

تحلیل فرسایش بادی و پتانسیل حمل ماسه‌های روان واقع در قلمرو بیابان لوت

ساسان زنگنه تبار: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

مهران مقصودی*: دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

فاطمه منبری: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

نوع مقاله: پژوهشی

مینا حسینی: کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۵)

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی جهت باد و پتانسیل حمل ماسه در سطح بیابان لوت، از آمار ۲۰ ساله‌ی چهار ایستگاه سینوپتیک بم، شهداد، نهبندان و نصرت آباد استفاده شد. تحلیل این داده‌ها، در نرم‌افزارهای ویندوز و سندروز انجام شد. نتایج بر این دلالت داشت که غالب بادهای در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان از جهات شمالی می‌وزند، اما در ایستگاه‌های بم و نصرت آباد به سمت لوت متمرکز می‌شوند. تطبیق نتایج گل‌طوفان و گل-ماسه‌ها نشان می‌دهد که جهت بادهای ایستگاه‌های شهداد و بم با جهت شمال غربی - جنوب شرقی کلوته‌های واقع در غرب بیابان لوت انطباق کامل دارد و در شرق لوت جایی که ریگ وسیع یلان قرار دارد، بادهای دو ایستگاه نهبندان و نصرت آباد کاملاً مخالف هم هستند که شرایط لازم را برای تشکیل هرم‌های ماسه‌ای در مرکز این ریگ فراهم می‌کند. در ایستگاه‌های بم و شهداد، بالاترین پتانسیل حمل ماسه (DP) مربوط به جهات شمال و شمال شرقی و در ایستگاه شهداد، جهات مابین غرب تا شمال شرقی است؛ در حالی که در ایستگاه نصرت آباد، جهت آن کاملاً نسبت به سایر ایستگاه‌ها متفاوت و بالاترین مقدار آن مربوط به جهات جنوب و جنوب غربی است. مجموع توان حمل ماسه (DPT) نیز به ترتیب به ایستگاه‌های شهداد، نهبندان، نصرت آباد و بم اختصاص دارد. بالاترین مقدار بردار برآیند توان حمل ماسه (RDP)، مربوط به ایستگاه شهداد است و بعد از آن به ترتیب ایستگاه‌های نهبندان، نصرت آباد و بم قرار دارند. بررسی شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI)، بیانگر بادهای یک جهته در ایستگاه نهبندان و بادهای دو جهته با زاویه‌ی منفرجه در ایستگاه‌های بم، شهداد و نصرت آباد است. بیشترین مقدار دبی حمل ماسه مربوط به ایستگاه شهداد و کمترین میزان آن مربوط به ایستگاه نصرت آباد است. بیشترین مقدار کل ماسه‌ی حمل شده (TSF) به ترتیب به ایستگاه شهداد، نهبندان، نصرت آباد و بم تعلق دارد. بیشترین مقدار برآیند حمل ماسه (DSF) نیز به ترتیب به ایستگاه شهداد، نهبندان، بم و نصرت آباد بازمی‌گردد.

واژگان کلیدی: باد، پتانسیل حمل ماسه، فرسایش بادی، لوت.

۱- مقدمه

مناطق خشک و نیمه خشک جهان بیش از ۳۰ درصد سطح زمین را در برمی‌گیرد (Okin et al, 2006). باد به عنوان یکی از عوامل فرسایش دهنده‌ی سطح زمین، به حمل ماسه‌ها و تغییر شکل در مناطق خشک منجر می‌شود. عوامل مختلفی در شدت فرسایش بادی مؤثرند که این عوامل در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک و خشک بیشتر دیده می‌شود (Whicker et al, 2006)، این پدیده، به شدت پویا و دارای تغییرات زمانی است و در عین حال، در سطح وسیعی عمل می‌کند. تحرک تپه‌های ماسه‌ای و رسوب‌گذاری ماسه‌های بادی، از شرایط باد غالب در منطقه‌ی خشک تبعیت می‌کند (Lancaster, 1995 & Lettau, 1978 & Tsoar, 1994). سرعت و جهت باد از عوامل مهم در تعیین میزان فرساینده‌گی باد است و در کنترل شدت فرسایش بادی نقش مهمی دارد (Skidmore, 1987 & Zhuodong Zhang et al, 2012). در واقع، فرسایش بادی ارتباط مستقیمی با سرعت باد دارد و هر چه سرعت باد بیش از مقدار آستانه باشد، افزایش این سرعت به تقویت فرساینده‌گی باد و در نتیجه، تشدید فرسایش بادی منجر می‌شود (Sterk, 2000 & Zhang et al, 2004). سرعت باد یکی از عوامل مهم در شدت حمل ذرات رسوب است که از الگویی کلی بر اساس موقعیت جغرافیایی منطقه و فصل وزش باد پیروی می‌کند (Toy et al, 2002). به طور معمول جهت باد غالب، سمت‌وسوی جابه‌جایی بیشترین مقدار ذرات رسوب را تعیین می‌کند (Skidmore, 1987). حرکت باد و تغییرپذیری جهت آن، تأثیر معنی‌داری در حمل و نقل ماسه‌ی بادی دارد. بیشترین مدل مورد استفاده در برآورد حمل و نقل ماسه بادی، توسط فرای‌برگر و همکاران (Fryberger et al, 1979) تهیه شده‌است. مدل فرای‌برگر، مبتنی بر استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد برای تخمین پتانسیل حمل ماسه (DP) است. این مدل، شامل محاسبه‌ی فرکانس هر کلاس سرعت باد بالاتر از یک آستانه‌ی حمل و نقل، در طی یک دوره‌ی زمانی برای هر جهت باد است (Pearce and Walker, 2005). از این مدل به طور گسترده‌ای در سراسر جهان استفاده شده‌است تا ظرفیت باد را برای حمل و نقل ماسه تخمین بزند (Al-Awadhi and Al-Dousari, 2013 & Livingstone et al, 2010 & Zhengcai Zhang et al, 2015). فلات ایران به دلیل قرارگرفتن بر روی کمربند خشک نیمکره‌ی شمالی، یکی از مناطق حساس دنیا در برابر فرسایش بادی است (پارسامهر و پورخسروانی، ۲۰۱۷)؛ به عبارت دیگر، دو سوم از گستره‌ی کشور ایران در این اقلیم واقع شده‌است که در کل، ۴۵ میلیون هکتار آن را بیابان‌ها تشکیل می‌دهد (Fatahi et al, 2002). بیابان لوت با حجم عظیمی از توده‌های ماسه‌ای، یکی از فعال‌ترین مکان‌ها نسبت به تغییرات سرعت و جهت باد است. قسمت شرقی این منطقه که شامل بزرگ‌ترین توده‌ی ریگی ایران یعنی ریگ یلان است، زیر سلطه‌ی بادهای ۱۲۰ روزه است که اهمیت بررسی بادهای و نقش شکل‌زایی آن را در فصل وزش این بادهای دوچندان می‌کند. در زمینه‌ی تحلیل باد و بررسی میزان فرساینده‌گی آن، تحقیقاتی در جهان و ایران صورت گرفته‌است: Hereher (۲۰۱۸)، ژئومورفولوژی و پتانسیل حمل رسوبات بادی را در مصر بررسی کرد و دریافت که رسوبات قابل توجهی از ماسه‌های بادی، در محیط‌های بادی کم انرژی با تسلط تپه‌های عرضی و خطی شکل می‌گیرد. مناطقی از محیط‌های بادی پرانرژی نیز در جنوب کشور شناسایی شد که شواهد آن، وقوع تپه‌های جابه‌جا شونده‌است. با تجزیه و تحلیل پتانسیل رانش ماسه و جهت آنها، مکان‌های شکل‌گیری ماسه در مصر مشخص شد. Louassa و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی پتانسیل حمل ماسه در دشت‌های هوتس^۱ در غرب الجزیره را

^۱ Hautes

بررسی کردند و دریافتند پتانسیل حمل ماسه (DP)^۱ در ایستگاه‌های الخیتر^۲ و مچریا^۳، زیاد و در ایستگاه‌های البیاد^۴ و نائما^۵، متوسط و در ایستگاه عین صفرا^۶، کم بوده است. جهت خالص حرکت ماسه‌ی سالانه (RDD)^۷ نیز به سمت جنوب‌غربی و شمال‌شرقی است. همچنین بررسی شاخص همگنی جهت حمل ماسه (RDP/DP)، حاکی از تغییرپذیری بالا در ایستگاه‌های نائما و الخیتر و تغییرپذیری متوسط در سایر ایستگاه‌ها است. Yang و همکاران (۲۰۱۹)، ویژگی‌های تپه‌های ماسه‌ای، رژیم بادی و انتقال ماسه را در کویر هوبک^۸ در چین مطالعه کردند. بررسی‌ها نشان داد که ۵۱/۸٪ از تپه‌های ماسه‌ای، دارای جابه‌جایی و تنها ۸/۳٪ از آنها تثبیت شده است. جهت باد غالب منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی جنوب و جنوب‌غربی نیز با میانگین سرعت ۴ تا ۸ متر بر ثانیه بود. رابطه‌ی بین پتانسیل رانش با میانگین و حداکثر سرعت باد، همبستگی زیادی نشان داد و هیچ رابطه‌ی معناداری با درجه حرارت نداشت. Saremi Naeeni (۲۰۱۷)، به منظور برآورد فراوانی سرعت و جهت بادهای فرساینده‌ی مولد طوفان‌های گردوغبار در سطح استان یزد، به بررسی گلباد، گل طوفان و گل ماسه‌ی ایستگاه‌های سینوپتیک استان پرداخت و دریافت که عمده بادهای فرساینده در فصل‌های بهار و تابستان رخ می‌دهد و کمترین مقدار آن در پاییز. میانگین درصد بادهای فرساینده یا بادهایی که می‌تواند به تولید گردوغبار و ریزگرد پردازد، بین ۶/۴ درصد در شهرستان یزد و ۲۳/۶ درصد در شهرستان هرات متغیر است. فراوانی بادهای فرساینده و طوفان‌زا حدود ۱۴ درصد است که به حرکت و جابه‌جایی حجم عظیمی از گردوخاک از سمت جنوب‌غرب و غرب منجر می‌شود. Nazari samani و همکاران (۲۰۱۸)، با هدف بررسی وضعیت فرساینده‌ی باد و میزان حمل ماسه در حاشیه‌ی دریاچه‌ی ارومیه، از داده‌های بادسنجی ۸ ایستگاه سینوپتیک منطقه استفاده کردند و دریافتند که عمده بادهای غالب، از سمت شرق و غرب می‌وزد. بادهای فرساینده نیز دارای جهت جنوب و جنوب‌غربی است. محاسبه‌ی توان حمل ماسه با استفاده از رابطه‌ی فرای‌برگر و دین نشان داد که قدرت فرسایش باد در کلاس کم تا متوسط قرار دارد و بر اساس رابطه‌ی لتو - لتو، دبی حمل ماسه بین ۰/۰۵ تا ۲/۷۳ تن بر متر در سال محاسبه شد. همچنین شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ای، بیانگر غیرفعال بودن شکل‌های تراکمی ماسه است. Zamani و همکاران (۲۰۱۹)، به تحلیل فرساینده‌ی باد در سطح استان کرمان با استفاده از گل‌باد، گل طوفان و گل ماسه پرداختند و دریافتند که به طور کلی در نیمه‌ی غربی استان، بادهای غالب بیشتر جهت غرب و جنوب‌غربی دارند و در نیمه‌ی شرقی استان، بادهای بیشتر از جهت شمال وزیده 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 دارد.

هدف اصلی این تحقیق، تحلیل جهت و فراوانی بادهای فرساینده و بررسی ارتباط آن با ژئومورفولوژی اشکال بادی موجود و برآورد پتانسیل و جهت نهایی جریان حمل ماسه در سطح بیابان لوت با استفاده از داده‌های سری زمانی سمت و سرعت باد ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در اطراف این بیابان است.

¹ Drift Potential

² El-Kheither

³ Mecheria

⁴ El-Bayadh

⁵ Naama

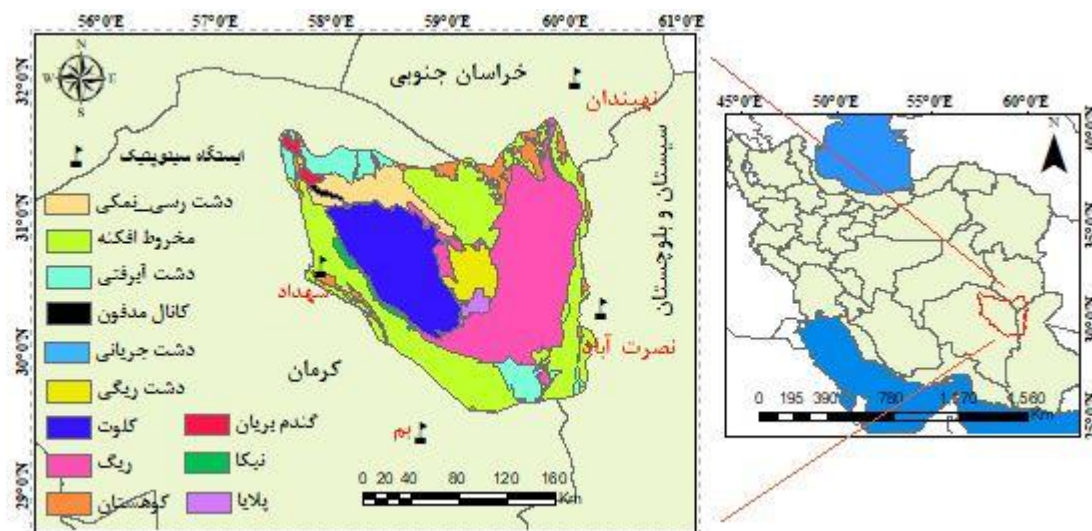
⁶ Ain-Sefra

⁷ Resultant Drift Direction

⁸ Hobq

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

بیابان لوت در جنوب شرقی ایران، در شرق کوه‌های مرکزی و رشته‌کوه‌های زاگرس، در میان سه استان خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان و کرمان گسترده شده‌است. بیابان لوت چاله‌ای است که از نظر ارتفاعی نامتقارن بوده و جهت آن شمالی - جنوبی است. در داخل آن به طور پراکنده، چاله‌های مستقل کوچک‌تری وجود دارد که حوضه‌ی انتهایی آب‌های روان است. در این تحقیق، بخشی از بیابان لوت - که به عنوان میراث جهانی این بیابان ثبت شده‌است - انتخاب شد که به طور کلی، اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن شامل یاردانگ در بخش غربی، ریگ یلان در بخش شرقی، هامادای در بخش میانی و نکاها در حاشیه‌ی بخش غربی است (Maghsoudi and Emad Aldin, 2003). اجزای دیگر این بیابان شامل رودخانه‌ی شور، منطقه‌ی گندم بریان و شورگزه‌ها همون است. مختصات جغرافیایی آن از ۲۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی و از ۵۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی است. مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه، حدود ۴۱ هزار کیلومتر مربع و حداقل و حداکثر ارتفاع آن به ترتیب ۱۱۴ تا ۱۳۷۷ متر است. دمای بالای سالانه و حجم کم بارش، خشکی زیاد بیابان لوت را نشان می‌دهد؛ به طوری که میانگین دمای سالانه - ی ایستگاه‌های نهبندان، شهداد، بم، زیارتگاه و نصرت آباد به ترتیب ۱۹/۷، ۲۷/۵، ۲۲/۹، ۲۵/۴ و ۲۱/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و میزان بارش سالانه نیز به ترتیب در هر ایستگاه ۱۳۵/۴، ۳۸/۴۸، ۶۱/۳، ۲۸ و ۶۷/۲ میلی‌متر است. شکل ۱، موقعیت مکانی بیابان لوت را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

۳- مواد و روش

در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت باد و بررسی بادهای فرساینده در سطح بیابان لوت، از داده‌های هواشناسی موجود در ۴ ایستگاه سینوپتیک اطراف این دشت استفاده شد. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های موجود و دوره آماری آنها را نشان می‌دهد. برای اجرای محاسبات آماری باد و رسم گل‌باد، از نرم‌افزار WRPLOT view 7 استفاده شد. گل‌باد، ساده‌ترین روشی است که مطابق داده‌های آماری بادسنجی، فراوانی سمت و سرعت بادهای را در هر جهت نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت

ردیف	ایستگاه	دوره آماری	ارتفاع (متر)
۱	شهداد	۲۰۱۹ - ۲۰۰۳	۴۸۲
۲	بم	۲۰۱۹ - ۲۰۰۰	۱۰۶۷
۳	نهبندان	۲۰۱۹ - ۲۰۰۰	۱۱۸۸
۴	نصرت‌آباد	۲۰۱۹ - ۲۰۱۲	۱۱۲۷

همچنین به منظور ترسیم گل‌ماسه‌ی ایستگاه‌های موجود در اطراف بیابان لوت، به دلیل حجم بالای محاسبات از نرم-افزار Sand Rose Graph 3 استفاده شد. این نرم‌افزار به خوبی می‌تواند توان و جهت حمل ماسه را توسط باد نشان دهد (Nazari et al, 2013 & Parsamehr and Poorkhosravani, 2017). گل‌ماسه، نمودار برداری مقدار انرژی باد برای حمل ماسه است و توان فرسایشی باد و مقدار نسبی حمل ماسه را در جهات مختلف نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی مقادیر پتانسیل حمل ماسه (DP) در جهات مختلف جغرافیایی، از رابطه‌ی فرای‌برگر و دین (Fryberger et al, 1979) - که مبتنی بر معادلات پایه بگنولد و لتو - لتو است - استفاده شد. با توجه به اینکه برای محاسبه‌ی مقادیر DP در نرم-افزار Sand Rose Graph 3، به جای متوسط‌گیری از کلاس‌های سرعت باد - که در روش فرای‌برگر و دین پیشنهاد شده است - به صورت مستقیم از سرعت‌های باد ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شد. بنابراین به منظور محاسبه‌ی مقادیر DP، معادله‌ی ارائه شده توسط فرای‌برگر و دین به صورت زیر اصلاح شد:

$$DP = \frac{\sum V_{ij}^2 (V_{ij} - V_t)}{N} * T \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

V_{ij} : سرعت بادهای بیش از سرعت آستانه فرسایش در ساعات دیدبانی مختلف و در جهت جغرافیایی j ؛
 V_t : سرعت آستانه فرسایش بادی در رخساره‌ی مورد نظر؛
 N : تعداد کل ساعات دیدبانی در طول دوره آماری مورد نظر؛
 T : فاکتور تعدیل زمانی که خود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$T = \frac{n}{N} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

n : تعداد ساعات دیدبانی در مدت زمان مورد نظر (سالانه، فصلی و ماهانه)؛

N : تعداد کل ساعات دیدبانی در طول دوره آماری مورد نظر.

از مجموع مقادیر DP در جهات مختلف، مجموع توان حمل ماسه (DPt) به دست می‌آید و در واقع، شاخصی است که کل انرژی باد را جهت حمل ماسه در ایستگاه مورد نظر نشان می‌دهد. Fryberger و همکاران (Fryberger et al, 1979)، قدرت فرسایشی باد را بر اساس شاخص توان حمل باد طبق جدول ۲ طبقه‌بندی کردند.

جدول ۲: تقسیم‌بندی قدرت فرسایش باد در محیط‌های بیابانی (Fryberger et al, 1979)

ردیف	مجموع توان حمل ماسه (DPt)	قدرت فرسایشی باد
۱	<۲۰۰	کم
۲	۲۰۰ - ۴۰۰	متوسط
۳	>۴۰۰	زیاد

RDP^1 : بیانگر مقدار یا اندازه‌ی بردار برآیند (بردار منتهجه) توان حمل ماسه است که از جمع برداری مقادیر DP در جهات مختلف ۸ یا ۱۶ گانه حاصل می‌شود و وضعیت نهایی حمل ماسه را در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

$$RDP = \sqrt{C^2 + D^2} \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

$$C = \sum (DP_i) \sin \theta_i \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

$$D = \sum (DP_i) \cos \theta_i \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

θ : زاویه‌ی جهت حمل ماسه (جهت باد)؛

DP: توان حمل ماسه؛

RDD: جهت خالص حرکت ماسه (جهت بردار منتهجه) را در طول سال، ماه یا فصل مورد نظر نشان می‌دهد و با

استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$RDD = \text{Arc tan} (C / D) \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI^2) - که عبارت از نسبت مقدار نهایی حمل ماسه (اندازه بردار منتهجه) به کل توان حمل ماسه است - مطابق رابطه‌ی زیر به دست آمد. فرای‌برگر و دین (Fryberger et al, 1979)، تغییرپذیری جهت باد را بر اساس شاخص همگنی طبق جدول ۳ طبقه‌بندی کردند. هر چه عدد به دست آمده به یک نزدیک‌تر باشد، بادهای یک جهته در منطقه زیادتر است و برعکس هر چه مقدار این نسبت به سمت صفر متمایل باشد، بادهای قدرتمند چندجهتی بر منطقه حاکم است.

$$UDI = RDP / DPt \quad \text{رابطه‌ی ۷}$$

¹ Resultant Drift Potential

² UniDirectional Index

جدول ۳: تقسیم‌بندی شاخص تغییرپذیری جهات باد (Fryberger et al, 1979)

رده‌بند	شاخص همگنی جهت باد (UDI)	قدرت فرسایشی باد	طبقه‌بندی جهات باد
۱	$> 0/8$	کم	بادهای یک جهته
۲	$0/3 - 0/8$	متوسط	بادهای دو جهته با زاویه‌ی منفرجه
۳	$< 0/3$	زیاد	بادهای چند جهته مرکب با زاویه‌ی تند

به منظور تعیین مقدار ماسه‌ی منتقل شده در واحد زمان، از یک واحد عرض از معادلات ارائه شده توسط بگنولد، زینگ، ۱۹۵۳، کاوامورا، ۱۹۶۴، هسو، ۱۹۷۳ و لتو - لتو، ۱۹۷۸ استفاده شده که عمدتاً بر پایه‌ی اصول تئوری و مطالعات تجربی استوار است و تقریباً در کلیه‌ی آنها، دبی جریان یا مقدار مواد منتقل شده به وسیله‌ی باد، با توان سوم سرعت باد متناسب است و بر اساس وزن مواد منتقله در واحد عرض در واحد زمان بیان می‌شود. در این تحقیق، قطر متوسط ذرات ۰/۲۵ میلی‌متر و چگالی هوا ۱/۲۲۵ در نظر گرفته و تمامی روابط بر همین اساس محاسبه شد. به منظور محاسبه‌ی مقدار کل ماسه‌ی حمل شده در جهات مختلف (TSF)، از رابطه‌ی زیر (رابطه‌ی ۸) استفاده می‌شود که حاصل آن قاعدتاً برای هر یک از روابط استفاده شده در بالا متفاوت است:

$$TSF = Q * T$$

رابطه‌ی ۸

Q: مقدار دبی ماسه محاسبه شده با استفاده از هر یک از روابط؛

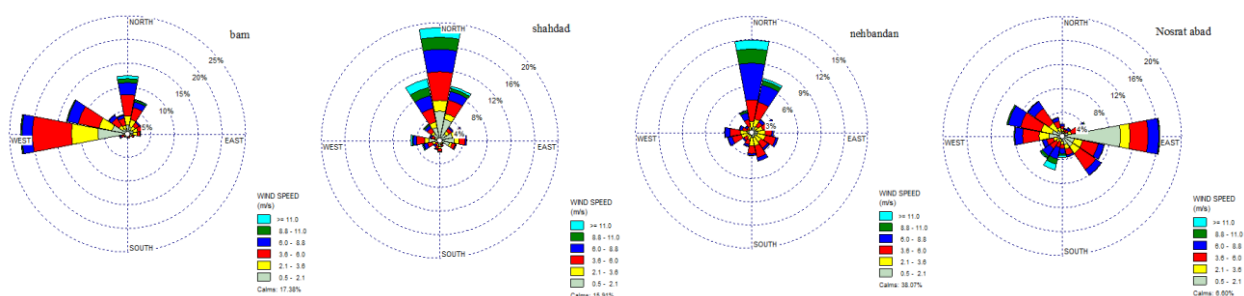
T: طول دوره‌ی زمانی (سال، فصل، ماه) که براساس تعداد ساعات دیده‌بانی در طول روز محاسبه می‌شود.

محاسبه‌ی برآیند حمل ماسه (DSF) نیز مشابه رابطه‌ی TSF است؛ با این تفاوت که در آن ابتدا مقدار Vq برای تمام جهات جغرافیایی هشت‌گانه محاسبه، سپس از برآیند برداری آنها برای محاسبه‌ی DSF استفاده می‌شود.

۴- یافته‌ها (نتایج)

در شکل ۲، گلبادهای ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در اطراف بیابان لوت به صورت سالانه نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که جهت این گل‌بادها نشان می‌دهد، غالب بادها در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان واقع در نیمه‌ی شمالی بیابان لوت، از جهات شمالی می‌وزند؛ اما غالب بادها در ایستگاه‌های بم و نصرت‌آباد واقع در نیمه‌ی جنوبی این بیابان، به سمت لوت متمرکز می‌شوند. در ایستگاه شهداد، حدود ۴۰ درصد از بادها از جهات شمال، شمال غربی و شمال شرقی می‌وزند و بقیه‌ی بادها غالباً از جهات شرقی و غربی می‌وزند و از جهات جنوبی و حوالی آن، درصد بادها بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. در ایستگاه نهبندان، حدود ۲۰ درصد از بادها از جهات شمال و شمال شرقی می‌وزند و بقیه‌ی بادها تنوع زیادی در جهات دارند. در ایستگاه بم، حدود ۳۶ درصد از بادها از غرب و غرب شمال شرقی و بقیه‌ی بادها از جهات شمال و حوالی آن می‌وزند و وزش بادی از جهات نیمه جنوبی این ایستگاه مشاهده نمی‌شود. در ایستگاه نصرت‌آباد، حدود ۳۱ درصد از بادها از جهات شرق و جنوب شرقی و حدود ۲۷ درصد از جهات غرب و شمال غربی و بقیه‌ی بادها از سایر جهات با تنوع زیاد می‌وزند.

نتایج گل‌بادها (جدول ۴) نیز نشان می‌دهد که ایستگاه نهبندان با ۴۳/۷ درصد، بیشترین فراوانی بادهای آرام را در منطقه دارد و بعد از آن ایستگاه‌های شهداد، بم و نصرت‌آباد به ترتیب با ۲۵/۵، ۱۷/۷ و ۹/۵ درصد قرار دارند. بیشترین فراوانی بادهای منطقه‌ی مورد مطالعه در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان، مربوط به بادهای آرام به ترتیب با ۴۳/۷ و ۲۵/۵ درصد است و در ایستگاه بم، مربوط به طبقه‌ی ۳/۶ تا ۶ متر بر ثانیه با ۲۷/۹ درصد و در ایستگاه نصرت‌آباد، مربوط به طبقه‌ی ۰/۵ تا ۲/۱ متر بر ثانیه با ۲۷/۸ متر بر ثانیه است. در بین ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، ایستگاه شهداد با دارا بودن ۹ درصد از بادهای با سرعت بالاتر از ۸/۸ متر بر ثانیه، بالاترین درصد قوی‌ترین بادهای را دارد. درصد بادهای بالاتر از سرعت آستانه ۶ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های بم، نهبندان، نصرت‌آباد و شهداد به ترتیب ۱۴/۳، ۱۷/۱، ۲۱/۱ و ۲۰ درصد است. در کل، گل‌بادهای سالانه‌ی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که درصد فراوانی وقوع بادهای با سرعت‌های مختلف، در هر ایستگاه متفاوت است که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از شرایط جغرافیایی، مورفولوژیکی و بادناکی هر منطقه باشد. شکل ۳ نیز بالاترین سرعت باد ثبت شده در هر ماه را برای کلیه‌ی ایستگاه‌های بادسنجی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳، بالاترین سرعت باد در ایستگاه نصرت‌آباد در اواخر زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد و در کل نسبت به سایر ایستگاه‌ها، کمترین سرعت بادهای ثبت شده در سال را دارد. در ایستگاه‌های شهداد و بم، بالاترین سرعت باد ثبت شده در اواخر بهار و اوایل تابستان رخ می‌دهد و نسبت به سایر ایستگاه‌ها، بالاترین سرعت بادهای ثبت شده را در طول اغلب ماه‌های سال دارد. در ایستگاه نهبندان، بیشترین سرعت باد در دو دوره اتفاق می‌افتد؛ اول در

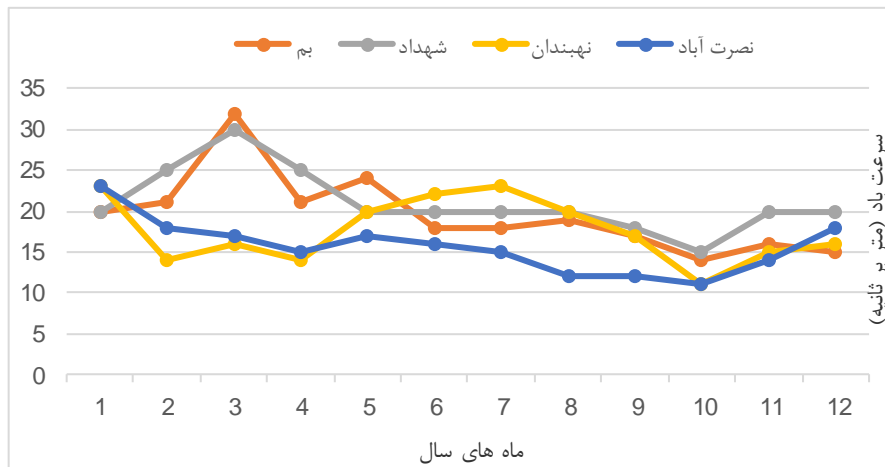


شکل ۳: گل‌بادهای ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه‌ی مورد مطالعه

ماه‌های اواخر تابستان و اوایل پاییز.

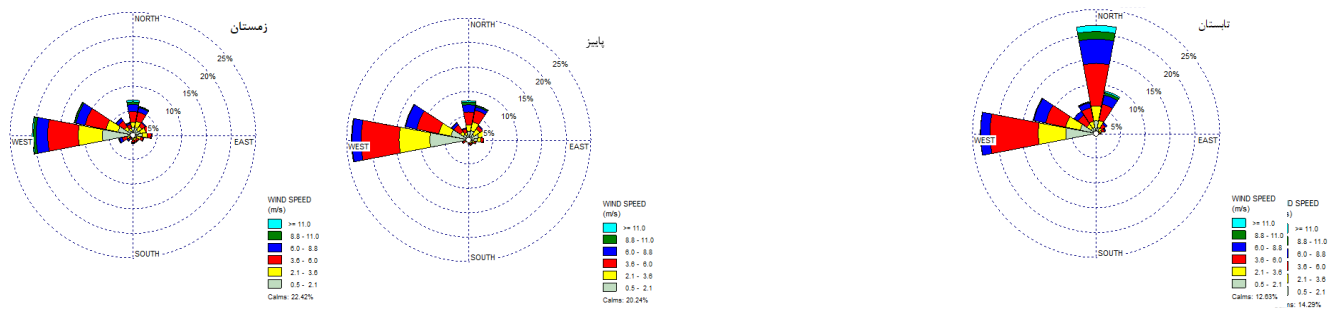
شکل ۴: درصد وقوع طبقات سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه‌ی مورد مطالعه

ایستگاه	درصد وقوع طبقات سرعت باد					
	آرام	۰/۵ - ۲/۱	۲/۱ - ۳/۶	۳/۶ - ۶	۶ - ۸/۸	۸/۸ - ۱۱
آرام	۱۷/۷	۲۲/۲	۱۸/۱	۲۷/۹	۱۱/۱	۲
بم	۱۷/۷	۲۲/۲	۱۸/۱	۲۷/۹	۱۱/۱	۲
شهداد	۲۵/۵	۲۷/۱	۹/۲	۱۸/۲	۱۰/۹	۴/۸
نهبندان	۴۳/۷	۸/۸	۱۲/۳	۱۸/۱	۱۲/۴	۳
نصرت‌آباد	۹/۵	۲۷/۸	۱۴/۸	۲۶/۹	۱۶/۸	۲/۷

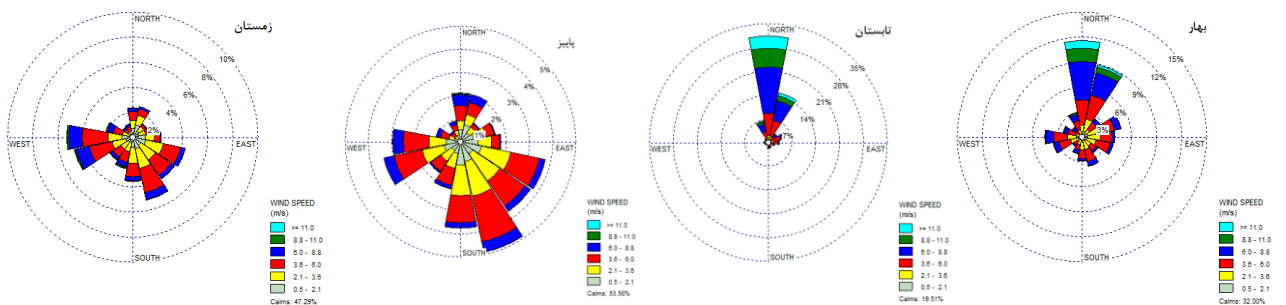


شکل ۳: نمودار بالاترین سرعت باد در هر ماه برای ایستگاه‌های بیابان لوت

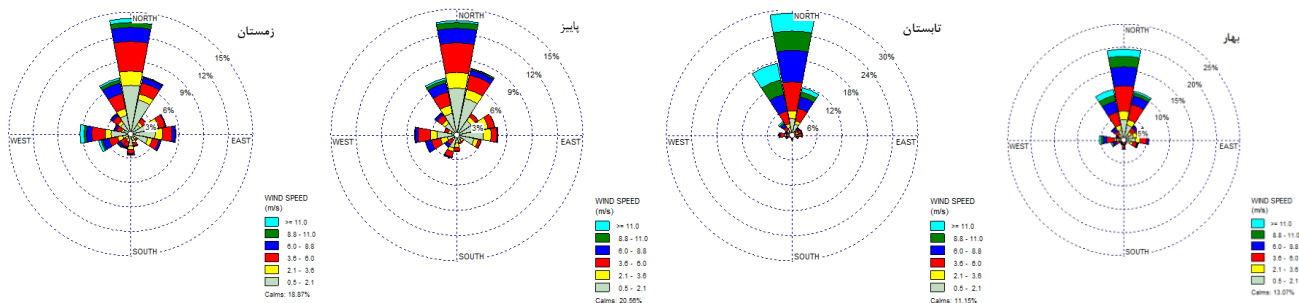
نتایج تحلیل گل‌بادهای ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه برای فصول سال نشان می‌دهد که در ایستگاه بم (شکل ۴)، بادهای غربی با درصد وقوع حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد، در کلیه‌ی فصول غالب هستند و سایر بادهای از جهات شمالی و مابین غربی - شمال شرقی می‌وزند. در فصل تابستان علاوه بر جهت غربی، بادهای با جهت شمالی با حدود ۲۳ درصد نیز غالب هستند. در ایستگاه نهبندان (شکل ۵) در فصل بهار و تابستان، غالب بادهای این ایستگاه از جهات شمالی و شمال شرقی می‌وزند. در فصل بهار، حدود نیمی از بادهای از جهات جنوبی با تنوع زیاد می‌وزند، اما در فصل تابستان، بادی از جهات جنوبی نمی‌وزد و با توجه به جهت وزش بادهای می‌توان به استیلای بادهای ۱۲۰ روزه در این فصل اشاره کرد که با توجه به موقعیت وزش بادهای ۱۲۰ روزه، در بین ایستگاه‌ها تنها ایستگاه نهبندان زیر سلطه‌ی این بادهای است. فصول پاییز و تابستان ایستگاه نهبندان، دارای بیشترین تنوع جهت وزش باد است؛ با این وجود، جهات جنوب شرقی و غربی بیشترین درصد وزش باد را دارد. در ایستگاه شهداد (شکل ۶)، جهات شمالی و حوالی آن دارای بیشترین درصد وقوع جهات باد است، در فصل بهار و تابستان نیز تقریباً بادی از جهات جنوبی نمی‌وزد و بادهای غالباً یک جهته هستند و از شمال می‌وزند. در فصل پاییز و زمستان، تنوع بادهای بیشتر می‌شود، اما همچنان بادهای جهت شمالی و حوالی آن بادهای غالب این ایستگاه هستند و درصد ناچیزی هم از جهات شمالی می‌وزند. در ایستگاه نصرت‌آباد (شکل ۷)، غالب بادهای به صورت متقابل هستند؛ به طوری که در فصل بهار و تابستان بادهای از جهات شرقی - جنوب شرقی و غربی - شمال - غربی می‌وزند. این ایستگاه با اینکه در قسمت شرقی بیابان لوت قرار دارد، اما خارج از استیلای بادهای ۱۲۰ روزه است و دلیل آن را می‌توان در جهت بادهای فصل تابستان این ایستگاه مشاهده کرد که با جهت بادهای ۱۲۰ روزه کاملاً متفاوت است. در فصل پاییز علاوه بر جهات شرقی - جنوب شرقی و غربی - شمال غربی، باد غالب از جهت شرقی می‌وزد و وزش باد در فصل زمستان مشابه فصل پاییز است؛ با این تفاوت که میزان قابل توجهی از بادهای (۱۸ درصد) از جهات جنوب شرقی و اطراف آن می‌وزد.



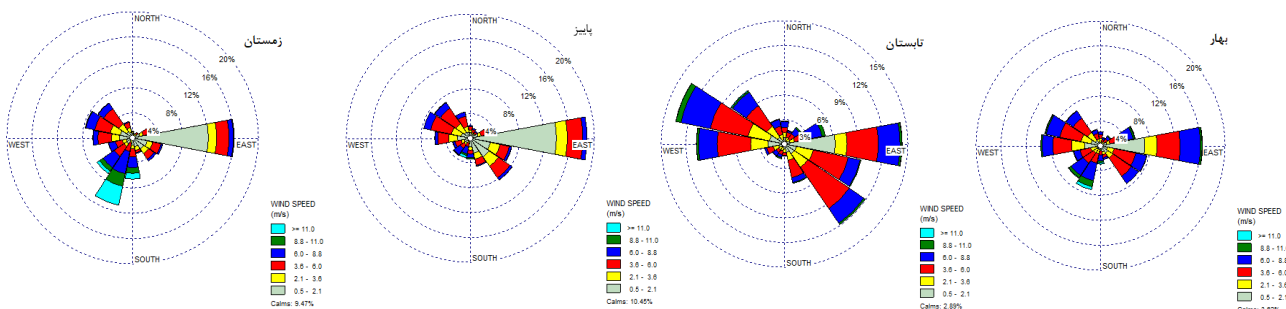
شکل ۴: گل‌بادهای فصول سال در ایستگاه بم



شکل ۵: گل‌بادهای فصول سال در ایستگاه نهبندان

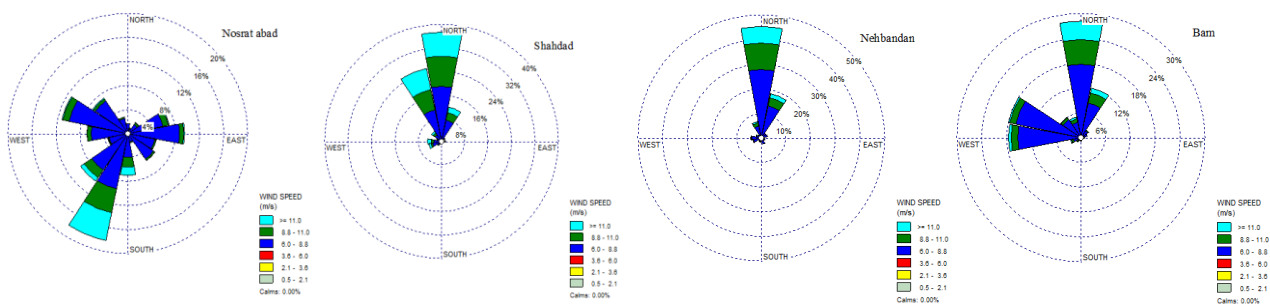


شکل ۶: گل‌بادهای فصول سال در ایستگاه شهداد



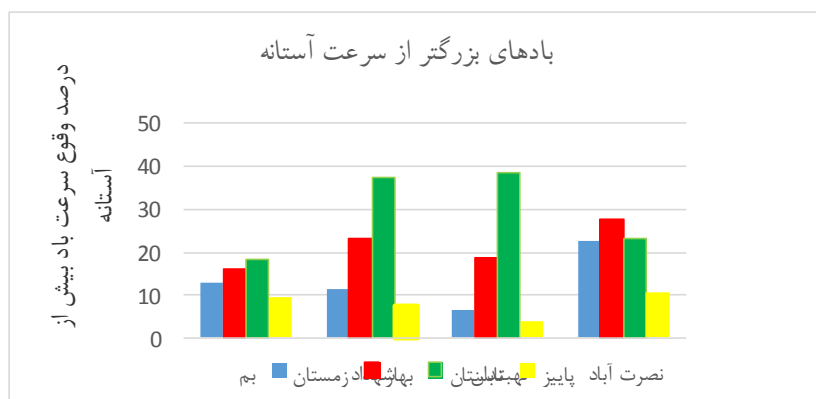
شکل ۷: گل‌بادهای فصول سال در ایستگاه نصرت آباد

به منظور بررسی طوفان‌خیزی بیابان لوت و مطالعه‌ی بادهای فرساینده‌ی آن، گل‌طوفان‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۸). اگرچه در کل، حدود یک پنجم از بادهای منطقه‌ی مورد مطالعه بالاتر از آستانه‌ی ۶ متر بر ثانیه است، همه‌ی فعالیت‌های فرسایشی ناشی از باد مانند برداشت، حمل و رسوب‌گذاری، مربوط به این نوع بادهای است و با توجه به حاکمیت شرایط اقلیمی خشک، همواری سطح زمین، رطوبت اندک خاک و وجود ذرات ریزدانه در سطح، می‌توان گفت فرسایش بادی در این منطقه شدید است. نتایج گل‌طوفان‌های سالانه بیانگر آن است که بادهای با جهات شمالی، شمالی، شمال غرب و شمال - شمال شرق در ایستگاه‌های نهبندان و شهداد بادهای غالب هستند. در ایستگاه بم، این بادهای علاوه بر جهات شمالی از جهات غربی و غرب - شمال غربی نیز می‌وزد. در ایستگاه نصرت‌آباد تنوع جهات باد زیاد است، اما برخلاف سایر ایستگاه‌ها بادی از جهات شمالی نمی‌وزد.



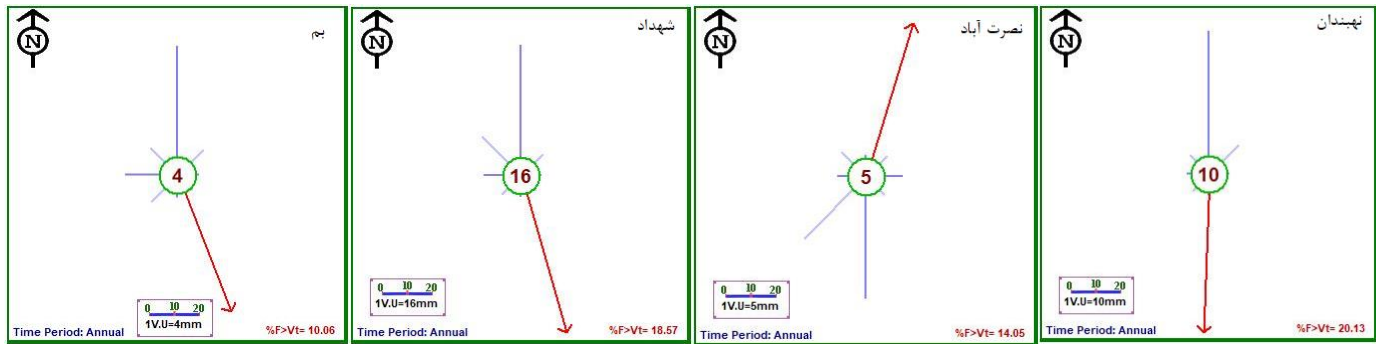
شکل ۸: گل‌طوفان‌های ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف بیابان لوت

مطابق شکل ۹، حدود ۴۰ درصد از بادهای فصل تابستان ایستگاه‌های شهداد و نهبندان، بالاتر از سرعت آستانه رخ می‌دهد که نسبت به سایر فصل‌ها اختلاف زیادی دارد. فصل‌های بعدی با بالاترین درصد وقوع در این دو ایستگاه، به ترتیب بهار، زمستان و پاییز است. این درصد وقوع در ایستگاه بم نیز به همین ترتیب است؛ با این تفاوت که درصد کلیه‌ی فصول تقریباً نزدیک به هم است و فصل بهار با حدود ۱۸ درصد، بالاترین و فصل پاییز با ۱۰ درصد، کمترین درصد وقوع بادهای بالاتر از سرعت آستانه فرسایشی را دارد. در ایستگاه نصرت‌آباد، بالاترین درصد وقوع مربوط به فصل بهار با حدود ۲۷ درصد است و بعد از آن فصول تابستان، زمستان و پاییز به ترتیب با ۲۳، ۲۲ و ۱۱ درصد، بالاترین درصد وقوع بادهای بالاتر از سرعت آستانه فرسایشی را دارد.

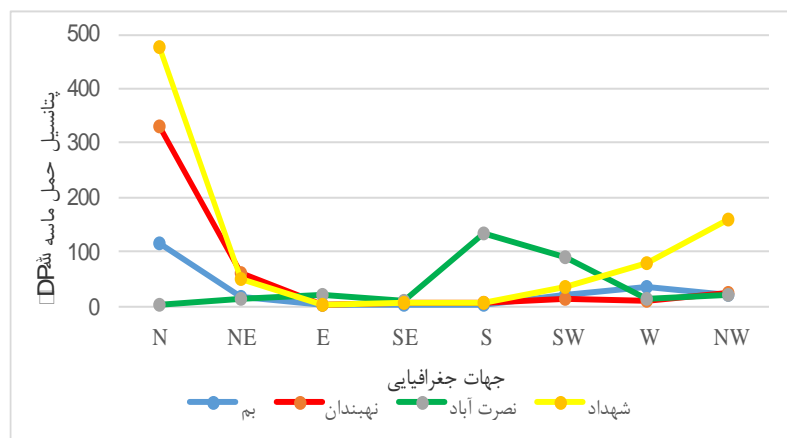


شکل ۹: نمودار درصد وقوع بادهای بالاتر از سرعت آستانه فرسایشی در هر فصل

در شکل ۱۰، گل ماسه‌های سالانه‌ی مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت مشاهده می‌شود و اطلاعات مربوط به تحلیل گل ماسه‌ها نیز در جدول ۵ ذکر شده‌است. تحلیل جهت خالص حرکت ماسه‌ی (RDD) ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که جهت حرکت ماسه‌ها در ایستگاه‌های بم و شهداد به سمت جنوب - جنوب شرقی، در ایستگاه نهبندان به سمت جنوب و در ایستگاه نصرت‌آباد به سمت شمال - شمال شرقی است. تحلیل جهت حرکت گل ماسه‌ها، انطباق کامل حرکت گل ماسه‌ها را با گل طوفان‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیانگر نظام‌مند بودن روند تغییرات جهت باد و قابل قبول بودن نتایج حاصل از گ طوفان است. با استفاده از گل باد به تنهایی نمی‌توان به مؤثرترین بادهای دخیل در فرسایش بادی در جهت غالب باد دست یافت؛ چون در ترسیم گل طوفان و گل ماسه، از سرعت‌های باد کمتر از سرعت آستانه صرف نظر می‌شود. بنابراین، ممکن است تحلیل جهت بادهای فرساینده بر اساس گل باد، با تحلیل گل طوفان و گل ماسه یکسان نباشد. نتایج پتانسیل حمل ماسه (DP)، در شکل ۱۱ ذکر شده‌است. مطابق این نمودار در ایستگاه‌های بم و شهداد، بالاترین پتانسیل حمل ماسه مربوط به جهات شمال و شمال شرقی و در ایستگاه شهداد، جهات مابین غرب تا شمال شرقی است؛ در حالی که در ایستگاه نصرت‌آباد، جهت آن کاملاً نسبت به سایر ایستگاه‌ها متفاوت و بالاترین مقدار آن، مربوط به جهات جنوب و جنوب غربی است. مجموع توان حمل ماسه (DPT) در ایستگاه‌های بم، شهداد، نهبندان و نصرت‌آباد به ترتیب ۲۱۷/۸، ۸۱۲/۳، ۴۴۹/۶ و ۳۰۵/۳ است که بیانگر قدرت فرسایشی متوسط در ایستگاه‌های بم و نصرت‌آباد و قدرت فرسایشی زیاد در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان است. بالاترین مقدار بردار برآیند توان حمل ماسه (RDP)، مربوط به ایستگاه شهداد است و بعد از آن به ترتیب ایستگاه‌های نهبندان، نصرت‌آباد و بم قرار دارند. بررسی شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI) نیز مطابق روش فرای‌برگر و دین، بیانگر بادهای یک جهته در ایستگاه نهبندان و بادهای دوجته با زاویه‌ی منفرد در ایستگاه‌های بم، شهداد و نصرت‌آباد است.



شکل ۱۰: گل‌مسه‌های ایستگاه‌های بیابان لوت

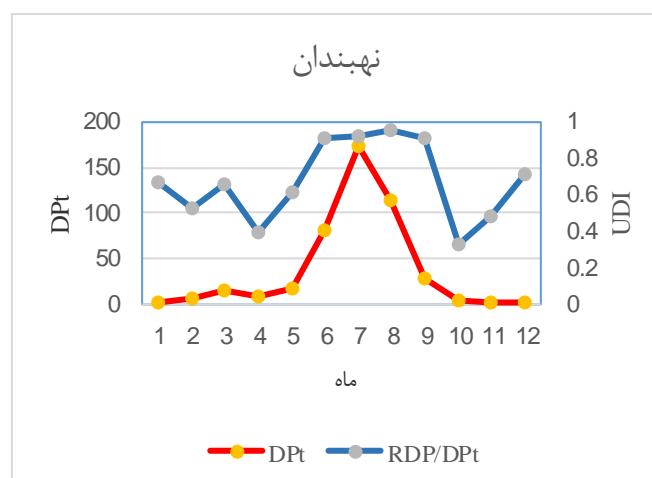
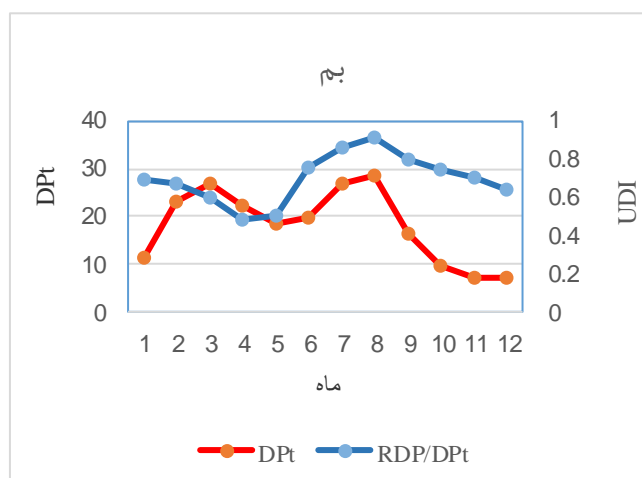
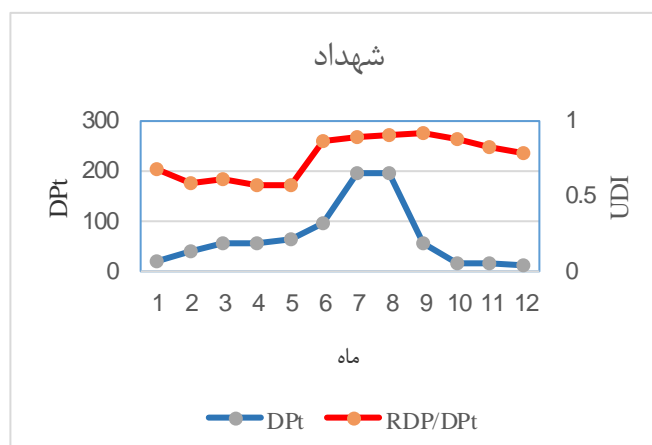
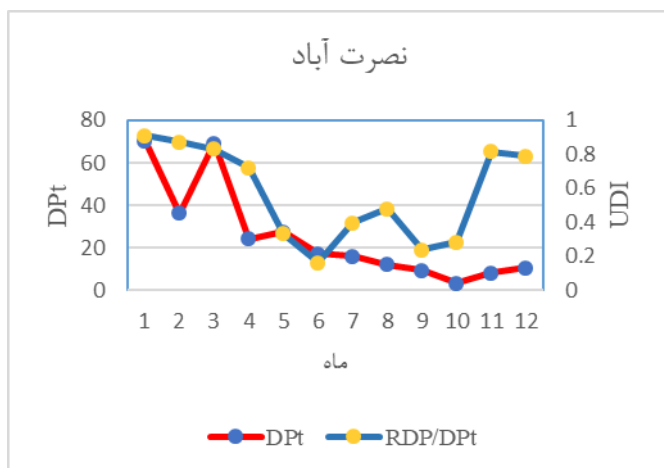


شکل ۱۱: پتانسیل حمل ماسه (DP) جهات هشت‌گانه

جدول ۵: نتایج گل‌مسه‌های ایستگاه‌های بیابان لوت

ایستگاه	DPt	RDP	RDD	UDI
بم	۲۱۷/۸	۱۳۵/۱۹۲	۱۵۹	۰/۶۲۱
شهداد	۸۱۲/۳	۶۱۴/۹۶۴	۱۶۴	۰/۷۵۷
نهبندان	۴۴۹/۶	۳۷۳/۲۲۶	۱۸۲	۰/۸۳
نصرت‌آباد	۳۰۵/۳	۱۸۵/۳۴۸	۱۷	۰/۶۰۷

نتایج حاصل از تحلیل گل‌مسه، در قالب مجموع پتانسیل حمل ماسه (Dpt) و شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI)، در نمودارهای شکل ۱۲ مقایسه شده‌اند. بین دو نمودار موجود در ایستگاه شهداد، بم و نهبندان، همگنی بالایی وجود دارد؛ به طوری که هر زمان شاخص UDI نزدیک به یک باشد و باد نیز یک جهته باشد، شاخص توان حمل ماسه نیز اعداد بالاتری را نشان می‌دهد؛ اما در ایستگاه نصرت‌آباد، ناهمگنی بین دو نمودار بیشتر است. در ایستگاه‌های شهداد، بم و نهبندان، بیشترین مقدار بادهای یک جهته در فصل پاییز رخ می‌دهد که در همین زمان بالاترین پتانسیل حمل ماسه نیز وجود دارد؛ در ایستگاه نصرت‌آباد نیز بیشترین بادهای یک جهته در اواخر زمستان و فصل بهار رخ می‌دهد و بالاترین پتانسیل حمل ماسه نیز در فصل بهار.



شکل ۱۲: مقایسه‌ی نتایج مجموع پتانسیل حمل ماسه (DPt) و شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI)

نتایج حاصل از دبی حمل ماسه (QS) در جدول ۶، نشان می‌دهد که در ایستگاه بم، بیشترین مقدار دبی حمل ماسه مطابق رابطه‌ی لتو - لتو حدود ۱۶۵ کیلوگرم بر متر در ثانیه و کمترین مقدار آن مربوط به رابطه‌ی زینگ با حدود ۴۸ کیلوگرم بر متر در ثانیه است. بیشترین و کمترین مقدار دبی حمل ماسه در ایستگاه شهداد نیز به ترتیب ۷۹ و ۳۲۰ کیلوگرم بر متر در ثانیه مطابق روابط کاوامورا و بگنولد است. بیشترین و کمترین دبی حمل ماسه در ایستگاه نهبندان به ترتیب ۲۳۳ (رابطه‌ی کاوامورا) و ۵۷ (رابطه‌ی بگنولد) کیلوگرم بر متر در ثانیه است و بیشترین و کمترین دبی حمل ماسه در ایستگاه نصرت آباد به ترتیب ۲۰۲ (رابطه‌ی کاوامورا) و ۵۰ (رابطه‌ی بگنولد) کیلوگرم بر متر در ثانیه است.

جدول ۶: مقدار دبی ماسه حمل شده (QS) برای هر رابطه

دبی حمل ماسه QS (Kg/m.s)					
ایستگاه	بگنولد (۱۹۴۱)	زینگ (۱۹۵۳)	کاوامورا (۱۹۶۴)	هسو (۱۹۷۳)	لتو و لتو (۱۹۷۸)
بم	۶۱/۳۲	۴۷/۷۲	۱۸۷/۲۱	۸۲/۱۲	۱۶۴/۹۶
شهداد	۷۸/۸۸	۸۱/۸۴	۳۲۰	۱۴۰/۸۴	۳۰۳/۱۴
نهبندان	۵۷/۲۶	۵۹/۴	۲۳۳/۳۱	۱۰۲/۲۳	۲۰۵/۶۹
نصرت‌آباد	۴۹/۷۸	۵۱/۶۴	۲۰۲/۲۴	۸۸/۸۷	۱۷۹/۱۲

در جدول ۷، مقدار ماسه‌ی حمل شده (TSF) و برآیند حمل ماسه (DSF) مطابق روابط بگنولد، زینگ، کاوامورا، هسو و لتو - لتو محاسبه شد. بیشترین و کمترین مقدار کل ماسه‌ی حمل شده (TSF) به ترتیب در ایستگاه بم ۵۴۶ و ۱۳۹ تن بر متر در سال، در ایستگاه شهداد ۹۳۴ و ۲۳۰ تن بر متر در سال، در ایستگاه نهبندان ۶۸۱ و ۱۶۷ تن بر متر در سال و در ایستگاه نصرت‌آباد ۵۹۰ و ۱۴۵ تن بر متر در سال است. بیشترین و کمترین مقدار برآیند حمل ماسه (DSF) در ایستگاه بم ۳۷ و ۱۱ تن بر متر در سال، در ایستگاه شهداد ۸۷ و ۲۳ تن بر متر در سال، در ایستگاه نهبندان ۶۰ و ۱۸ تن بر متر در سال و در ایستگاه نصرت‌آباد ۳۵ و ۹ تن بر متر در سال است.

جدول ۷: مقدار ماسه حمل شده (TSF) و برآیند حمل ماسه (DSF) مطابق روابط استفاده شده

ایستگاه	بم		شهداد		نهبندان		نصرت‌آباد	
	TSF (ton/m.year)	DSF (ton/m.year)	TSF	DSF	TSF	DSF	TSF	DSF
بگنولد	۱۷۹	۱۵	۲۳۰	۲۳	۱۶۷	۱۸	۱۴۵	۹
زینگ	۱۳۹	۱۱	۲۳۸	۲۴	۱۷۳	۱۸	۱۵۰	۱۰
کاوامورا	۵۴۶	۳۷	۹۳۴	۸۷	۶۸۱	۶۰	۵۹۰	۳۵
هسو	۲۳۹	۲۰	۴۱۱	۴۲	۲۹۸	۳۲	۲۵۹	۱۷
لتو و لتو	۴۸۱	۲۲	۸۸۵	۵۹	۶۰۰	۳۸	۵۲۳	۲۴

۵ - بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، سرعت و جهت بادهای فرساینده و توان و جهت حمل ذرات رسوب ناشی از فرسایش بادی در ایستگاه‌های منتخب واقع در اطراف بیابان لوت مطالعه شد. نتایج بر این دلالت داشت که غالب بادهای در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان واقع در نیمه‌ی شمالی بیابان لوت، از جهات شمالی می‌وزند؛ اما در ایستگاه‌های بم و نصرت‌آباد واقع در نیمه‌ی جنوبی این بیابان، به سمت لوت متمرکز می‌شوند. در کل، حدود یک پنجم از بادهای منطقه‌ی مورد مطالعه بالاتر از آستانه‌ی ۶ متر بر ثانیه است. نتایج گل‌طوفان‌های سالانه نیز بیانگر آن است که بادهای با جهات شمالی، شمال - شمال غرب و شمال - شمال شرق، در ایستگاه‌های نهبندان و شهداد بادهای غالب هستند. در ایستگاه بم این بادهای علاوه بر جهات شمالی از جهات غربی و غرب - شمال غربی نیز می‌وزند. در ایستگاه نصرت‌آباد نیز تنوع جهات باد

زیاد است، اما برخلاف سایر ایستگاه‌ها، بادی از جهات شمالی نمی‌وزد. بالاترین درصد وقوع بادهای بالاتر از سرعت آستانه در ایستگاه‌های شهداد، نهبندان و بم، در فصل تابستان رخ می‌دهد و در ایستگاه نصرت‌آباد، بالاترین درصد وقوع مربوط به فصل بهار است. تحلیل جهت خالص حرکت ماسه (RDD) نشان می‌دهد که جهت حرکت ماسه‌ها در ایستگاه‌های بم و شهداد به سمت جنوب - جنوب شرقی، در ایستگاه نهبندان به سمت جنوب و در ایستگاه نصرت‌آباد به سمت شمال - شمال شرقی است. تحلیل جهت حرکت گل ماسه‌ها، انطباق کامل حرکت گل ماسه‌ها را با گل طوفان‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیانگر نظام‌مند بودن روند تغییرات جهت باد و قابل قبول بودن نتایج حاصل از گل طوفان است. تطبیق نتایج گل طوفان و گل ماسه‌ها نشان می‌دهد که جهت بادهای ایستگاه‌های شهداد و بم، با جهت شمال غربی - جنوب شرقی کلوتک‌های واقع در غرب بیابان لوت انطباق کامل دارد و در شرق لوت جایی که ریگ وسیع یلان قرار دارد، بادهای دو ایستگاه نهبندان و نصرت‌آباد کاملاً مخالف هم هستند که شرایط لازم را برای تشکیل هرم‌های ماسه‌ای در مرکز این ریگ فراهم می‌کند. در ایستگاه‌های بم و شهداد، بالاترین پتانسیل حمل ماسه (DP) مربوط به جهات شمال و شمال شرقی و در ایستگاه شهداد، جهات مابین غرب تا شمال شرقی است؛ در حالی که در ایستگاه نصرت‌آباد، جهت آن کاملاً نسبت به سایر ایستگاه‌ها متفاوت و بالاترین مقدار آن مربوط به جهات جنوب و جنوب غربی است. مجموع توان حمل ماسه (DPT) در ایستگاه‌های بم، شهداد، نهبندان و نصرت‌آباد به ترتیب ۲۱۷/۸، ۸۱۲/۳، ۴۴۹/۶ و ۳۰۵/۳ است که بیانگر قدرت فرسایشی متوسط در ایستگاه‌های بم و نصرت‌آباد و قدرت فرسایشی زیاد در ایستگاه‌های شهداد و نهبندان است. بالاترین مقدار بردار برآیند توان حمل ماسه (RDP)، مربوط به ایستگاه شهداد است و بعد از آن به ترتیب ایستگاه‌های نهبندان، نصرت‌آباد و بم قرار دارند. بررسی شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI) مطابق روش فرای‌برگر و دین نیز بیانگر بادهای یک جهته در ایستگاه نهبندان و بادهای دوجته با زاویه‌ی منفرد در ایستگاه‌های بم، شهداد و نصرت‌آباد است. بین دو نمودار مجموع پتانسیل حمل ماسه (DPT) و شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI) در ایستگاه‌های شهداد، بم و نهبندان، همگنی بالایی وجود دارد؛ به طوری که هر زمان شاخص UDI به یک نزدیک شود و باد یک جهته باشد، شاخص توان حمل ماسه نیز اعداد بالاتری را نشان می‌دهد؛ اما در ایستگاه نصرت‌آباد، ناهمگنی بین دو نمودار بیشتر است. بیشترین مقدار دبی حمل ماسه مربوط به ایستگاه شهداد با ۳۲۰ کیلوگرم بر متر در ثانیه مطابق رابطه‌ی کاوامورا و کمترین میزان آن، مربوط به ایستگاه نصرت‌آباد با ۵۰ کیلوگرم بر متر در ثانیه مطابق رابطه‌ی بگنولد است. بیشترین مقدار کل ماسه حمل شده (TSF) در ایستگاه‌های بم، شهداد، نهبندان و نصرت‌آباد به ترتیب ۵۴۶، ۹۳۴، ۶۸۱ و ۵۹۰ تن بر متر در سال است. همچنین بیشترین مقدار برآیند حمل ماسه (DSF) در ایستگاه‌های بم، شهداد، نهبندان و نصرت‌آباد به ترتیب ۳۷، ۸۷، ۶۰ و ۳۵ تن بر متر در سال است.

منابع

1. Al-Awadhi, J. M., & A. M. Al-Dousari., (2013). Morphological characteristics and development of coastal nabkhas, north-east Kuwait. *International Journal of Earth Sciences*. 102(3), 949-958.
2. Fryberger, S. G.; Dean, G.; & E. McKee, 1979. Dune forms and wind regime, *A Study of Global Sand Seas, US Geological Survey Professional Paper*, 1052, 137-170.
3. Hereher, M. E., 2018. Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt, *Geomorphology*, 304, 113-120.

4. Lancaster, N., 1995. *Geomorphology of desert dunes*: Psychology Press.
5. Lettau, K., 1978. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration, *Exploring in the World's driest climate*, 110-147.
6. Livingstone, I.; Bristow, C.; Bryant, R. G.; Bullard, J.; White, K.; Wiggs, G. F.; & D. S. Thomas, 2010. The Namib Sand Sea digital database of aeolian dunes and key forcing variables, *Aeolian Research*, 2(2-3), 93-104.
7. Louassa, S.; Merzouk, M.; & N. K. Merzouk, 2018. Sand drift potential in western Algerian Hautes Plaines, *Aeolian Research*, 34, 27-34.
8. Nazari Samani, A. A.; Dadfar, S.; & A. Shahbazi, 2013. A Study on Dust Storms Using Wind Rose, Storm Rose and Sand Rose (Case Study: Tehran Province), *Desert*, 18(1), 9-18. doi:10.22059/jdesert.2013.36271(in persian)
9. Okin, G.; Gillette, D.; & J. Herrick, 2006. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments, *Journal of arid environments*, 65(2), 253-275.
10. Pearce, K. I., & I. J. Walker., (2005). Frequency and magnitude biases in the 'Fryberger' model, with implications for characterizing geomorphically effective winds. *Geomorphology*. 68(1-2), 39-55.
11. Skidmore, E., 1987. Wind-erosion Direction Factors as Influenced by Field Shape and Wind Preponderance 1, *Soil Science Society of America Journal*, 51(1), 198-202.
12. Sterk, G., 2000. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport, *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 852-858.
13. Toy, T. J.; Foster, G. R.; & K. G. Renard, 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control: John Wiley & Sons.
14. Tsoar, H., 1994. Bagnold, RA 1941: The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen, *Progress in physical geography*, 18(1), 91-96.
15. Whicker, J. J.; Pinder, J. E.; & D. D. Breshears, 2006. Increased wind erosion from forest wildfire: implications for contaminant-related risks, *Journal of Environmental Quality*, 35(2), 468-478.
16. Yang, H.; Cao, J.; & X. Hou, 2019. Characteristics of Aeolian Dune, Wind Regime and Sand Transport in Hobq Desert, China, *Applied Sciences*, 9(24), 5543.
17. Zhang, C. L.; Zou, X. Y.; Gong, J. R.; Liu, L. Y.; & Y. Z. Liu, 2004. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel, *Soil and Tillage Research*, 75(1), 53-59.
18. Zhang, Z.; Dong, Z.; & C. Li, 2015. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert, *Aeolian Research*, 17, 1-13.
19. Zhang, Z.; Wieland, R.; Reiche, M.; Funk, R.; Hoffmann, C.; Li, Y.; & M. Sommer, 2012. Identifying sensitive areas to wind erosion in the Xilingele grassland by computational fluid dynamics modelling, *Ecological informatics*, 8, 37-47.
20. Parsamehr, A., & Z. Poorkhosravani., (2017). Analysis of erosive winds and the study of wind sediment carrying capacity in desert areas of Isfahan province. *Iranian Range and Desert Research*. 23(4), 832-842. (in persian)
21. Fatahi et al., 2002. Evaluation and preparation of total desertification risk map by FAO-UNEP method (Case study: Qomroud watershed), 2002. 17(4). (in persian)
22. Saremi Naeeni, M. A., 2017 Estimation of frequency, speed and direction of erosive winds and generating dust storms and fine dust in Yazd province using windrose, storm rose and sand rose analysis, *Desert Management*, 4(8), 96-106. (in persian)
23. Zamani et al., 2019. Wind erosion analysis of synoptic stations in Kerman province using wind rose, storm rose and sand rose, *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 23-43. (in persian)

Analysis of wind erosion and transport potential of quick sands located in the territory of Lut desert

Sasan Zangenehtabar: *Ph.D Student in Geomorphology, Physical Geography Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran*

Mehran Maghsoudi*: *Associate professor, Physical Geography Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran*

Fatemeh Menbari: *Ph.D Student in Geomorphology, Physical Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, University of Razi, Kermanshah*

Mina Hoseini: *Master of Geomorphology, Physical Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, University of Razi, Kermanshah*

Article History (Received: 2021/05/27

Accepted: 2021/05/26)

Extended abstract

1- Introduction

Arid and semi-arid regions of the world cover more than 30% of the earth's surface. Wind, as one of the erosive agents of the earth's surface, causes the transport of sand and deformation in arid areas. Wind erosion is directly related to wind speed. The higher the wind speed is above the threshold value, the more increase in wind speed. This issue increases wind erosion and thus, it intensifies wind erosion. The Iranian plateau is one of the most sensitive areas of the world to wind erosion due to its location on the arid belt of the northern hemisphere. The Lut Desert is one of the most active places for changes in wind speed and direction with its huge volume of sand masses. The eastern part of this region, which includes the largest sand mass in Iran, namely Yalan sand, is dominated by 120-day winds, which doubles the importance of studying winds and its shaping role in the wind season. The main purpose and assumption of this study is to analyze the frequency of erosive winds and estimate the potential and final direction of sand transport flow in the Lut plain and to investigate its relationship with the geomorphology of existing wind forms using time series data of wind direction and speed recorded in Synoptic stations are located around this plain.

2- Methodology

In this study, in order to analyze the wind situation and study the erosive winds in the Lut plain, the available meteorological data for 4 synoptic stations around this plain were used. WRPLOT view 7 software was used for statistical calculations of wind and drawing of wind rose. Sand Rose Graph 3 software was also used to draw the sand rose of the stations around Lut plain due to the high volume of calculations. To calculate the values of sand transport potential (DP) in different geographical directions, the Freiburger-Dean relationship based on the basic equations of Begnold and Leto-Leto was used. From the sum of DP values in different directions, the total sand carrying capacity (DPt) is obtained and in fact it is an indicator that represents the total wind energy to carry sand to the desired station. RDP stands for the amount or size of the output vector (resulting vector) of sand carrying capacity, which is obtained by summing the DP values in 8 or 16 different directions and shows the final status of sand transport in the study area. RDD indicates the net direction of sand movement (result vector direction) during the year, month or season. In order to determine the amount of sand

* Corresponding Author: maghsoud@ut.ac.ir

transferred per unit time, a unit of width is used from the equations presented by Begnold, Xing, 1953, Kawamura, 1964, Hesu, 1973 and Leto-Leto, 1978.

3- Results

At Shahdad station, about 40% of the winds blow from the north, north-northwest and north-northeast, and the rest of the winds often blow from the east and west. At Nehbandan station, about 20% of the winds blow from the north and northeast, and the rest of the winds have a great variety in the directions. At Bam station, about 36% of the winds blow from the west and west-northwest and the rest of the wind blows from the north and its surroundings. At Nusratabad station, about 31% of the winds blow from the east and southeast, about 27% of the winds from the west and northwest, and the rest of the winds from other directions with great variety. The results of annual hurricanes indicate that winds with north, north-northwest and north-northeast are the dominant winds in Nehbandan and Shahdad stations. At Bam station, in addition to the north directions, these winds also blow from the west and west-northwest directions. At Nusratabad station, there is a great variety of wind directions, but unlike other stations, the wind does not blow from the north. Analysis of net direction of sand movement (RDD) of the studied stations shows that the direction of sand movement in Bam and Shahdad stations is south-southeast, in Nehbandan station to the south and in Nusratabad station is to north-northeast. The analysis of the direction of movement of the sandrose shows the complete correspondence with the hurricane rose of the studied stations. Total sand carrying capacity (DPt) indicates moderate erosion power for Bam and Nusratabad stations and high erosion power for Shahdad and Nehbandan stations. The highest value of vector output of sand carrying capacity (RDP) is related to Shahdad station, followed by Nehbandan, Nusratabad and Bam stations, respectively. For Shahdad, Bam and Nehbandan stations, the maximum amount of one-way winds occurs in autumn and in Nusratabad station in late winter and spring. The maximum amount of sand flow for Bam, Shahdad, Nehbandan and Nusrat Abad stations is 165, 320, 233 and 202 kg/m/s, respectively.

4- Discussion & Conclusions

The results indicated that in Shahdad and Nehbandan stations located in the northern half of Lut plain, most of the winds blow from the north, but in Bam and Nusratabad stations located in the southern half of Lut plain, most of the winds are concentrated towards Lut. The highest percentage of occurrence of winds above the threshold speed for Shahdad, Nehbandan and Bam stations occur in summer and the highest percentage of occurrence in Nusratabad station is related to spring. Analysis of net direction of sand movement (RDD) shows that the direction of sand movement in Bam and Shahdad stations is to the south-southeast, in Nehbandan station is to the south and in Nusratabad station is to the north-northeast. Total sand carrying capacity (DPt) indicates moderate erosion power for Bam and Nusratabad stations and high erosion power for Shahdad and Nehbandan stations. The highest value of vector output of sand carrying capacity (RDP) is related to Shahdad station, followed by Nehbandan, Nusratabad and Bam stations, respectively. The study of sand homogeneity index (UDI) indicates one-way winds for Nehbandan station and two-way winds with aperture angle for Bam, Shahdad and Nusratabad stations. The highest flow rate of sand is related to Shahdad station with 320 kg/m/s and the lowest is related to Nusratabad station with 50 kg/m/s.

Key Words: Wind, Sand Carrying Potential, Erosion, Lut.