

Analysis of the effects of climatic elements on the mobility of wind-blown sand in the west of Lut desert

Zeinab Hazbavi ^{a,*} , Mahin Hanifehpour ^b , Leila Biabani ^b , Behrouz Akbarpour Bonab ^b 

^a Associate Professor, Department of Rangeland & Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^b PhD in Natural Resources Engineering-Desertification, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

^c PhD Student in Desert Management and Control, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

^d MSc, Hydro-Climate Expert, Aquifer Consulting Engineers, Tehran, Iran

Research Full Paper

Article History (Received: 2023/12/29)

Accepted: 2024/2/19

Extended abstract

1- Introduction

Sand dunes are one of the most important landforms in arid and semi-arid regions, whose mobility varies depending on climatic factors, especially the speed and frequency of erosive winds, rainfall, and the amount of evaporation and transpiration, which always causes many problems for the activity of these dunes. Therefore, monitoring climatic factors and analyzing dust events can be a positive step toward knowing the factors affecting their activity and predicting their mobility status in the future. Lut desert, with its huge amount of sand masses, is one of the most active places concerning changes in wind speed and direction. The eastern part of this region, which includes the largest sand mass of Iran, the Yalan sand, is dominated by the 120-day winds, which doubles the importance of investigating the winds and their shaping role during the blowing season of these winds. Based on this, the current research was conducted to analyze the mobility of quicksands in Lut plain stations in the past and predict their conditions in the future.

2- Methodology

The study area includes the Lut desert located in Kerman province. To conduct this research, average monthly values of climatic elements including temperature, rainfall, hourly data related to horizontal field of view, wind speed and direction, and the code of various dust phenomena were used. These data were received from the Meteorological Organization of seven synoptic stations that have statistics for 20 years (2002 to 2021). Investigating the changes of climatic parameters over 20 years, investigating the temporal and spatial mechanism pattern of dust, wind and storm rose, calculating the amount of evaporation and transpiration using the Torrent-White method, investigating the condition of dunes using the Lancaster index were the main steps of the current research. The mobility of quicksands was tested using a sensitivity analysis and at the end, the zoning maps of the final sand transport potential were prepared using ArcGIS software.

3- Results

The results showed that the stations leading to Lut plain are facing a decrease in rainfall and an increase in temperature, evaporation, and transpiration. The changes in wind speed are high in Shahdad station and low in Baft station, and the prevailing wind direction in most of the studied stations is west and

* Corresponding Author: z.hazbavi@uma.ac.ir

north. The highest frequency of local and extra-local winds is related to Nehbandan station with 1090 days and Bam station with 791 days, and the lowest frequency of winds is Local and extra-local corresponding to Baft station with 23 and 31 days, respectively. The calculation of the aridity index of the stations showed that the index of prevailing climatic conditions in the region is dry, ultra-arid, and semi-arid due to the activeness of wind deposits and the peak time of local events in the stations located in plain areas, and this means Shahdad station has become a real desert in terms of desertification risk, Baft station is under severe desertification risk, and other five stations are under very severe desertification risk. With the reduction of the UNEP aridity index and the increase of the aridity of the environment, the amount of sand mobility in the whole Lut plain is increased and the risk of desertification in the region is intensified. Based on the sensitivity analysis, if in the future the frequency of winds exceeds the erosion threshold by 30%, the activity and movement of dunes will increase by 30%, while with a 30% increase in rainfall, the dune activity will decrease by 43%. Also, the sand mobility index has a positive relationship with changes in evaporation and transpiration. With a 30 % increase in evaporation and transpiration and the speed of erosive winds, the activity and movement of dunes increase by up to 70 %, and with a 30 % decrease in these two meteorological indicators, the activity and movement of dunes decrease by 50 %.

4- Discussion & Conclusions

By calculating the Lancaster index, the potential activity of dunes has been determined and the active and inactive areas have been separated. The results of the zoning of this index showed that in the studied area, the activity level of dunes is mostly completely active and active at the top of the dunes. It is inactive only in Bam station, which has been done to stabilize and reduce dust activity and management measures such as planting trees, hand-planting desert forests, dunes, and mulching. However, due to the activity of the dunes in other stations, these measures are not enough and need new management and planning. The results of the present research can be used to predict the future condition of dunes and determine appropriate management measures to control and reduce possible damage to other land uses in the region.

Key Words: Dryness index, Lancaster index, Lut desert, Sand dunes, Wind erosion.

Cite this article: Hazbavi, Z., Hanifehpour, M., Biabani, L., & Akbarpour Bonab, B. (2024). The effect analysis of climatic elements on the mobility of wind-blown sand in the west of Lut desert. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2024; 14 (1) :79-101. <http://doi.org/>



© The Author(s).
DOI: <http://doi.org/>

Published by Hormozgan University Press.
[URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir](http://magazine.hormozgan.ac.ir)

تحلیل اثرات عناصر اقلیمی بر تحرک پذیری ماسه‌های بادی غرب بیابان لوت

زینب حرباوی*: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مهین حنیفه‌پور: دکتری مهندسی منابع طبیعی- بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران

لیلا بیابانی: دانشجوی دکتری مهندسی منابع طبیعی- بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران

بهروز اکبرپور بناب: کارشناس هیدرولوژی، مهندسین مشاور آبخوان، تهران

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰)

DOI: <http://doi.org/>

چکیده

پژوهش حاضر با هدف آگاهی از وضعیت تپه‌های ماسه‌ای بیابان لوت واقع در استان کرمان برای جلوگیری از تشديد بحران‌های محیط زیستی در آینده انجام شد. بدین ترتیب، ابتدا از داده‌های ساعتی سرعت باد، کد پدیده‌های گردوغبار، بارندگی و درجه حرارت هفت ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰) استفاده شد. سپس نسبت به بررسی روند تغییرات عوامل اقلیمی و الگوی مکانیسم زمانی و مکانی گردوغبار، گل‌باد، گل‌طوفان، تبخیر و تعرق پرداخته شد. در ادامه، وضعیت فعالیت تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر تعیین شد و حساسیت تحرک پذیری ماسه‌های روان نسبت به تغییرات عوامل اقلیمی مؤثر بر آن مورد تحلیل قرار گرفت. در پایان پنهانی پتانسیل نهایی حمل صورت پذیرفت. شرایط اقلیمی حاکم در منطقه دارای شرایط خشک، فراخشک و نیمه‌خشک بوده است. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های منتهی به بیابان لوت با کاهش میزان بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تعرق روبرو هستند. بیشترین فراوانی بادهای محلی و فرامحلی به ترتیب مربوط به ایستگاه نهبندان با ۱۰۹۰ روز و ایستگاه بم با ۷۹۱ روز و کمترین فراوانی بادهای محلی و فرامحلی به ترتیب مربوط به ایستگاه بافت با ۲۳ و ۳۱ روز است. بر اساس شاخص لنکستر، میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه‌های مورد مطالعه کاملاً فعال و فعال بوده و بیشترین شاخص لنکستر در ایستگاه شهداد بدست آمده است. می‌توان جمع‌بندی نمود که بیابان لوت در معرض خطر بیابان‌زایی شدید و بسیار شدید قرار دارد. بر اساس آزمون تحلیل حساسیت، چنان‌چه در آینده درصد فراوانی بادهای بیشتر از آستانه فراسایش، به میزان ۳۰ درصد افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت، درحالی‌که با افزایش ۳۰ درصد بارندگی حدود ۴۳ درصد کاهش در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشاهده می‌شود. بنابراین، حساسیت تحرک پذیری ماسه‌های روان نسبت به تغییرات افزایش ناشی از بارندگی بیشتر از سرعت باد است.

واژگان کلیدی: بیابان لوت، تپه‌های ماسه‌ای، شاخص خشکی، شاخص لنکستر، فراسایش بادی.

۱- مقدمه

تپه‌های ماسه‌ای در قلمرو فرآیند بادی از پویاترین عارضه‌های ژئومورفیک سطح زمین به شمار می‌روند که از یک سو متأثر از ویژگی‌های سرعت، جهت و فراوانی باد و از سوی دیگر متأثر از ویژگی‌های سطح زمین و مواد رسوبی‌اند (Abbasnejad and Zahab Nouri, 2012). باد عامل اصلی تخریب و فرسایش در مناطق بیابانی محسوب می‌شود. برای جلوگیری از اثرات تخریبی آن باید شناخت کافی داشت و مهم‌ترین عوامل مؤثر از جمله سرعت باد، جهت باد غالب و فراوانی باد تجزیه و تحلیل شوند (Ahmadi, 2012). فرسایش بادی در مکان‌هایی که درجه حرارت به طور مداوم بالا و کمبود بارندگی وجود دارد بیشتر است. همچنین، حرکت و گردش باد عوامل بسیار مهمی در فرسایش بادی هستند (Al-Soud and Al-Shakarchi, 2020). زمانی که نیروی آئرودینامیکی اعمال شده به ذرات خاک کم‌تر از نیروی گرانشی باشد، در نهایت ذرات روی زمین سقوط می‌کنند (Bagnold, 1941). در این زمینه، Al-Soud و Al-Shakarchi (2020) گزارش دادند که هر چه باد تأثیر بیشتری داشته باشد، فرسایش‌پذیری خاک بیشتر می‌شود. ذرات با اندازه ماسه پس از انتقال توسط باد به صورت تپه‌های ماسه‌ای با شکل و اندازه‌های مختلف جمع می‌شوند. شکل و اندازه تپه‌ها نیز منعکس کننده ویژگی‌های رسوب (در درجه اول اندازه دانه) و رژیم باد سطحی (تغییر جهت باد) است (Tsoar, 2001).

قریباً ۷۷ درصد از کل کوه زمین را آب و هوای خشک یا نیمه‌خشک تجربه می‌کند و تپه‌های ماسه‌ای ایجاد شده توسط فعالیت‌های باد بر بخش بزرگی از این مناطق تأثیر می‌گذارند. حرکت ماسه‌ها یکی از علل مهم مشکلات محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سراسر جهان در نظر گرفته شده است (Iranmanesh et al, 2016). به طوری که حرکت تپه‌های ماسه‌ای به عنوان یکی از عوامل بیابان‌زایی به شمار می‌آید، اثرات مخرب طولانی‌مدت بر بهره‌وری خاک و غنای بوم‌شناختی بر جای می‌گذارد (Lam et al, 2011) و نقش مهمی در انتشار منابع گرد و غبار جهانی دارد (Harrison et al, 2001). گاهی اوقات، تپه‌های ماسه‌ای تهدیدی برای شهرهای پرجمعیت، روستاهای شبکه‌های جاده‌ای، زمین‌های کشاورزی، منابع آبی و سلامت انسان به شمار می‌روند (Walker and Cronon, 2009). علی‌رغم تلاش‌های قابل توجه برای کاهش حرکت تپه‌های ماسه‌ای، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که حرکت تپه‌ها ادامه دارد و خطر آن برای محیط زیست و انسان به طور فزاینده‌ای جدی می‌شود (Lamqadem et al, 2018; Masoudi et al, 2018). علاوه بر این، دخالت‌های انسانی در تپه‌های ماسه‌ای متحرک و تغییر جهت آن‌ها می‌توانند تهدیدات قابل توجهی برای زیرساخت‌های حمل و نقل، کشاورزی، صنعت، سکونتگاه‌ها، منابع آب و خاک، گیاهان و جانوران ایجاد کنند و ارزیابی خطر محلی را افزایش دهند (Amin and Seif, 2019; Ding et al, 2020).

اگر چه، مطالعات مختلفی در ارتباط با تغییرات اقلیمی و حرکت تپه‌های ماسه‌ای و ارزیابی اثرات آن در آینده انجام شده است (Muhs and Maat, 1993; Lancaster, 2013; Wang et al, 2022) اما مطالعات کمی در ارتباط با روند تغییرات متغیرهای اقلیمی (Livingstone 2003; Jewell and Nicoll, 2011; Besler et al, 2013; Zhang et al, 2016) بر مبنای داده‌های بلندمدت برای درک فرآیندهای بادی و دینامیک تپه‌ها انجام شده است. در این زمینه، Hamdan et al. (2016) ویژگی‌های ریخت‌شناسی و میزان جابه‌جایی بارخان‌ها را در جنوب شرقی بیابان غربی مصر بررسی کرده‌اند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از تصاویر گوگل ارث در بازه‌های زمانی مختلف جابه‌جایی تپه‌های

ماسه‌ای را بررسی کردند. همچنین، نتایج Maghsoudi et al. (2017) در پایش جابجایی ریگ و بارخان‌های غرب لوت که در توابع بخش شهداد قرار دارد، نشان داد که ریگ مورد نظر به سمت جنوب و جنوب شرق در حال جابجایی است. بر اساس مطالعات میدانی به عمل آمده میزان حرکت بارخان دوم ۹۶ متر و بارخان اول ۱۳۵ متر برآورد شد. سپس، (2018) Masoudi et al. با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بادسنجدی و تصاویر ماهواره‌ای، الگوی گسترش و توسعه تپه‌های ماسه‌ای و وضعیت بادهای فعال را در سطح ریگ مصر بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد این منطقه متأثر از بادهای غالب از جهت شمال غربی-جنوب شرقی طی روزهای سرد سال است. عمدۀ جابه‌جای‌ها در سطح ریگ از این روند پیروی کرده و متوسط جابه‌جای در سطح تپه‌ها، هشت متر در سال ارزیابی شده است.

Nazari Samani et al. (2018) به بررسی نقش فرسایندگی باد و حمل ماسه بر تحرک پذیری ماسه در حاشیه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص لنکستر، هشت ایستگاه منتخب منطقه دارای شاخص تحرک پذیری کم‌تر از ۱ بوده که این موضوع نشان‌دهنده غیرفعال بودن تپه‌های ماسه‌ای و حالت تراکمی آن‌هاست. همچنین، (2019) Abbasí et al. براساس شاخص‌های تحرک و داده‌های زمینی برای ارزیابی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای ایران، در دشت سیستان، بیابان لوت و در مناطق زیرکوه قاین و دیهوک، تپه‌های شیب‌دار کاملاً فعال را شناسایی کردند. Zhang et al. (2019) نیز در پژوهشی تغییرپذیری فرسایش بادی و مقادیر تخریب دینامیکی ناشی از آن را در مناطق کشاورزی شمال چین در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ شبیه‌سازی کردند. در ادامه، (2020) Zandifa et al. به بررسی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر آن در منطقه بوین زهرا طی دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۸۵ پرداختند. تحلیل حساسیت نشان داد که هر چه مقدار سرعت باد و تبخیر و تعرق به دلیل تغییر کاربری و یا تغییر اقلیمی به مقدار ۳۰ درصد در آینده افزایش یابد، وضعیت تپه‌ها از حالت غیرفعال به فعال تغییر خواهد کرد و فعالیت فرسایش بادی در منطقه مجددًا آغاز خواهد شد.

نتایج مطالعه Karimi (2021) درخصوص پایش جابجایی تپه‌های ماسه‌ای بادی ریگ یلان در بیابان لوت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای را داری نشان داد که مقدار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ یلان از صفر در مناطق خاکی و رسوبی غیر متحرک تا حد اکثر سه متر در سال در هرمهای ماسه‌ای بزرگ منطقه که عمدتاً در مرکز، غرب و جنوب ریگ متغیر کرده است. همچنین بررسی توان حمل ماسه و حرکت تپه‌های ماسه‌ای در سه دهه گذشته در ارگ خارطوران واقع در شمال شرقی ایران توسط Rahdari and Rodríguez-Seijo (2021) نشان داد که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ در حمل ماسه افزایش شدیدی رخ داده که می‌تواند ناشی از تغییر سرعت باد در منطقه باشد. شاخص تغییرپذیری به مدت ۳۰ سال از $۰/۳$ تا $۰/۶$ متغیر بوده است. علاوه بر این، Naeimi et al. (2022) نشان دادند که روند رویدادهای گردوغبار محلی در ایستگاه سرخس افزایشی است و تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای با دو شاخص لنکستر و لنکستر اصلاح شده ارتباط معنی‌داری در تراز ۹۹ درصد با روزهای گردوغبار دارد. لذا با افزایش خشکی محیط در منطقه بر اندازه تحرک پذیری شاخص لنکستر افزوده و خطر بیابان‌زایی تشدید می‌شود.

Akbarpour et al. (2022) به بررسی ویژگی‌های رژیم بادی و پتانسیل حمل ماسه در تپه‌های ساحلی جاسک پرداختند. نتایج نشان داد که جهت باد غالب عمدتاً غربی است. همچنین بیشترین فراوانی بادهای فرساینده در فصل تابستان و در ماه‌های مرداد و شهریور هستند. کمترین فراوانی در فصل پاییز و در آبان مشاهده شد. جهت باد ماسه آور نیز

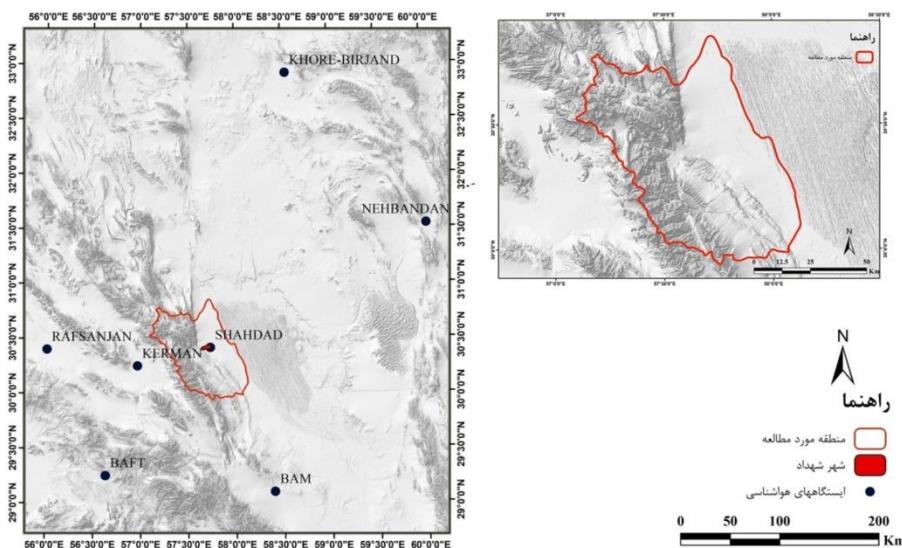
عمدتاً شمال-غربی است. از سوی دیگر توانایی دبی ماهه بر اساس میانگین قابلیت حمل ماهه (v.u DP=257) در حدود ۱۸ مترمکعب در واحد عرض برآورد شد. در ادامه، (Hanifepour et al. 2022) نشان دادند که مقادیر شاخص سالانه لنکستر، وضعیت تپه‌های ماسه‌ای در کویر سیرجان را به صورت فعال فقط در نوک تپه مشخص کرده است. بر اساس تحلیل حساسیت مشخص شد که در صورت افزایش ۳۰ درصد فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای به میزان ۶۹ درصد افزایش خواهد یافت و از حالت فعال فقط در نوک تپه به فعال تبدیل می‌شود. Rahi et al. (2022) با پایش و پیش‌بینی عوامل اقلیمی مؤثر بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر در منطقه دیر استان بوشهر به این نتیجه رسیدند که چنان‌چه در آینده درصد فراوانی بادهای بیش‌تر از آستانه فرسایش در منطقه دیر ۳۰ درصد افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت، در حالی که با افزایش ۳۰ درصد بارندگی، حدود ۲۳ درصد کاهش در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشاهده شده است. هم‌چنین، نتایج حاصل از بررسی باد در شناسایی منشأ و مسیر انتقال ماسه به محدوده تپه‌های ماسه‌ای دروازه‌قرآن یزد توسط Shahriar et al. (2023) نشان داد که بادهای شدید در فصول خشک با امتداد شمال غربی، نقش مهمی در شکل‌گیری، توسعه و جابه‌جایی ماسه‌ها ایفا می‌کنند. اخیراً، Yasien Al-Gurairy and Al-Zubaidi (2023) در عراق بیان کردند که مهم‌ترین دلیل افزایش پدیده تپه‌های ماسه‌ای طی دوره آماری ۱۹۸۴-۲۰۲۲، تغییرات اقلیمی و همراه با کمبود بارندگی و افزایش مداوم میانگین درجه حرارت سالانه منطقه بوده است.

پدیده گرد و غبار و حرکت ماسه‌های روان به عنوان یکی از فرآیندهای مهم بیابان‌زایی و تخریب اراضی در ایران به شمار می‌آید و عوامل اقلیمی نیز در این پدیده نقش به سزایی دارند. بنابراین، بررسی و شناخت این عوامل و تأثیر آن‌ها بر ایجاد و تشديد پدیده گرد و غبار و تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای بهویژه در فلات ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک نیم کره شمالی، جهت جلوگیری از افزایش بحران‌های محیطی در آینده یک ضرورت است که تاکنون چنین مطالعه‌ای در بیابان لوت گزارش نشده است. بر همین اساس، مطالعه جامع پدیده گرد و غبار و تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی بر این پدیده، در جهت مقابله با آن و در نتیجه حفظ سلامت جمعیت انسانی ساکن شهرها و اطراف آن ضروری است. در همین راستا، پژوهش حاضر با اهداف چندگانه بررسی روند و ارتباط تغییرات عوامل آب و هوایی و پدیده گرد و غبار، تعیین رژیم بادی منطقه و نیز شرایط اقلیمی و تأثیر آن بر میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و در نهایت، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر تحرک پذیری ماسه‌های روان در آینده با استفاده از شاخص لنکستر با در نظر گرفتن شرایط گذشته برنامه‌ریزی شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در غرب بیابان لوت و در منطقه شهداد که در طول جغرافیایی ۵۶ درجه و عرض ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه با ارتفاع ۵۲۰ متر از سطح دریا واقع شده، صورت گرفته است (شکل ۱). این منطقه دارای اقلیمی خشک و بیابانی و دارای اشکال زمین‌ریخت‌شناسی عمده‌ای است که اکثراً تحت تأثیر بادهای با جهت شمال غرب-جنوب شرق و با سرعت شش متر در ثانیه می‌باشد. بارندگی متوسط کمتر از ۱۰ میلی‌متر و درجه حرارت بین ۱۱ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است و طبق بعضی پژوهش‌ها، این منطقه به عنوان گرم‌ترین نقطه کره زمین شناخته شده است (Ehsani & Quiel, 2008). منطقه از لحاظ زمین‌ریخت‌شناسی در واحد بزرگ پلایای زمین‌ساخت لوت واقع شده است. منطقه در

محیط حمل فرسايش بادی قرار دارد که منجر به رسوب گذاري رسوبات بادی در پای گیاهان هالوفیت و زروفیت منطقه شده و رخساره حمل برگرفته از نبکا و ربدو را نمایان ساخته است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۳- مواد و روش

۱-۳- جمع آوري آمار بلندمدت عناصر اقليمي در ايستگاه‌های سينوپتيك اطراف بیابان لوت

جهت انجام پژوهش حاضر از مقادير متوسط ماهانه عناصر اقليمي شامل دما، بارندگي، داده‌های ساعتی مربوط به ميدان دید افقی، سرعت و جهت باد و كد پديده‌های مختلف گردوغبار استفاده شد. اين داده‌ها از سازمان هواسناسي مربوط به هفت ايستگاه سينوپتيك (جدول ۱) که داراي آمار ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰) هستند، دريافت شدند.

فراوانی هر يك از كدهای مربوط به طوفان‌های گردوغبار (۳۱، ۳۴، ۳۲، ۳۳، ۳۵ و ۰۹) و كدهای مربوط به پدیده گردوغبار (۰۶ و ۰۷) در هر يك از ايستگاه‌های منتخب محاسبه شد. با توجه به تعداد برداشت و ثبت اطلاعات هشت بار در روز در ايستگاه‌های سينوپتيك، شمارش تعداد پدیده‌ها و روزهای گردوغبار در ايستگاه‌های محدوده مطالعه صورت گرفت. سپس مجموع فراوانی تعداد روزهای گرد و غبار برای دوره آماری مورد مطالعه تعیین شد.

جدول ۱: موقعیت ايستگاه‌های سينوپتيك مورد مطالعه

نام ايستگاه	ارتفاع	طول	عرض
کرمان	۱۷۵۴	۵۶°۰'۰"/۴۳°۹'N	۳۰°۱۵'۰"/۱۵°E
بم	۱۰۶۷	۵۸°۰'۰"/۴۹°۸'E	۲۹°۰'۰"/۳۴°N
نهیندان	۱۲۵۰	۶۰°۰'۰"/۹۷°۳'E	۳۱°۳۲'۰"/۵۲°N
بافت	۲۲۵۰	۵۶°۰'۳۸"/۴۲°E	۲۹°۱۵'۰"/۳۶°N
رسنجان	۱۴۶۹	۵۶°۰'۰"/۳۲°E	۳۰°۲۴'۰"/۴۵°N
بيرجند	۱۰۷۰	۵۸°۰'۳۳"/۷۴°E	۳۲°۵۵'۰"/۶۵°N
شهداد	۵۲۰	۵۷°۰'۴۴"/۵۹°E	۳۰°۲۵'۰"/۴۴°N

۲-۳- بررسی جهت باد

داده‌های بادسنجی با استفاده از نرم‌افزار WR- Plot View 7 که قابل استفاده برای نرم‌افزار WD-Convert 2 است، تبدیل شدند. آن‌گاه با استفاده از این نرم‌افزار، گل‌بادهای سالانه و فصلی ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم شد. در گل‌طوفان جهت تجزیه و تحلیل بادهای منطقه، کلیه بادهای با سرعت کمتر از سرعت آستانه فرسایش (۱۲ نات) به عنوان باد آرام در نظر گرفته شد. در نتیجه تنها بادهایی در ترسیم گل‌طوفان نقش داشتند که دارای سرعتی بیشتر از سرعت آستانه فرسایش خاک بودند. بر همین اساس، با دخالت سرعت آستانه فرسایش خاک، عملیات فراوانی و رسم منحنی روی این داده‌ها انجام شد (Ekhtesasi, 2004).

۳-۳- محاسبه شاخص لنکستر و شاخص خشکی یونپ

شاخص لنکستر^۱ جهت بررسی میزان تحرک پذیری ماسه‌های روان محاسبه شده است. این شاخص به طور گستردگی توسعه زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان برای تعیین تپه‌های ماسه‌ای فعال یا تثبیت‌شده مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند برای دهه‌های آینده نیز قابل پیش‌بینی باشد. بررسی تحرک تپه‌های ماسه‌ای و شن‌زارها در قسمت‌های مختلف جهان، براساس دو عامل عمدی که تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند، شکل گرفته‌اند. عامل اول مربوط به میزان بادخیزی است (W) که بر اساس سرعت بادهای بیشتر از سرعت آستانه فرسایش محاسبه شده است. اگر درجه بادخیزی (W) افزایش پیدا کند، بیشتر تپه‌های ماسه‌ای به صورت متحرک در می‌آیند. عامل دوم به رشد پوشش گیاهی هر منطقه بستگی دارد، به صورت نسبت بین متوسط بارندگی سالانه (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (PET) بیان می‌شود که به این نسبت "بارندگی مؤثر" نیز گفته می‌شود. پایه و اساس این مدل تحت عنوان شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ی لنکستر (Lancaster, 1988) شناخته می‌شود.

به منظور تعیین فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، با در نظر گرفتن سه متغیر محیطی از رابطه ۱ استفاده شد (Lancaster, 1988):

$$M = W / (P/PE) = (W \times PE) / P$$

رابطه ۱

در این رابطه، M میزان فعالیت رسوبات بادی مانند تپه‌های ماسه‌ای؛ W درصد فراوانی بادهای با سرعت بیش از سرعت آستانه فرسایش بر حسب متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، P میانگین بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر در سال و PE بیان گر تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بر حسب میلی‌متر در سال است که در پژوهش حاضر با استفاده از روش تورنتوایت و بر اساس متوسط دمای ماهانه محاسبه شده است.

با توجه به مقادیر محاسبه شده در رابطه ۱، شاخص تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای (M) قابل طبقه‌بندی است.

به طوری که، M کمتر از ۵۰ نشان‌دهنده تپه‌های ماسه‌ای غیرفعال، M بین ۵۰-۱۰۰، نشان‌دهنده فعل بودن تپه‌های ماسه‌ای فقط در نوک تپه، M بین ۱۰۰-۲۰۰، نشان‌دهنده تپه‌های ماسه‌ای فعال و M بالاتر از ۲۰۰، نشان‌دهنده تپه‌های ماسه‌ای کاملاً فعل است. همچنین با استفاده از شاخص خشکی یونپ (P/PE) که توسط کنوانسیون سازمان ملل متحد برای مقابله با بیابان‌زایی تأیید شده است، نوع اقلیم حاکم بر منطقه و خطر بیابان‌زایی تعیین شده است (جدول ۲).

¹ Lancaster

جدول ۲: طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس شاخص خشکی یونپ (Zehtabian et al, 2014)

نوع اقلیم	شاخص خشکی (R)	خطر بیابان‌زایی
فراخشک	$R < 0.05$	بیابان واقعی
خشک	$0.05 < R < 0.2$	بسیار شدید
نیمه‌خشک	$0.2 < R < 0.5$	شدید
خشک نیمه‌مرطوب	$0.5 < R < 0.65$	متوسط
نیمه‌مرطوب	$0.65 < R < 0.75$	کم
مرطوب و بسیار مرطوب	$0.75 < R$	ندارد

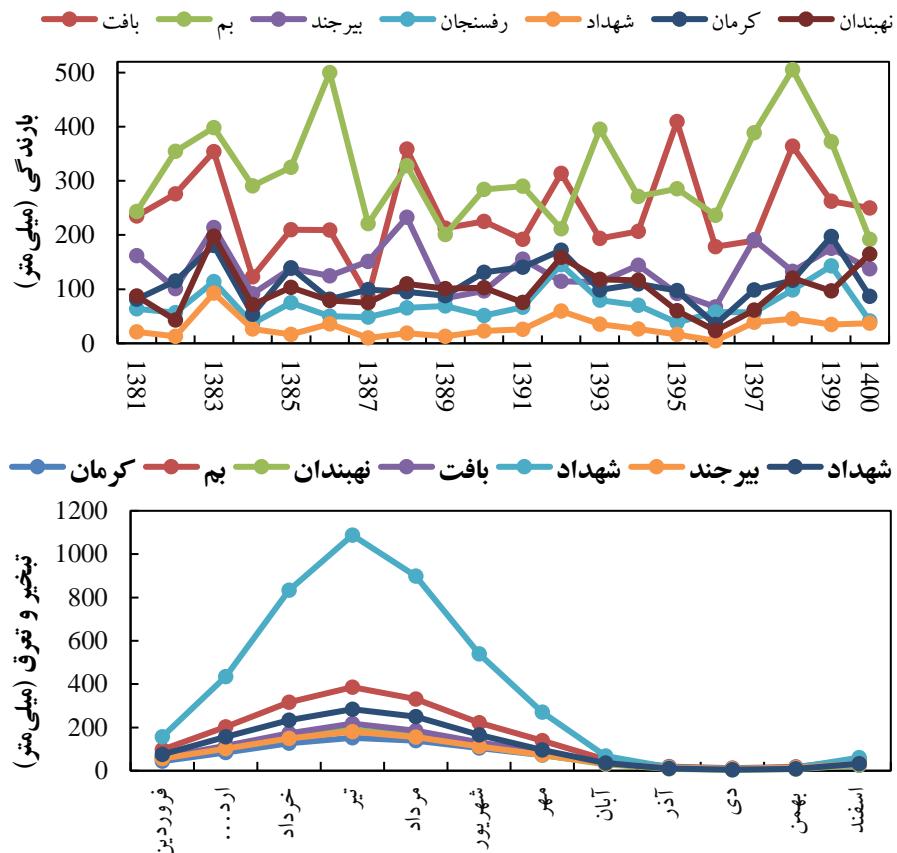
۳-۴- پیش‌بینی تاثیر تغییرات احتمالی عناصر اقلیمی بر تحرک پذیری ماسه‌های روان

در نهایت، پس از محاسبه میزان فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، در مقابل افزایش یا کاهش هر یک از متغیرها، میزان تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل تعیین شد. به عبارت دیگر، تحلیل حساسیت روشنی است که با تغییر دادن ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک)، می‌تواند تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی نماید. لذا برخی از عناصر اقلیمی مهم (مانند بارندگی، باد، تبخیر) که بر میزان تحرک پذیری ماسه‌های روان تأثیر بهسزایی دارند، در دامنه‌ای معقول تغییر داده شده و اثر این تغییرات در خروجی مدل، یعنی میزان تحرک پذیری ماسه‌های روان محاسبه شده است.

۴- یافته‌ها

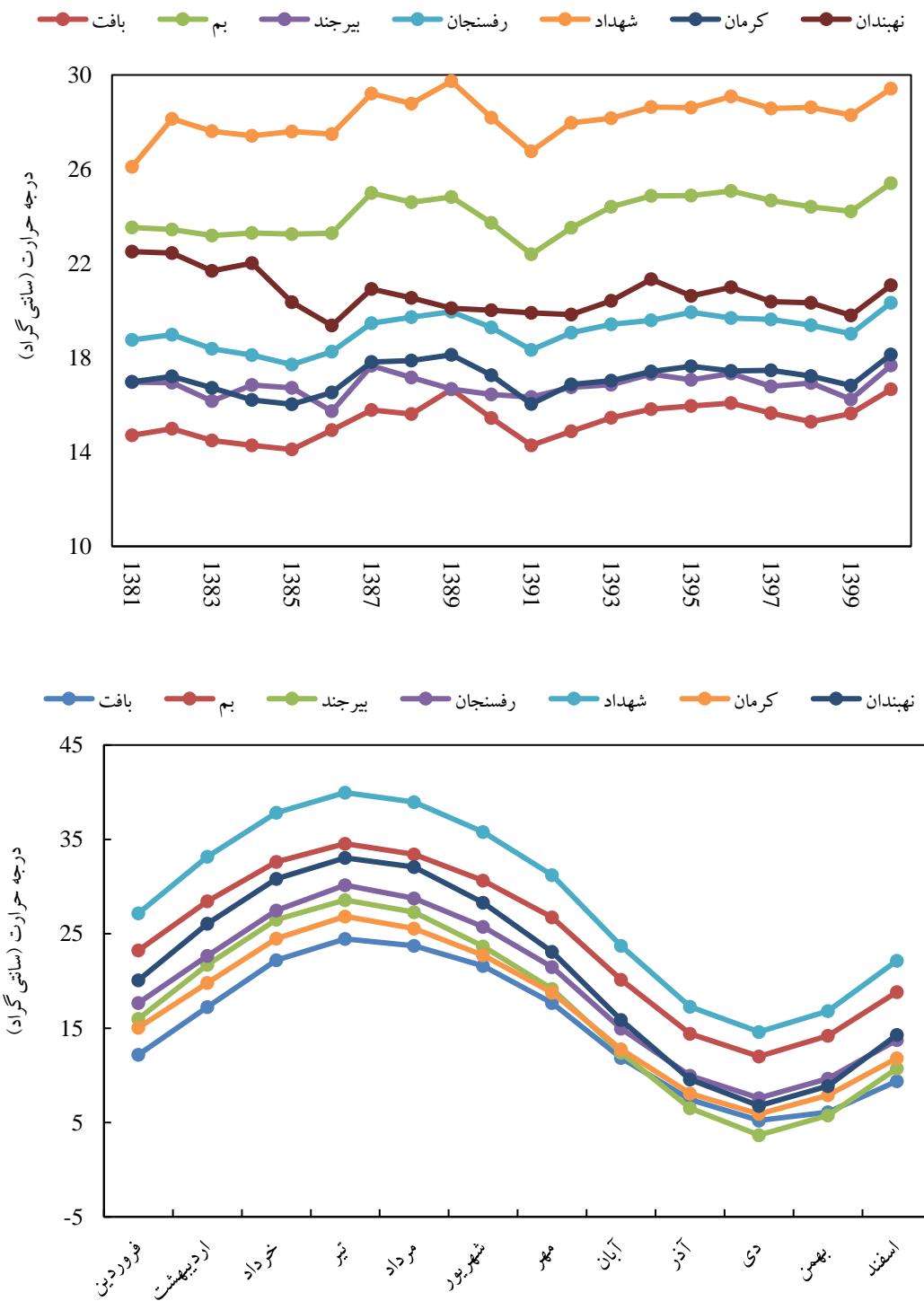
۴-۱- بررسی روند متغیرهای اقلیمی

تجزیه و تحلیل‌های آماری بر داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت در دوره ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰) نشان داد که تغییرات سالانه قابل ملاحظه‌ای در بارندگی، دما، باد و تبخیر و تعرق سالانه اتفاق افتاده است، به طوری که روند بارندگی سالانه در تمام ایستگاه‌ها روند کاهشی را نشان داده است. بر اساس شکل ۲ مشخص شد که ایستگاه شهداد دارای کمترین میزان بارندگی (۲۹/۷ میلی‌متر) و ایستگاه بم دارای بیشترین میزان بارندگی (۳۱۴/۷ میلی‌متر) نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه هستند. هم‌چنین بیشترین بارندگی در ایستگاه بم با ۵۰۵ میلی‌متر در سال ۱۳۹۸ و کمترین بارندگی در سال ۱۳۹۶ در ایستگاه شهداد با ۴/۶ میلی‌متر مشاهده شده است. از اردیبهشت تا مهر، منطقه با کاهش شدید بارندگی مواجه بوده و کمترین بارندگی در تیر با ۱۵/۱ میلی‌متر و بیشترین بارندگی در فروردین با ۱۳۴ میلی‌متر ثبت شده است.

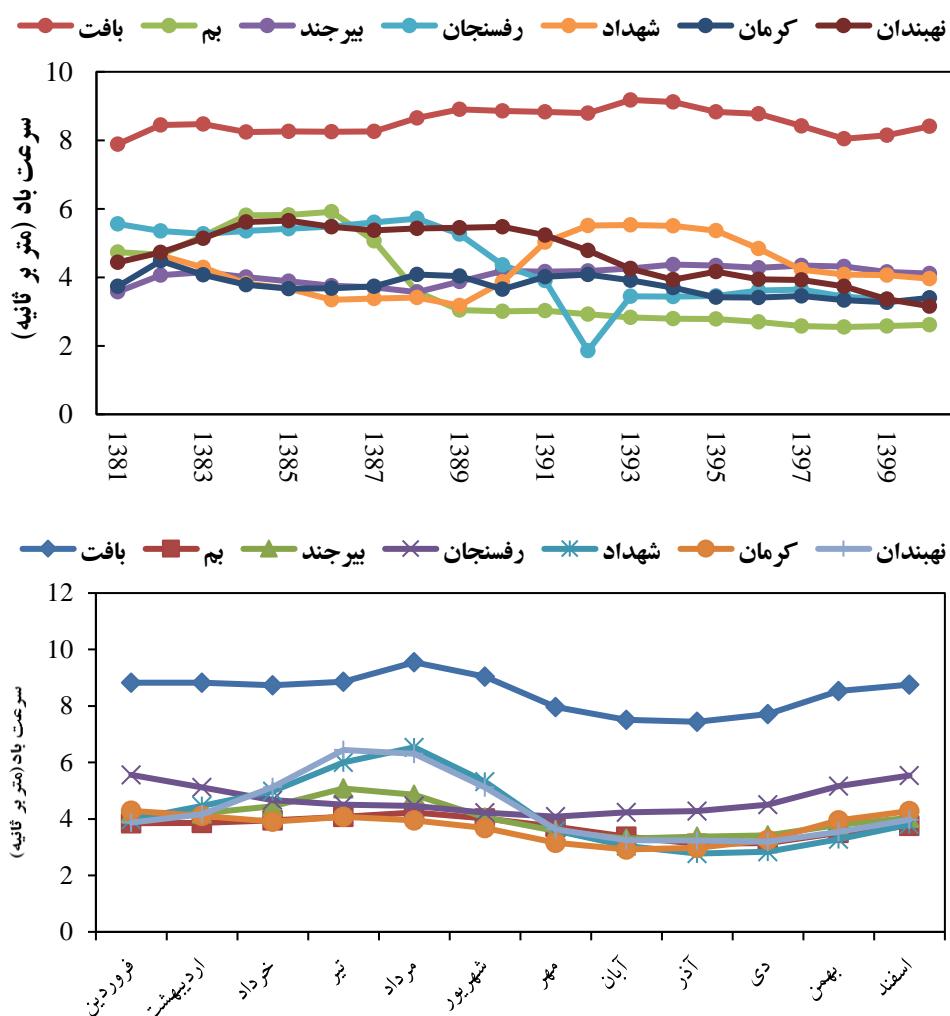


شکل ۲: تغییرات بلندمدت بارندگی سالانه (بالا) و تبخیر و تعرق ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت

بر اساس شکل ۳ بیشترین میانگین درجه حرارت سالانه در ایستگاه شهudad ۲۸/۲ درجه سانتی گراد و کمترین میانگین آن در ایستگاه بافت با ۱۵/۳ درجه سانتی گراد بود. بیشترین درجه حرارت سالانه در ایستگاه شهudad در سال ۱۳۸۹ با ۲۹/۷ درجه سانتی گراد و کمترین درجه حرارت سالانه در سال ۱۳۸۵ با ۱۴/۱ درجه سانتی گراد در ایستگاه بافت مشاهده شده است. محدوده مطالعه از فروردین تا مرداد همزمان با کاهش بارندگی با افزایش دما مواجه بوده که بیشترین دما در تیر و کمترین دما در دی است. همچنین، تغییرات سرعت باد در ایستگاه شهudad زیاد و در ایستگاه بافت کم است. در مقیاس ماهانه بیشترین سرعت باد غالب در مرداد و در ایستگاه بافت و کمترین سرعت باد غالب در دی در ایستگاه کرمان مشاهده شده است. جهت باد غالب در اکثر ایستگاه‌های مطالعه غرب و شمال است (شکل ۴).

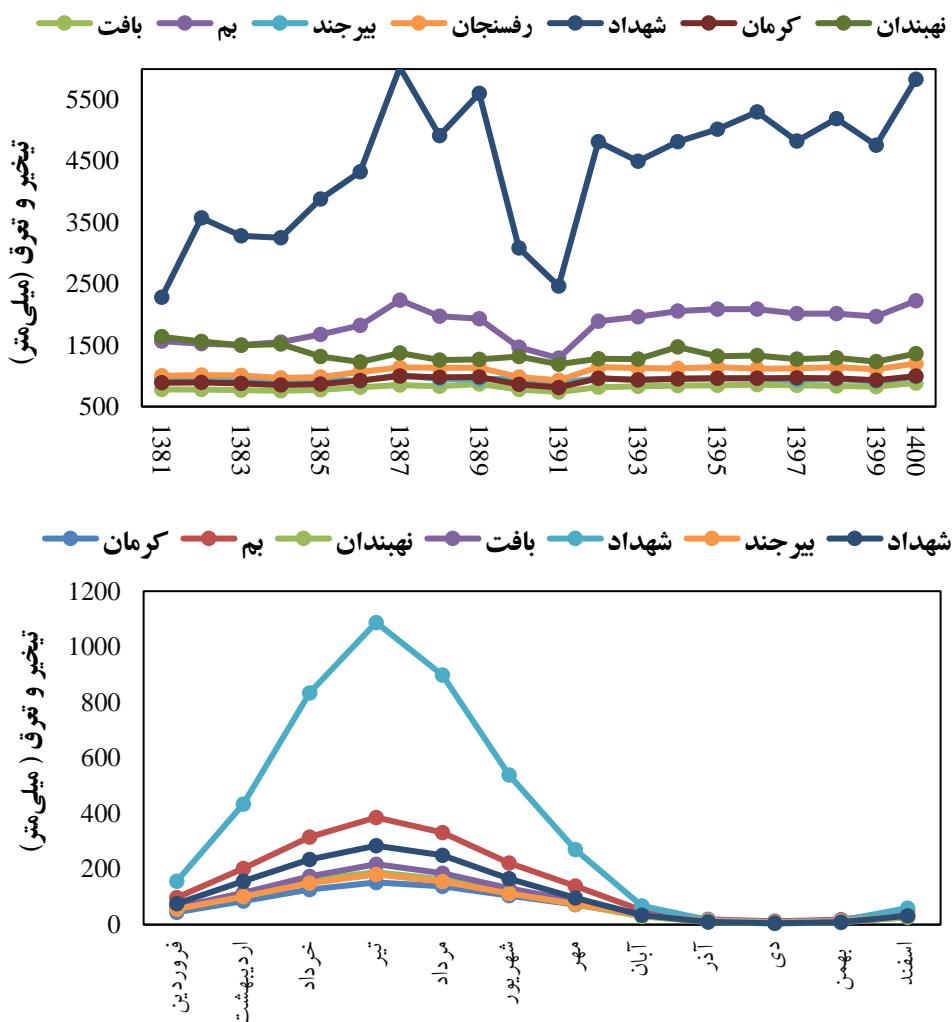


شکل ۳: تغییرات بلندمدت درجه حرارت سالانه (بالا) و ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت

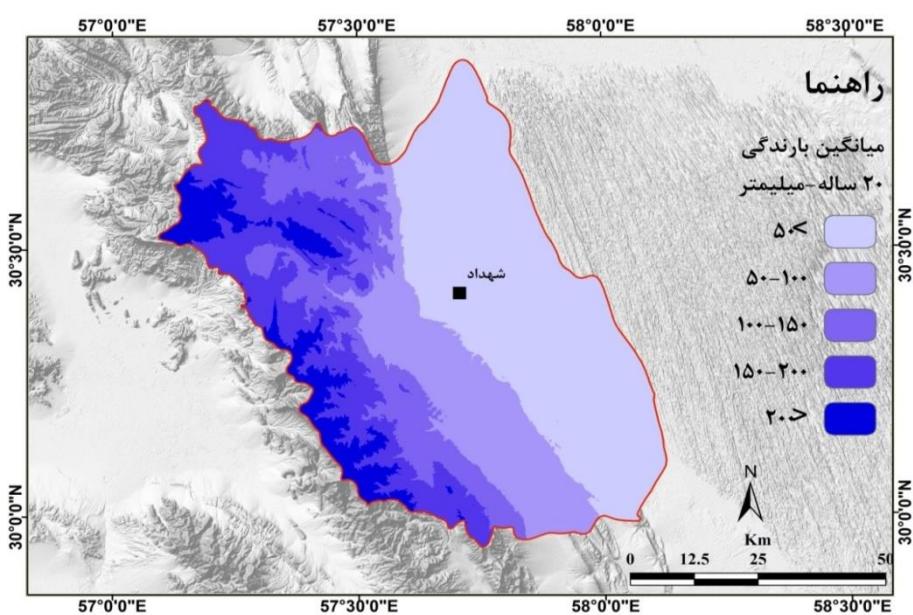


شکل ۴: تغییرات بلندمدت سرعت باد غالب سالانه (بالا) و ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت

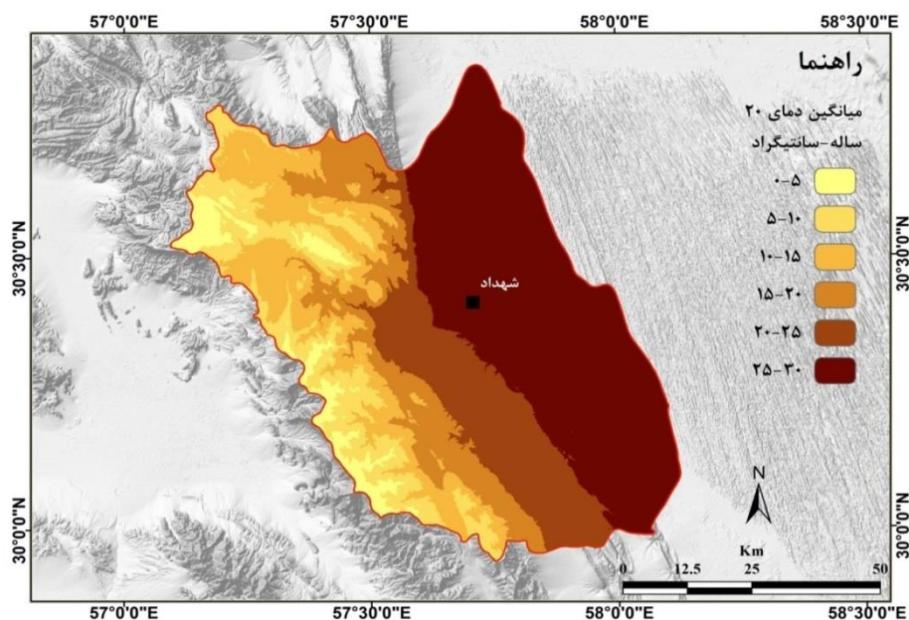
نتایج حاصل از تحلیل تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت برای دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۰ حاکی از آن است که در تیر هم‌زمان با اوج رخدادهای دمایی و کاهش بارندگی، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل بیشترین مقدار را نسبت به سایر ماههای سال دارد. بیشترین میانگین تبخیر و تعرق ماهانه و سالانه به ترتیب برابر با 10.87 ± 6.026 میلی‌متر در تیر و برابر با 3.9 ± 0.26 میلی‌متر در سال ۱۳۸۷ مربوط به ایستگاه شهداد نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است (شکل ۵). در نهایت با استفاده از دوره آماری ۲۰ ساله نقشه‌های هم‌بارندگی و هم‌دما (شکل‌های ۶ و ۷) مشخص شد که ایستگاه‌های منتهی به بیابان لوت با کاهش میزان بارندگی و افزایش دما روبرو هستند و در سمت غربی منطقه مطالعاتی (ایستگاه باغ) افزایش بارندگی و کاهش دما وجود دارد.



شکل ۵: تغییرات بلندمدت تبخیر و تفرق پتانسیل سالانه (بالا) و ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت



شکل ۶: نقشه هم‌بارندگی (میلی‌متر) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت



شکل ۷: نقشه هم‌دماهی ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت

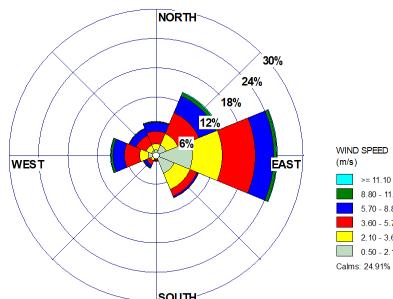
۴-۲- محاسبه سرعت و جهت باد

درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانه فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین با سرعت شش متر بر ثانیه (Zangenehtabar et al, 2021) در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب ییابان لوت (جدول ۳) نشان داد که پدیده گردوغبار در ایستگاه بافت نسبت به سایر ایستگاه‌ها به دلیل بالاتر بودن بادهای فرساینده نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشتر است و ایستگاه نهیندان بیشترین فراوانی بادهای آرام را در منطقه دارد. درصد فراوانی وقوع بادهای با سرعت‌های مختلف، در هر ایستگاه متفاوت بوده که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از شرایط جغرافیایی، ریخت‌شناختی و بادناکی هر منطقه باشد.

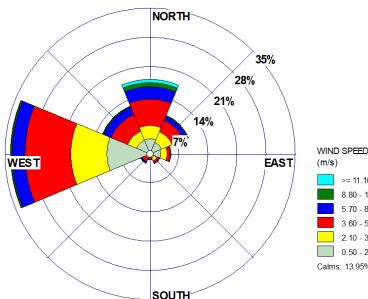
سرعت باد (بیشتر از ۵/۰ متر بر ثانیه) در شش کلاس و جهت گلبداهای سالانه هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه در هشت کلاس تهیه شد. با توجه به گلبد سالانه به ترتیب در ایستگاه‌های بافت، بم، بیرجند، کرمان، نهیندان، رفسنجان و شهداد مشاهده می‌شود که ۳۲/۲۳، ۱۳/۹۵، ۲۴/۹۱، ۲۲/۳۵، ۴۲/۱۷ و ۲۴/۷۷ درصد از کل ساعت دیده‌بانی سالانه، هوا آرام و بدون جهت می‌وزد. جهت غالب وزش بادها در ایستگاه بافت شمال و غرب، کرمان، نهیندان و شهداد شمالی، ایستگاه بم غربی، ایستگاه بیرجند شرقی و ایستگاه رفسنجان جنوب غربی است (شکل ۸).

جدول ۳: درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانه فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

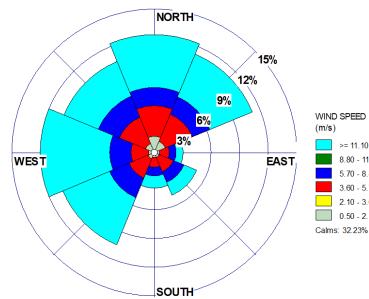
نام ایستگاه	بافت	بم	بیرجند	رفسنجان	شهداد	کرمان	نهیندان
نام ایستگاه	بافت	بم	بیرجند	رفسنجان	شهداد	کرمان	نهیندان
درصد باد آرام	۴۳/۷	۸/۲	۱۰/۲	۱۴/۲	۱۳/۷	۸	۱۰
۳۲/۳	۲۴	۶۴/۵	۶۴/۹	۶۲/۳	۶۱/۵	۶۸/۶	۷۸/۵
۲۷/۳							
۲۴/۹							
۲۳/۵							
۸/۲۴							
۲۳/۴							
۴۱/۶							



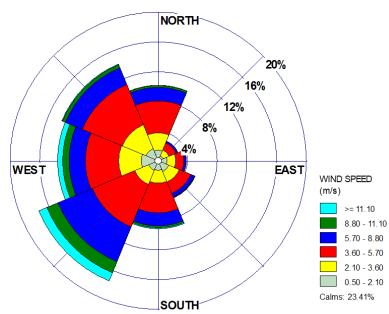
گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک بیرجند



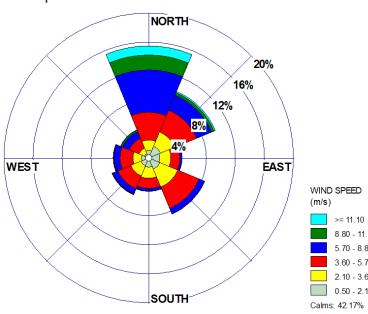
گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک بم



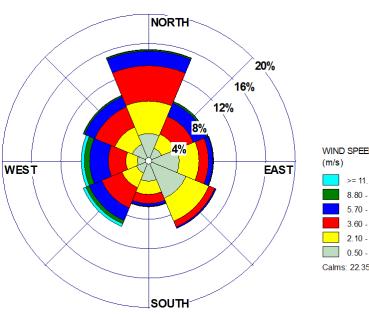
گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک بافت



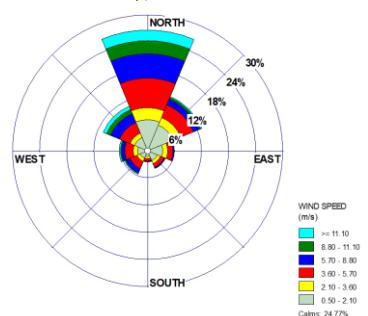
گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک رفسنجان



گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک نهبدان



گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک کرمان

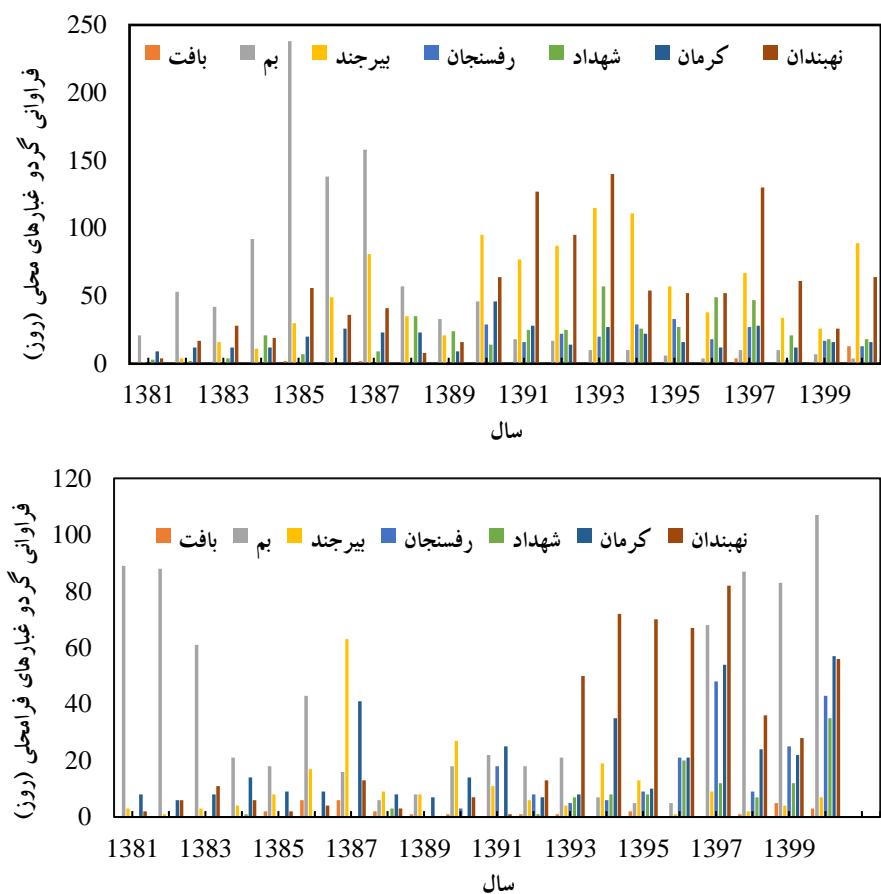


گلbad سالانه ایستگاه سینوپتیک شهرد

شکل ۸: گلbad سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۰ ساله

۴-۳- محاسبه فراوانی تعداد روزهای گرد و غبار

فراوانی تعداد روزهای گرد و غبار با استفاده از کدهای محلی و فرامحلی ایستگاه‌های بیابان لوت در مقیاس سالانه استخراج شد. بیشترین فراوانی بادهای محلی مربوط به ایستگاه نهبدان با ۱۰۹۰ روز و کمترین فراوانی مربوط به ایستگاه بافت با ۲۳ روز است. همچنین بیشترین فراوانی بادهای فرامحلی مربوط به ایستگاه بم با ۷۹۱ روز و کمترین مربوط به ایستگاه بافت با ۳۱ روز است (شکل ۹).



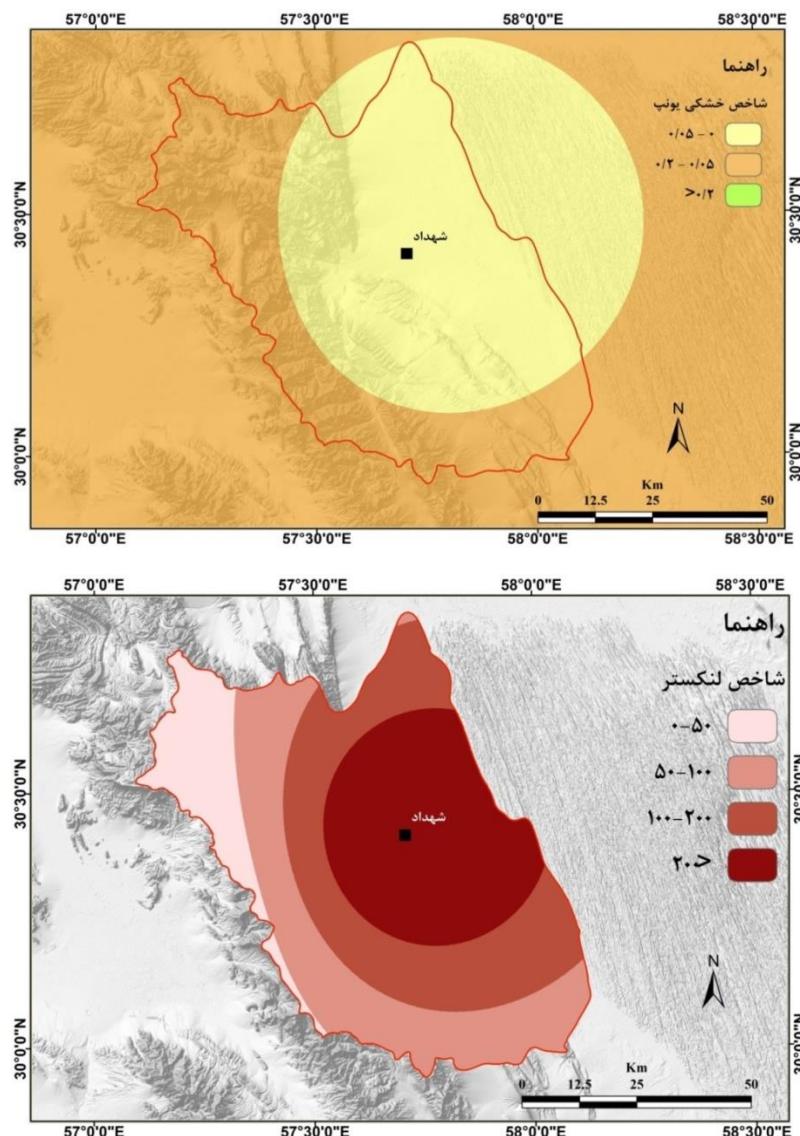
شکل ۹: تغییرات بلندمدت تعداد فراوانی گرد و غبار سالانه محلی (بالا) و فرامحلی (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت

۴-۴- محاسبه میزان تحرک تپه‌های ماسه‌ای

متوسط شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ای (شاخص لنکستر) ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت در دوره آماری ۲۰ ساله (جدول ۴) نشان داد که ایستگاه شهداد با بیشترین شاخص لنکستر، میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای کاملاً فعال و در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز فعال بوده اما در ایستگاه بم غیرفعال است. محاسبه شاخص خشکی ایستگاه‌ها نشان داد که شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه بهدلیل فعل بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی در ایستگاه‌های واقع در مناطق هموار و دشت دارای شرایط خشک، فراخشک و نیمه‌خشک است و این بدان معناست که ایستگاه شهداد از نظر خطر بیابان‌زایی تبدیل به بیابان واقعی شده است. هم‌چنین، ایستگاه بافت در معرض خطر بیابان‌زایی شدید و پنج ایستگاه در معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید قرار دارند. بر این اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان تحرک پذیری ماسه در کل بیابان لوت افزوده شده و خطر بیابان‌زایی در منطقه تشید می‌شود. این مسئله در تطابق با شاخص لنکستر و پتانسیل تحرک‌پذیری ماسه در این منطقه است (شکل ۱۰).

جدول ۴: شاخص لنكستر و داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت

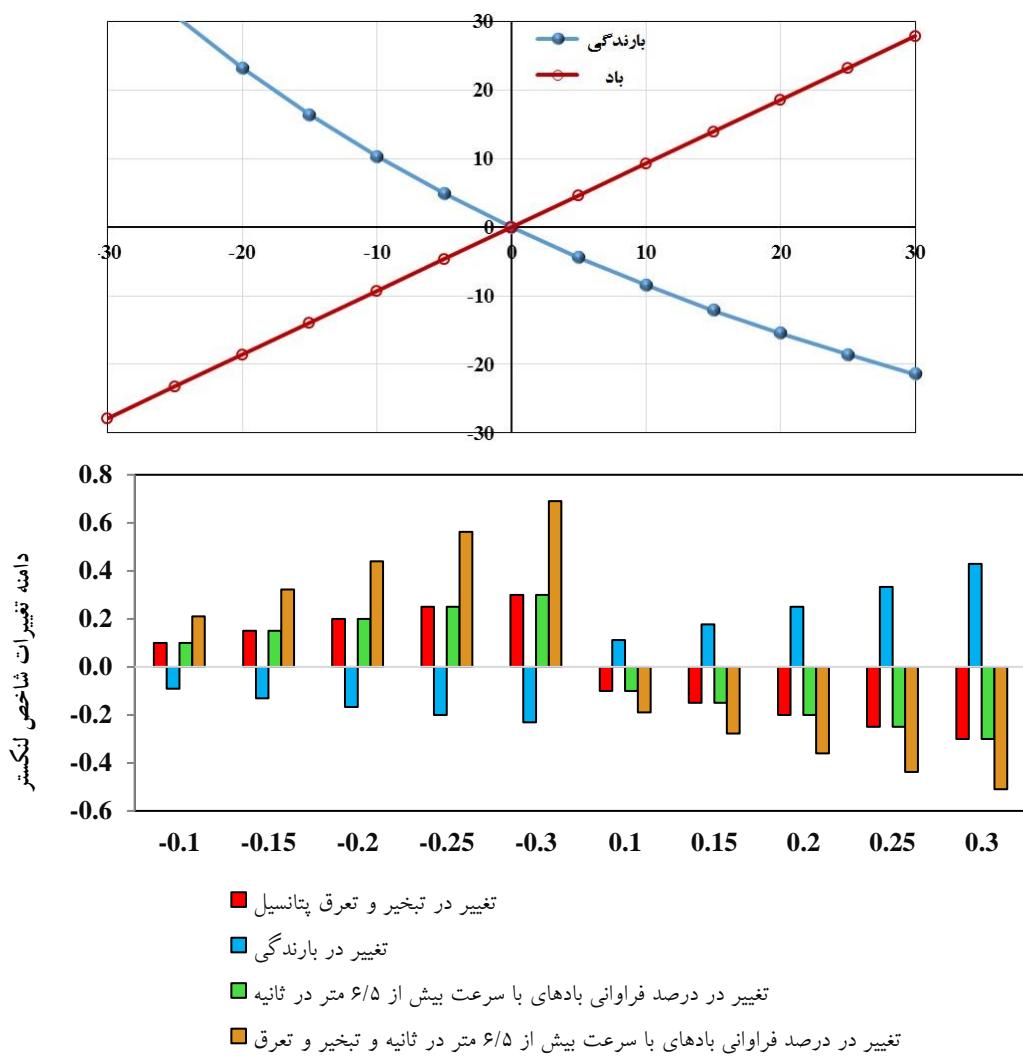
نام ایستگاه	خط طولی	خط عرضی	شاخص خشکی	شاخص لنكستر	فعالیت تپه‌های ماسه‌ای	اقلیم (شاخص خشکی)	بارندگی پتانسیل مؤثر	تبییر و تعرق	درصد باد فرساینده	پیش‌بینی
بیابان زایی	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	فعال	۱۴۷	۰/۲	۸۱۶	۲۴۲	۴۳/۷۳	بافت	
بسیار شدید	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۳'۰"N	خشک	۴۸	۰/۱۷	۱۸۴۲	۳۱۵	۸/۱۸	بم	
بسیار شدید	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	خشک	۷۱	۰/۱۴	۹۴۵	۱۳۶	۱۰/۱۶	بیرجند	
بسیار شدید	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	خشک	۲۱۴	۰/۰۷	۱۰۷۹	۷۱	۱۴/۱۵	رفسنجان	
بیابان واقعی	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	فراحشک	۲۰۲۷	۰/۰۱	۴۳۸۷	۳۰	۱۳/۷۴	شهداد	
بسیار شدید	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	خشک	۶۷	۰/۱۲	۹۲۸	۱۱۱	۷/۹۷	کرمان	
بسیار شدید	۵۷°۰'۰"E	۳۰°۰'۰"N	فعال	۱۳۷	۰/۰۷	۱۳۵۱	۹۸	۱۰	نهیندان	



شکل ۱۰: تغییرات شاخص‌های خشکی یونپ (بالا) و لنكستر (پایین) در ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت

۴-۵- پیش‌بینی تغییرات احتمالی عوامل اقلیمی مؤثر بر تحرک پذیری ماسه‌های روان (تحلیل حساسیت)

نتایج حاصل از آزمون تحلیل حساسیت (شکل ۱۱) نشان داد شاخص تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات باد دارای رابطه مثبت و نسبت به تغییرات ناشی از بارندگی دارای رابطه منفی است. به عبارتی با افزایش 30° درصدی سرعت بادهای فرساینده در ایستگاه، شاخص تحرک پذیری ماسه حدود 30° درصد افزایش و با کاهش 30° درصدی سرعت باد، شاخص تحرک پذیری ماسه حدود 30° درصد کاهش می‌یابد. چنان‌چه مقدار میانگین بارندگی به مقدار 30° درصد افزایش یابد، شاخص لنکستر کاهش 23° درصدی را نشان می‌دهد. بر عکس آن، اگر میزان بارندگی 30° درصد کاهش یابد، شاخص لنکستر افزایش 43° درصدی را نشان می‌دهد. حساسیت تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات افزایش ناشی از بارندگی بیش‌تر از سرعت باد بوده است. این امر اشاره به نقش مؤثر بارندگی در منطقه مورد مطالعه در ایجاد پوشش گیاهی، افزایش رطوبت خاک و در نهایت کاهش فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای دارد.



شکل ۱۱: تحلیل حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات بارندگی و بادهای بیش‌تر از سرعت آستانه فرسایش (بالا) و دامنه تغییرات شاخص لنکستر (پایین) در ایستگاه سینوپتیک شهداد

شاخص تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق دارای رابطه مثبت بوده و چنان‌چه در آینده درصد تبخیر و تعرق در ایستگاه سینوپتیک شهداد، ۳۰ درصد افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت. بر عکس آن نیز اگر میزان تبخیر و تعرق ۳۰ درصد کاهش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. با افزایش ۳۰ درصدی تبخیر و تعرق و سرعت بادهای فرساینده، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای تا ۷۰ درصد افزایش یافته و با کاهش ۳۰ درصدی این دو شاخص هواشناسی فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۵ درصد کاهش می‌یابد که تاثیر این دو مؤلفه در زمان افزایش بیش از کاهش است (شکل ۱۱).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

تپه‌های ماسه‌ای یکی از مهم‌ترین شکل‌های زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که میزان تحرک آنها بسته به عوامل اقلیمی به‌ویژه سرعت و فراوانی بادهای فرساینده، بارندگی و میزان تبخیر و تعرق متغیر است. همواره فعالیت این تپه‌ها مشکلات فراوانی را برای مردم محلی ایجاد کرده است. لذا پایش عوامل اقلیمی به همراه تحلیل رویدادهای گردوغبار می‌تواند گامی مثبت در راستای شناخت عوامل مؤثر بر فعالیت آنها و پیش‌بینی وضعیت تحرک پذیری در آینده باشد. 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 توده ریگی ایران یعنی ریگ یلان است، زیر سلطه بادهای ۱۲۰ روزه است که اهمیت بررسی بادها و نقش شکل‌زاوی آن را در فصل وزش این بادها دو چندان می‌کند (Zangenehtabar et al, 2021).

نتایج این پژوهش نشان داد که در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۸۱-۱۴۰۰) تغییرات سرعت باد در ایستگاه شهداد زیاد و در ایستگاه بافت کم و در مقیاس ماهانه بیشترین سرعت باد غالب در مرداد و در ایستگاه بافت بوده و کم‌ترین سرعت باد غالب در دی در ایستگاه کرمان مشاهده شده است. جهت باد غالب در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، شمالی است. هم‌چنین، درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانه فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ایستگاه بافت نسبت به سایر ایستگاه‌ها به‌دلیل بالاتر بودن بادهای فرساینده بیشتر به‌دست آمد. بیشترین تعداد فراوانی روزهای توأم با گرد و غبار در ایستگاه نهیندان با ۱۰۹۰ روز و کم‌ترین تعداد فراوانی روزهای توأم با گردوغبار در ایستگاه بافت با ۲۳ روز است. در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ عموماً منشا گردوغبار فرامحلی بوده است. اما از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ منشاء گردوغبار، محلی بوده است. از مهم‌ترین دلایل این موضوع می‌توان به تغییر کاربری اراضی، کاهش بارندگی، افزایش دما، سرعت باد و تبخیر و تعرق اشاره نمود. افزایش روند درجه حرارت موجب افزایش بادهای با سرعت بیشتر از آستانه فرسایش شده و باعث انتقال ذرات ماسه می‌شود و بستر مناسبی برای توزیع مکانی تپه‌های ماسه‌ای فراهم می‌نماید. هم‌چنین، براساس شاخص خشکی و شرایط اقلیمی حاکم در منطقه طی دوره آماری ۲۰ ساله به‌دلیل فعل بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی و فرامحلی عموماً دارای شرایط نیمه‌خشک، خشک و فراخشک بوده است. این بدان معناست که ۷۰ درصد محدوده مورد مطالعه از نظر اقلیمی در معرض خطر بیابان‌زاوی بسیار شدید، ۱۵ درصد آن در معرض خطر بیابان واقعی (ایستگاه شهداد) و ۱۵ درصد در معرض خطر بیابان‌زاوی شدید قرار دارد. بر این اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان

تحرک پذیری ماسه افزوده شده و خطر بیابانزایی را تشید می نماید با افزایش خطر بیابانزایی در منطقه فعالیت تپه های ماسه ای نیز افزایش یافته است.

محاسبه شاخص خشکی ایستگاهها نشان داد که شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه بدلیل فعل بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی دارای شرایط خشک و نیمه خشک در ایستگاههای واقع در مناطق هموار و دشت و دارای شرایط مرطوب و خشک نیمه مرطوب در ایستگاههای واقع در ارتفاعات است. این بدان معناست که تعداد یک ایستگاه در معرض خطر بیابانزایی شدید، پنج ایستگاه در معرض خطر بیابانزایی بسیار شدید و یک ایستگاه در معرض خطر بیابان واقعی قرار دارند.

با محاسبه شاخص لنکستر، میزان فعالیت بالقوه تپه های ماسه ای تعیین و مناطق فعل از غیرفعال تفکیک شده است. نتایج پنهان بندی این شاخص نشان داد که میزان فعالیت تپه های ماسه ای عمدتاً کاملاً فعل و فعل در نوک تپه ها بوده است. فقط در ایستگاه بم غیرفعال است که به جهت تثبیت و کاهش فعالیت گردوغبار و اقدامات مدیریتی از قبیل نهال کاری، جنگل کاری های دست کاشت بیابانی، قرق و مالچ پاشی در تپه های ماسه ای انجام شده است اما با توجه به فعالیت تپه ها در سایر ایستگاهها، این اقدامات کافی نبوده و نیازمند مدیریت و برنامه ریزی جدید است. همچنین وقوع پدیده گردوغبار به طرق مختلف از قبیل تشید بیماری ها و آفات محصولات کشاورزی و فضای سبز، بروز تصادفات به علت کاهش میدان دید، لغو پروازها، افزایش مراجعه بیماران در بخش های آلرژی، قلب، تنفسی و پوست به طور سالانه خسارات جدی به جامعه انسانی وارد می کند.

پیش بینی اثرات تغییر احتمالی دو سنجه بارندگی و باد بر تحرک پذیری ماسه در آینده با تحلیل حساسیت نشان داد که حساسیت تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات کاهش ناشی از بارندگی بیشتر از سرعت باد است و در نتیجه تغییرات افزایش ناشی از بارندگی کمتر از سرعت باد در بیابان لوت بوده است. همچنین شاخص تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق دارای رابطه مثبت است. با افزایش 30°C درصدی تبخیر و تعرق و سرعت بادهای فرساینده فعالیت و حرکت تپه های ماسه ای تا 70°C درصد افزایش یافته و با کاهش 30°C درصدی این دو شاخص هواشناسی فعالیت و حرکت تپه های ماسه ای 50°C درصد کاهش می باید که تاثیر این دو مؤلفه در زمان افزایش بیش از کاهش می باشد.

به طور کلی نتایج بررسی ارتباط میان شاخص تحرک ماسه و متغیرهای اقلیمی حاکم از آن است که بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بیشترین تأثیر را بر تحرک ماسه در منطقه مطالعاتی دارند. با توجه به افزایش تعداد روزهای گردوغبار که مشکلی برای محیط زیست منطقه محسوب می شود (Yarahmadi et al, 2015)، تغییر اقلیم از طریق بررسی و محاسبه تغییر متغیرهای اقلیمی (Ashkenazy et al, 2012) گزارش شده است. بررسی های پیشین در ارتباط با علل و پیامدهای تغییر ضرایب یا شاخص های اقلیمی در پهنه های آب و هوایی ایران نشان می دهد که تغییر ویژگی های آب و هوایی از جمله افزایش ضریب خشکی می تواند از جمله دلایل تخریب سرزمین و به تبع آن افزایش رخدادهای گردوغبار به شمار آید. نتایج پیش بینی بیان گر آن است که وضعیت تحرک رسوبات بادی ناشی از تپه ماسه ای در ایستگاه مطالعاتی نسبت به کاهش عوامل اقلیمی، در مقایسه با افزایش آنها، حساسیت بیشتری دارد که با نتایج (Naeimi et al (2021) و Hanifepour et al (2022) مطابقت دارد. نتایج پژوهش حاضر می تواند در راستای

پیش‌بینی وضعیت آینده تپه‌های ماسه‌ای و تعیین اقدامات مدیریتی مناسب برای کنترل و کاهش خسارت احتمالی به سایر کاربری‌های موجود در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. Abbasi, H. R., Opp, Ch., Groll, M., & Gohardoust, A. (2019). Wind regime and sand transport in the Sistan and Registan regions (Iran/Afghanistan). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 62(1), 41-57. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2019/0543
2. Abbasnejad, A., & Zahab Nouri, S. (2012). Identifying the forms of wind erosion of Rafsanjan plain. *Quantitative Geomorphologic Research*. 1(2), 127-144. [https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1391.1.2.8.2 \(in Persian\)](https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1391.1.2.8.2)
3. Ahmadi, H. (2012). *Applied geomorphology*. Tehran University Publications. (in Persian)
4. Ahmadi Birgani, H. (2008). Simulating the movement of a sand dune using experimental and numerical methods (Case Study: Kashan Long Rig Citadel). *M.Sc. Thesis in Natural Resources Engineering-Desertification*, Department of Natural Resources, University of Tehran, 91 p. (in Persian)
5. Akbarpour Bonab, B., Hanifehpour, M., Biabani, L., & Khosravi, H. (2022). Characteristics of wind regime and sand transport potential in coastal hills (Case Study: Jask). *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research*. 12(3), 211-230 [http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-719-fa.html. \(in Persian\)](http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-719-fa.html)
6. Al-Soud, MS., & Al-Shakarchi, Y.J. (2020). Stabilization of Baiji sand dunes by petroleum residues. *Materials Science and Engineering*, 870, 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012081>
7. Amin, A., & Seif, E.S.S.A. (2019). Environmental hazards of sand dunes, South Jeddah, Saudi Arabia: An assessment and mitigation geotechnical study. *Earth Systems and Environment*, 3(2), pp.173-188. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00100-5>
8. Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., & Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. *Climatic Change*, 112(3), 1-23, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0264-9>
9. Bagnold, R. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Methuen.
10. Belsky, A.J., & Amundson, R.G. (1986). Sixty years of successional history behind a moving sand dune near Olduvai Gorge, Tanzania. *Biotropica*, 18(3), 231-235. <https://doi.org/10.2307/2388490>
11. Besler, H., Lancaster, N., Bristow, C., Henschel, J., Livingstone, I., Seely, M., & White, K. (2013). Helga's dune: 40 years of dune dynamics in the Namib Desert. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 95, 361–368, <https://doi.org/10.1111/geoa.12013>
12. Ding, C., Feng, G., Liao, M., & Zhang, L. (2020). Change detection, risk assessment and mass balance of mobile dune fields near Dunhuang Oasis with optical imagery and global terrain datasets. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1604-1623. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1767222>
13. Ehsani, A. H., & Quiel, F. (2008). Application of self organizing map and SRTM data to characterize yardangs in the Lut desert, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3284–3294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.007>
14. Ekhtesasi, M.R. (2004). Morphometric and morphodynamic study of wind erosion facies in Yazd Plain. *Ph.D. Thesis*, Tehran University (in Persian)
15. Jewell, P.W., & Nicoll, K. (2011). Wind regimes and aeolian transport in the Great Basin, U.S.A. *Geomorphology*, 129, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.005>

16. Hamdan, M.A., Refaat, A.A., & Abdel Wahed, M. (2016). Morphologic characteristics and migration rate assessment of Barchans dunes in the Southeastern Western Desert of Egypt. *Geomorphology*, 257, 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.026>
17. Hanifepour, M., Biabani, L., Khosravi, H., & Akbarpoor Bonab, B. (2022). Monitoring and forecasting of climatic factors affecting the mobility of sand dunes using Lancaster index (Case study: Sirjan desert), *Arid Regions Geographic Studies*, 13(48), 1-20. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373929.0> (in Persian).
18. Harrison, S.P., Kohfeld, K.E., Roelandt, C., & Claquin, T. (2001). The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future. *Earth-Science Reviews*, 54(1-3), 43-80. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00041-1)
19. Iranmanesh, H., Keshavarz, M., & Abdollahzade, M. (2016). Predicting dust storm occurrences with local linear neuro fuzzy model: a case study in Ahvaz City, Iran. *International Conference on Soft Computing-MENDEL*; p. 158–167.
20. Karimi, N. (2021). Monitoring the movement of windy sand dunes of Rige Yalan in the Loot desert using SAR satellite images. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(83), 341-356. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.124170> (in Persian)
21. Lamqadem, A.A., Pradhan, B., Saber, H., & Rahimi, A. (2018). Desertification sensitivity analysis using MEDALUS model and GIS: a case study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco. *Sensors*, 18(7), 2230. <https://doi.org/10.3390/s18072230>
22. Lam, D.K., Remmel, T.K., & Drezner, T.D. (2011). Tracking desertification in California using remote sensing: A sand dune encroachment approach. *Remote Sensing*, 3(1), pp.1-13. <https://doi.org/10.3390/rs3010001>
23. Lancaster, N. (1988). Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 14, 233–244. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)31070-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)31070-X)
24. Lancaster, N. (2013). Climate change and aeolian processes. Desert Research Institute, Reno, NV, USA, 13, 132-151.
25. Livingstone, I. (2003). A twenty-one-year record of surface change on a Namib linear dune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 1025–1031, <https://doi.org/10.1002/esp.1000>
26. Maghsoudi, M., Mohammadi, A., Khanbabaei, Z., Mehboubi, S., Baharond, M., & Hajizadeh, A. (2017). Reg movement monitoring and Barchans in West of Lot region (Pashoeyeh). *Quantitative Geomorphologic Research*, 5(20), 176-189 (in Persian)
27. Masoudi, M., Jokar, P., & Pradhan, B. (2018). A new approach for land degradation and desertification assessment using geospatial techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1133–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1133-2018>
28. Muhs, D.R., & Maat, P.B. (1993). The potential response of eolian sands to greenhouse warming and precipitation reduction on the Great Plains of the USA. *Journal of Arid Environments*, 25, 905–918. <https://doi.org/10.1006/jare.1993.1068>
29. Naeimi, M., Zandifar, S., Khosroshahi, M., Ashouri, P., & Abbasi, H. R. (2021). Investigating the effects of climate change on the mobility of sand dunes (Case study: Sabzevar City), *Desert Management*, 9(2), 1-18. <https://doi.org/10.22034/jdml.2021.246296> (in Persian)
30. Naeimi, M., Khosroshahi, M., Abbasi, H.R., & Zandifar, S. (2022). Analysis of dust phenomenon using sand dune mobility indices and predicting it with sensitivity analysis in Northeast Border of Iran. *Watershed Management Research Journal*, 35(3), 81-95. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2022.356732.1450> (in Persian)
31. Nazari Samani, A.A., Biabani, L., Abbasi, H.R., & Khosravi, H. (2018). Effects of wind erosivity and sand drift on the littoral area of Urmia Lake and sand mobility. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(3), 594-612. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.117812> (in Persian)

32. Rahdari, M.R., & Rodríguez-Seijo, A. (2021). Monitoring sand drift potential and sand dune mobility over the last three decades (Khartouran Erg, Sabzevar, NE Iran). *Sustainability*, 2021, 13, 9050. <https://doi.org/10.3390/su13169050>
33. Rahi, Gh.R., Bahreini F., Khosroshahi, M., & Biabani, L. (2022). Monitoring and predicting the effect of climatic factors on sand-mobility using Lancaster Index: A Case Study of Dayer, Bushehr Province. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11(36), 41-54. [https://doi.org/10.22052/DEEJ.2021.11.36.41 \(in Persian\)](https://doi.org/10.22052/DEEJ.2021.11.36.41).
34. Shahriar, A., Mazidi, A., Sharifi Pichoun, M., & Zare, F. (2023). Identification of the origin and route of sand transfer to the area of sand dunes of Yazd Darvazeh Quran. *Geography and Environmental Sustainability*, 13(3), 29-45. [https://doi.org/10.22126/ges.2023.9063.2652 \(in Persian\)](https://doi.org/10.22126/ges.2023.9063.2652).
- Tsoar, H. (2001). Types of aeolian sand dunes and their formation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; LNP 582, 403–429. https://doi.org/10.1007/3-540-45670-8_17
36. Walker, R.A., & Cronon, W. (2009). *The country in the city: the greening of the San Francisco Bay Area*. Washington, DC: University of Washington Press.
37. Wang, T., Chen, G., Zhao, H., & Xiao, H. (2022). *Aeolian desertification status and its control in China*. In: Global Degradation of Soil and Water Resources. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2_15
38. Zandifar, S., Khosroshahi, M., Ebrahimikhusfi, Z., & Naeimi, M. (2020). Predicting mobility of sands in the future based on sensitivity analysis test (Case study: Manjil City). *Arid Regions Geographic Studies*, 10(39), 18-35 (in Persian).
39. Zangenehtabar, S., Maghsoudi, M., Menbari, F., & Hoseini, M. (2021). Analysis of wind erosion and transport potential of quick sands located in the territory of Lut desert. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research*, 11(1), 1-19. [http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-602-fa.html \(in Persian\)](http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-602-fa.html)
40. Zehtabian, G.R., Khosravi, H., & Masoudi, R. (2014). *Desertification evaluation models (criteria and indicators)*. Tehran University Press (in Persian)
41. Zhang, G., Azorin-Molina, C., Shi, P., Lin, D., Guijarro, J. A., Kong, F., & Chen, D. (2019). Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the Eastern Agro-Pastoral Transitional Zone of Northern China, 1982–2016. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 102-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039>
42. Zhang, W., Qu, J., Tan, L., Jing, Z., Bian, K., & Niu, Q. (2016). Environmental dynamics of a star dune. *Geomorphology*, 273, 28–38, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.005>
43. Yarahmadi, D., Nasiri, B., Khoshkish, A., & Nikbakht, H. (2015). Climatic fluctuations and dusty days in the west and southwest of Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 3(5), 19-28. [https://doi.org/10.22052/DEEJ.2018.7.21.11 \(in Persian\)](https://doi.org/10.22052/DEEJ.2018.7.21.11)
44. Yasien Al-Guraiy, A. S., & Al-Zubaidi, A. H. A. (2023). Climate change and its impact on the expansion of the phenomenon of sand dunes and desertification of agricultural Lands in Iraq for the period 1984- 2022 (Governorates of Al-Qadisiyah, Al-Muthanna, and Dhi Qar). *Engineering*, 7(1), 75-96. <https://doi.org/10.52865/YJPI8019>