقش قابل ملاحظه‌ای ندارند (۲۷). در اکثر ایستگاه‌های استان کرمان، حاکمیت بادهای غربی و جنوب غربی دیده شد. نتایج تحلیل بادهای سواحل جنوبی ایران توسط اختصاصی و دادفر (۲۰۱۴) نشان داد که جهت باد غالب در این مناطق غربی می‌باشد و بادهای طوفان‌زا از جهت‌های غرب و جنوب غرب فراوانی بیش‌تری داشتند. جهت انتقال ماسه نیز از سمت جنوب و جنوب غربی مشاهده شد که با مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای موجود منطقه همخوانی دارد (۵).

نتایج همچنین نشان داد که در فصل‌های مختلف سال و موقعیت‌های مکانی متفاوت، سرعت و جهت‌های بادهای فرساینده متفاوت است. ناهمگنی در موقعیت رخساره‌ها، بادهای فرساینده در فصول مختلف سال و تفاوت در سرعت آستانه اراضی‌های باعث ایجاد چنین تنوعی می‌شود (۲۷). میزان خطر فرسایش بادی در این استان در فصل پاییز حداقل و در فصل‌های زمستان و تابستان حداکثر بود. هر چند که برای اثبات آن نیاز به پژوهش‌های بیشتری در زمینه سرعت آستانه فرسایش بادی می‌باشد. در این زمینه، صارمی نایینی (۲۰۱۷) در پژوهش خود در زمینه تعیین فراوانی سرعت و جهت بادهای فرساینده در استان یزد دریافت که به دلیل بیشتر بارش‌ها در فصل زمستان در این استان، رخ می‌دهد لذا به دلیل بیشتر بودن رطوبت خاک در این فصل و در نتیجه بالاتر بودن سرعت آستانه فرسایش بادی در این فصل نسبت به سایر فصول، بیشتر از ۶ متر بر ثانیه باشد (۵). به عبارتی، اگرچه فصل زمستان در بیشتر مناطق استان کرمان دارای بادهای فرساینده بیشتر و به تبع آن پتانسیل فرسایش بادی بیشتری است، اما با در نظر گرفتن میزان بیشتر بارش در این فصل و در نتیجه افزایش میزان رطوبت خاک که بر فرسایش‌پذیری خاک‌ها و نیز سرعت آستانه فرسایش بادی تأثیر می‌گذارد، ممکن است شدت فرسایش بادی چندان بیشتر از سایر فصول نباشد. با این حال مقادیر پتانسیل حمل ماسه و دبی رسوب دلالت بر پتانسیل فرسایش بادی قابل ملاحظه‌ای در این استان دارد و بر توجه مناسب و کافی بر ارائه راهکارهای حفاظتی برای جلوگیری و وقوع فرسایش بادی و یا مهار آن تأکید می‌کند. بر اساس تحلیل شاخص همگنی باد نیز می‌توان نوع بادهای یک جهته، دو جهته،

فصلی که خود بر ذخیره رطوبت خاک و نیز سرعت آستانه فرسایش بادی اثر می‌گذارد، می‌تواند برای ارائه بهتر و دقیق‌تر راهکارهای حفاظتی و مهار فرسایش بادی راهگشا باشد.

پتانسیل حمل ماسه بادی در استان کرمان مشخص شد. بر مبنای تحلیل فرساینده‌ی بادها طی فصول مختلف، می‌توان تا حدی وضعیت تولید و حمل رسوب ناشی از فرسایش بادی را تعیین نمود. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن سایر پارامترهای جوی نظیر بارش‌های

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). *Journal of Water and Soil* 25(1): 11-18. (In Persian with English abstract)
- 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 2nd Conference on Regional of Natural and Environment. Feb 2009, Arsanjan, Iran. (In Persian)
- 4- Eidiyan E., Charkhabi A. H., Arshem A., and Rajabi M.R. 2011. The analysis of erosive winds in how to carry wind sediments in the Bostan areas, the west of Khuzestan. The 2nd National Conference on Combating Desertification and Sustainable Development of Iran Desert Wetlands. 23-24 September 2011, Arak, Iran. (In Persian)
- 5- 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 with English abstract)
- 6- Ekhtesasi M.R., Dadfar S., Kamrani F., and Shah Bandari R. 2011. Identification of storm areas of desert plains by the combination of wind rose, storm rose and sand rose graph results (case study: Bafgh plain). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 5(16): 39-44. (In Persian with English abstract)
- 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 with English abstract)
- 8- Fryberger S.G., and Dean G. 1979. Dune forms and wind regime, In: McKee, (Ed), a study of global sand seas. US Geological Survey Professional Paper No. 1052. 137-169.
- 9- Gromkova N., and Butchvarov I. 2010. Applying the model for transformation of the annual climatic wind rose in the air pollution modeling from point source. *Bulgarian Geophysical Journal*, 36: 40-56.
- 10- 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 2nd National Conference on Desert with the Approach for the Management of Arid and Desert Areas. (In Persian)
- 11- Jafari F., and Khademi H. 2015. Evaluating the rate of atmospheric dust deposition in different locations of Kerman city. *Journal of Water and Soil Science* 18(70): 207-217. (In Persian with English abstract)
- 12- Kheyri Sh., Hanifepoor M., and Khosravi H. 2015. Analysis of wind erosion in two statistical periods (1951-1981) and (1982-2012) (case study: Tabriz). International Conference on Sustainable Development, Strategies and Challenges with a Focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism, 24-26 February 2015, Tabriz, Iran. (In Persian)
- 13- Maghsoudi M. 2007. Understanding of the processes affecting the development of sand (case study: sand effects of Sirjan plain). *Geographical Research* 56: 149-160. (In Persian with English abstract)
- 14- Mahmoodabadi M., and Ahmadbeigi B. 2013. Effect of primary particle size distribution on aggregate stability at different size classes. *Journal of Water and Soil Science* 23(3): 207-219. (In Persian with English abstract)
- 15- Mahmoodabadi M., and Rajabpour H. 2017. Study on the effect of initial soil moisture content on wind erosion rate using a laboratory wind tunnel. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(2): 167-182. (In Persian with English abstract)
- 16- 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 with English abstract)
- 17- Mahmoodabadi M., Dehghani F., and Azimzadeh H.R. 2011. Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 1(1): 81-96. (In Persian with English abstract)
- 18- Mehrabi S., Soltani S., and Jafari R. 2015. Analyzing the relationship between dust storm occurrence and climatic parameters. *Journal of Water and Soil Science* 19 (71): 69-81. (In Persian)

- 19- Mosaffaie J., Ekhtesasi M.R., and Salehpour Jam A. 2017. Seasonal variation of the erosion rate using direct measurement. *Watershed Management (Pajouhesh and Sazandegi)* 115: 48-56. (In Persian with English abstract)
- 20- 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.
- 21- Nazari Samani A.A., Khosravi H., Mesbahzadeh T., and Rahdari M.R. 2016. Investigate of wind regime and sand drift potential in order to identify of sand dunes forms. *Watershed Management (Pajouhesh and Sazandegi)* 111: 19-33. (In Persian with English abstract).
- 22- Omidvar K., and Nekoonam Z. 2011. An application of wind rose and dust rose in the analysis of dust phenomenon and determining the seasonal regime of dust winds (case study: Sabzevar city). *Physical Geography Research Quarterly* 43(76): 85-104.
- 23- Parsamehr A., and Khosravani Z. 2017. Analysis of erosive winds and depositions drift potential in desert regions of Esfahan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research* 23(4): 832-842. (In Persian with English abstract)
- 24- 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).
- 25- 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 with English abstract)
- 26- Tahmasbi Birgani A.M., Ahmadi H., Refahi H., and Ekhtesasi M.R. 2000. Comparison between the sedimentation potential of wind and water erosions by using MPSIAC and IRIFR.E.A models in desert regions of Iran (case study: Ab-bakhsha basin in the Kerman zone). *Iranian Natural Resources Journal* 53(1): 53-65. (In Persian with English abstract)
- 27- 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). *Environmental Erosion Research Journal* 2(2): 25-41. (In Persian with English abstract)
- 28- Varma S.A.K., Sirmurali M., and Varma S.V.K. 2013. Evolution of wind rose diagrams for RTPP, KADAPA, A.P, India. *International Journal of Innovative Research and Development* 2: 150-154.
- 29- 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)
- 30- 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)
- 31- 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.

Wind Erosion Potential of Kerman Province using Seasonal Analysis of Wind Rose and Sand Rose

S. Zamani¹ - M. Mahmoodabadi^{2*} - N. Yazdanpanah³ - M.H. Farpoor⁴

Received: 18-06-2018

Accepted: 27-01-2019

Introduction: Wind erosion is one of the most important destructive phenomena leading to land degradation and desertification, which occurs due to blowing of erosive winds over a susceptible soil surface or a smooth land. Iran is mostly located in arid and semiarid climates; consequently, wind erosion dominates large parts of the country due to the climate and land mismanagement. In this regard, Kerman as the largest province in Iran has been under influence of erosive winds with high damaging potential. Wind erosion is a function of two agents including erosivity and erodibility. As wind velocity increases, the rate of wind erosion increases as well, while an increase in threshold friction velocity results in sand drift potential reduction. On the other hand, soil properties can control wind erosion rate through affecting both soil erodibility and threshold velocity. In addition, wind erosion is directly influenced by the direction and velocity of wind. Therefore, for better understanding of this phenomenon, analysis of wind erosivity based on meteorological data is of importance. The aim of this study was to analysis wind erosivity in Kerman province and the wind erosion potential in different parts of the province.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate the potential of wind erosion in different parts of Kerman province based on seasonal wind data obtained for the period from 2006 to 2010. For this purpose, eight synoptic stations were selected and wind rose and sand rose were plotted for each station using WR Plot View.8 and Sand Rose Graph 3. For each season and for the whole period, erosive wind speed classes, prevailing wind direction, and the sand rose components including drift potential, sediment load and uni-directional index were obtained for each station.

Results and Discussion: This study results indicated that the intermediate wind speed class i.e. 7.7 to 9.8 m s⁻¹ with the west and southwest directions had the highest frequency at most stations. The most erosive winds occurred during winter and summer, while the lowest ones were found in autumn. In winter, the highest wind speed class i.e. >13 m s⁻¹ was the most frequent class. However, precipitations mostly occurring during winter can moderate the sand transport potential, since the higher precipitation causes a higher soil moisture level and enhanced threshold velocity. In addition, Jiroft station had the most frequent calm winds, whereas Lalehzar station exhibited the least frequency of these winds as this site is located in a mountainous region. Among the stations, the highest potential of sand transport (1637 vector unit) and the greatest sediment discharge (102.62 kg m⁻¹ s⁻¹) were observed at Rafsanjan station. However, the lowest sediment discharge was found at Jiroft station with 22.40 kg m⁻¹ s⁻¹. In all stations, the values of DPt were more than 400 indicating high wind erosion potentials in most areas of the province. The assessment of the uni-directional index illustrated that the investigated wind properties varied for different seasons and regions. Analysis of this index showed that Zarand and Jiroft had multi-directional winds, while other stations with a uni-directional index ranging from 0.3 to 0.8 experienced bi-directional winds with moderate variations. Furthermore, the analysis of resultant drift direction implied that the sand transport direction in Kerman, Jiroft, Sirjan, Rafsanjan and Shahrabak sites was from west to east, at Lalehzar station was from southwest to northeast, at Bam station was from north to south, and at Zarand station was from northwest to southeast. The highest values of total drift potential in Bam, Jiroft and Zarand were obtained in summer season, while the maximum total drift potential was recorded in wintertime for Kerman, Rafsanjan, Shahrabak, Sirjan and Lalehzar locations. The findings of this study revealed the significance of wind erosivity analysis in order to make a better understanding of wind erosion processes and achieve a more suitable strategy to combat this environmental

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Associate Professor and Professor, Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Kerman, Respectively

(* - Corresponding Author Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran

threat.

Conclusions: It was concluded that due to climate conditions, Kerman province as the largest province of Iran has experienced high potentials of wind erosion and sand transport. In addition, the prevailing direction and most frequent velocity classes of winds differ among different parts of the province demonstrating the possibility of the formation of different features of wind erosion. Finally, the high values of DPt (> 400) were obtained for most stations, showed a high wind erosion potential in the province.

Keywords: Drift potential, Erosive winds, Kerman province, Uni-directional index, Wind erosion