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

[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 texted 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**

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

تحلیل اثرات عناصر اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های بادی غرب بیابان لوت

زینب حزباوی*: *دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*
مهین حنیفه‌پور: *دکتری مهندسی منابع طبیعی- بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران*
لیلا بیابانی: *دانشجوی دکتری مهندسی منابع طبیعی- بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران*
بهروز اکبرپور بناب: *کارشناس هیدرو اقلیم، مهندسین مشاور آبخوان، تهران*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ 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 تشدید بحران‌های محیط زیستی در آینده انجام شد. بدین‌ترتیب، ابتدا از داده‌های ساعتی سرعت باد، کد پدیده‌های گردوغبار، بارندگی و درجهٔ حرارت هفت ایستگاه سینوپتیک در دورهٔ 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، تبخیروتعرق پرداخته شد. در ادامه، وضعیت فعالیت تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر تعیین شد و حساسیت تحرک‌پذیری ماسه‌های روان نسبت به تغییرات عوامل اقلیمی مؤثر بر آن مورد تحلیل قرار گرفت. در پایان پهنه‌بندی 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 تبخیروتعرق روبه‌رو هستند. بیش‌ترین فراوانی بادهای محلی و فرامحلی به‌ترتیب مربوط به ایستگاه نهبندان با ۱۰۹۰ روز و ایستگاه بم با ۷۹۱ روز و کم‌ترین فراوانی بادهای محلی و فرامحلی به‌ترتیب 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 به‌دست 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 آستانهٔ فرسایش، 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 تحرک‌پذیری ماسه‌های روان نسبت به تغییرات افزایش ناشی از بارندگی بیش‌تر از سرعت باد است.

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

* **نویسندهٔ مسئول:** z.hazbavi@uma.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

۱ـ مقدمه

تپه‌های ماسه‌ای در قلمرو فرآیند بادی از پویاترین عارضه‌های ژئومورفیک سطح زمین به شمار می‌روند که از یک‌سو 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 درجهٔ حرارت به‌طور 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). زمانی‌که 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 اندازهٔ ماسه پس از انتقال توسط باد به‌صورت تپه‌های ماسه‌ای با شکل و اندازه‌های مختلف جمع می‌شوند. شکل و اندازهٔ تپه‌ها نیز منعکس‌کنندهٔ ویژگی‌های رسوب (در درجهٔ اول اندازهٔ دانه) و رژیم باد سطحی (تغییر جهت باد) است (Tsoar, 2001).

تقریباً ۷۷ درصد از کل کره 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). به‌طوری‌که حرکت تپه‌های ماسه‌ای به‌عنوان یکی از عوامل بیابان‌زایی به‌شمار 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). گاهی‌اوقات، تپه‌های ماسه‌ای تهدیدی برای شهرهای پرجمعیت، روستاها، 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 به‌طور 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 قابل‌توجهی برای زیرساخت‌های حمل‌ونقل، 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 گوگل‌ارث در بازه‌های زمانی مختلف جابه‌جایی تپه‌های

* نویسندهٔ مسئول: z.hazbavi@uma.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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 به‌عمل‌آمده میزان حرکت بارخان دوم ۹۶ متر و بارخان اول ۱۳۵ متر برآورد شد. سپس، Masoudi et al. (2018) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بادسنجی و تصاویر ماهواره‌ای، الگوی گسترش و توسعهٔ 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. عمدهٔ جابه‌جایی‌ها در سطح ریگ از این روند پیروی کرده و متوسط جابه‌جایی در سطح تپه‌ها، هشت متر در سال ارزیابی شده است.

Nazari Samani et al. (2018) به بررسی نقش فرسایندگی باد و حمل ماسه بر تحرک‌پذیری ماسه در حاشیه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص لنکستر، هشت ایستگاه منتخب منطقه دارای شاخص تحرک‌پذیری کم‌تر از ۱ بوده که این موضوع نشان‌دهندهٔ غیرفعال بودن تپه‌های ماسه‌ای و حالت تراکمی آن‌هاست. هم‌چنین، Abbasi et al. (2019) 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 بازهٔ زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ شبیه‌سازی کردند. در ادامه، Zandifa et al. (2020) به بررسی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر آن در منطقه بویین زهرا طی دورهٔ آماری ۱۳۹۵-۱۳۸۵پرداختند. تحلیل حساسیت نشان داد که هر چه مقدار سرعت باد و تبخیروتعرق به‌دلیل 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 مجدداً آغاز خواهد شد.

نتایج مطالعه Karimi (2021) درخصوص پایش جابجایی تپه‌های ماسه‌ای بادی ریگ یلان در بیابان لوت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری نشان داد که مقدار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ یلان از صفر در مناطق خاکی و رسوبی غیر متحرک تا حداکثر سه متر در سال در هرم‌های ماسه‌ای بزرگ منطقه که عمدتاً در مرکز، غرب و جنوب ریگ متمرکز هستند، متغیر بوده 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 به‌مدت 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 تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با دو شاخص لنکستر و لنکستر اصلاح‌شده ارتباط معنی‌داری در تراز ۹۹ درصد با روزهای گردوغبار دارد. لذا با افزایش خشکی محیط در منطقه بر اندازهٔ تحرک‌پذیری 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 ماسه‌آور نیز

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

عمدتاً شمال¬غربی است. از سوی دیگر توانایی دبی ماسه بر اساس میانگین قابلیت حمل ماسه (DP=257 v.u) 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 به‌صورت فعال فقط در نوک تپه مشخص کرده است. بر اساس تحلیل حساسیت مشخص شد که در صورت افزایش ۳۰ درصد فراوانی بادهای فرساینده و تبخیروتعرق 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 تحرک‌پذیری 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 آستانهٔ فرسایش در منطقه دیر ۳۰ درصد افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت، درحالی‌که 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 محدودهٔ 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 پدیدهٔ تپه‌های ماسه‌ای طی دورهٔ آماری ۲۰۲۲-۱۹۸۴، تغییرات اقلیمی و همراه با کمبود بارندگی و افزایش مداوم میانگین درجهٔ حرارت سالانه منطقه بوده است.

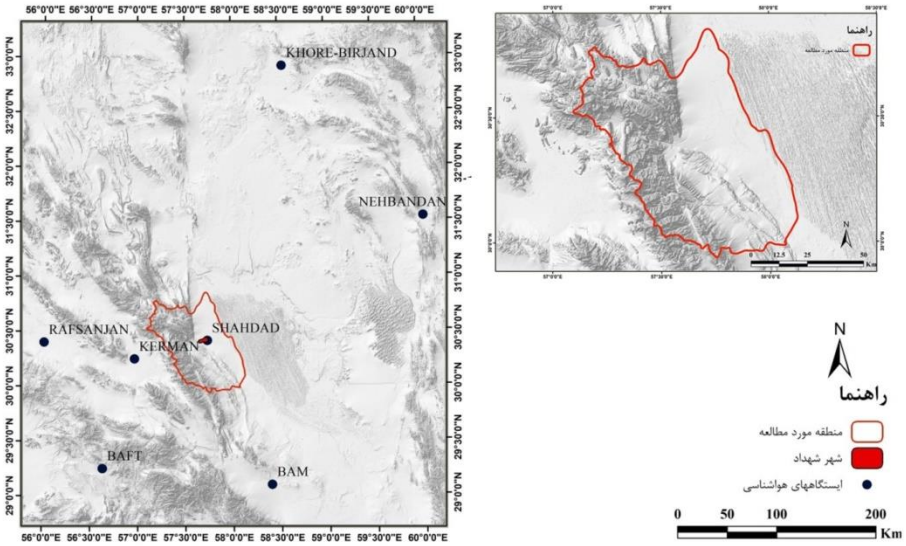
پدیدهٔ گرد و غبار و حرکت ماسه‌های روان به‌عنوان یکی از فرآیندهای مهم بیابان‌زایی و تخریب اراضی در ایران به شمار می‌آید و عوامل اقلیمی نیز در این پدیده نقش به‌سزایی دارند. بنابراین، بررسی و شناخت این عوامل و تأثیر آن‌ها بر ایجاد و تشدید پدیدهٔ گردوغبار و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای به‌ویژه در فلات ایران به‌دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک نیم‌کره 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 پدیدهٔ گردوغبار 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 پدیدهٔ گردوغبار، تعیین رژیم بادی منطقه و نیز شرایط اقلیمی و تأثیر آن بر میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و در نهایت، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان در آینده با استفاده از شاخص لنکستر با در نظر گرفتن شرایط گذشته برنامه‌ریزی شد.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

این پژوهش در غرب بیابان لوت و در منطقه شهداد که در طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۵۸ دقیقه 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 درجهٔ حرارت بین ۱۱ تا ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد است و طبق بعضی پژوهش‌ها، این منطقه به‌عنوان گرم‌ترین نقطه کرهٔ زمین شناخته شده است (Ehsani & Quiel, 2008). منطقه از لحاظ زمین‌ریخت‌شناسی در واحد بزرگ پلایای زمین‌ساخت لوت واقع شده است. منطقه در

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

محیط حمل فرسایش بادی قرار دارد که منجر به رسوب‌گذاری رسوبات بادی در پای گیاهان هالوفیت و زروفیت منطقه شده و رخسارهٔ حمل برگرفته از نبکا و ربدو را نمایان ساخته است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

۳ـ مواد و روش

۳ـ۱ـ جمع‌آوری آمار بلندمدت عناصر اقلیمی در ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف بیابان لوت

جهت انجام پژوهش حاضر از مقادیر متوسط ماهانه عناصر اقلیمی شامل دما، بارندگی، داده‌های ساعتی مربوط به میدان دید افقی، سرعت و جهت باد و کد پدیده‌های مختلف گردوغبار استفاده شد. این داده‌ها از سازمان هواشناسی مربوط به هفت ایستگاه سینوپتیک (جدول ۱) که دارای آمار ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰) هستند، دریافت شدند.

فراوانی هر یک از کدهای مربوط بـه طوفان‌های گردوغبار (۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۰۹) و کدهای مربوط به پدیدهٔ گردوغبار (۰۶ و ۰۷) در هر یک از ایستگاه‌های منتخب محاسبه شد. با توجه به تعداد برداشت و ثبت اطلاعات هشت بار در روز در ایستگاه‌های سینوپتیک، شمارش تعداد پدیده‌ها و روزهای گردوغبار در ایستگاه‌های محدودهٔ مطالعاتی صورت گرفت. سپس مجموع فراوانی تعداد روزهای گرد و غبار برای دورهٔ آماری مورد مطالعه تعیین شد.

جدول ۱: موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

نام ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض
کرمان	۱۷۵۴	۵۶ ° ۵۸ ´ ۰/۴۷۵ ˝E	۳۰ ° ۱۵ ´ ۰/۴۳۹ ˝N
بم	۱۰۶۷	۵۸ ° ۲۴ ´ ۰/۶۹۸ ˝E	۲۹ ° ۶ ´ ۰/۳۴۴ ˝N
نهبندان	۱۲۵۰	۶۰ ° ۲ ´ ۰/۹۷۳ ˝E	۳۱ ° ۳۲ ´ ۰/۵۲۰ ˝N
بافت	۲۲۵۰	۵۶ ° ۳۸ ´ ۰/۴۲۲ ˝E	۲۹ ° ۱۵ ´ ۰/۳۶۱ ˝N
رفسنجان	۱۴۶۹	۵۶ ° ۱ ´ ۰/۳۲۱ ˝E	۳۰ ° ۲۴ ´ ۰/۴۵۱ ˝N
بیرجند	۱۰۷۰	۵۸ ° ۳۳ ´ ۰/۷۴۴ ˝E	۳۲ ° ۵۵ ´ ۰/۶۵۲ ˝N
شهداد	۵۲۰	۵۷ ° ۴۴ ´ ۰/۵۹۷ ˝E	۳۰ ° ۲۵ ´ ۰/۴۴۵ ˝N

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

۳-۲- بررسی جهت باد

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

۳-۳- محاسبهٔ شاخص لنکستر و شاخص خشکی یونپ

شاخص لنکستر[1] جهت بررسی میزان تحرک‌پذیری ماسه‌های روان محاسبه شده است. این شاخص به‌طور گسترده توسط 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 عمده 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 آستانهٔ فرسایش محاسبه شده است. اگر درجهٔ بادخیزی (W) افزایش پیدا کند، بیش‌تر تپه‌های ماسه‌ای به‌صورت متحرک در می‌آیند. عامل دوم به رشد پوشش گیاهی هر منطقه بستگی دارد، به‌صورت نسبت بین متوسط بارندگی سالانه (P) و تبخیروتعرق 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.

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

$$M=W/(P/PE)=(W\times PE)/P$$ رابطهٔ ۱

در این رابطه، M میزان فعالیت رسوبات بادی مانند تپه‌های ماسه‌ای؛ W درصد فراوانی بادهای با سرعت بیش از سرعت آستانهٔ فرسایش برحسب متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، P میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر در سال و PE بیان‌گر تبخیروتعرق پتانسیل سالانه برحسب 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 رابطهٔ ۱، شاخص تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای (M) قابل طبقه‌بندی است. به‌طوری‌که، M کم‌تر از ۵۰ نشان‌دهندهٔ تپه‌های ماسه‌ای غیرفعال، M بین ۵۰-۱۰۰، نشان‌دهندهٔ فعال بودن تپه‌های ماسه‌ای فقط در نوک تپه، M بین ۱۰۰-۲۰۰، نشان‌دهندهٔ تپه‌های ماسه‌ای فعال و M بالاتر از ۲۰۰، نشان‌دهندهٔ تپه‌های ماسه‌ای کاملاً فعال 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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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

نوع اقلیم	شاخص خشکی (R)	خطر بیابان‌زایی
فراخشک	R <۰/۰۵	بیابان واقعی
خشک	۰/۰۵ <R< ۰/۲	بسیار شدید
نیمه‌خشک	۰/۲ <R< ۰/۵	شدید
خشک نیمه‌مرطوب	۰/۵ <R< ۰/۶۵	متوسط
نیمه‌مرطوب	۰/۶۵ <R< ۰/۷۵	کم
مرطوب و بسیار مرطوب	۰/۷۵ <R	ندارد

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

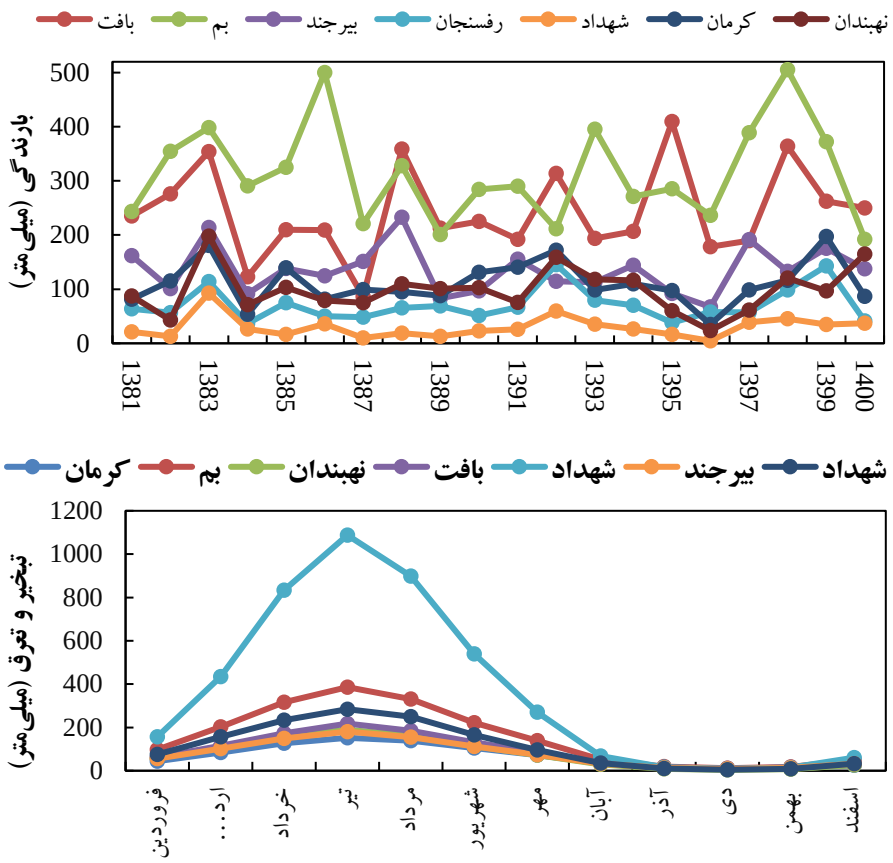
در نهایت، پس از محاسبهٔ میزان فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، در مقابل افزایش یا کاهش هر یک از متغیرها، میزان تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل تعیین شد. به‌عبارت‌دیگر، تحلیل حساسیت روشی است که با تغییر دادن ورودی‌های یک مدل آماری به‌صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک)، می‌تواند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

۴- یافته‌ها

۴-۱- بررسی روند متغیرهای اقلیمی

تجزیه‌وتحلیل‌های آماری بر داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت در دورهٔ ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰) نشان داد که تغییرات سالانه قابل ملاحظه‌ای در بارندگی، دما، باد و تبخیروتعرق سالانه اتفاق افتاده است، به‌طوری‌که 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.

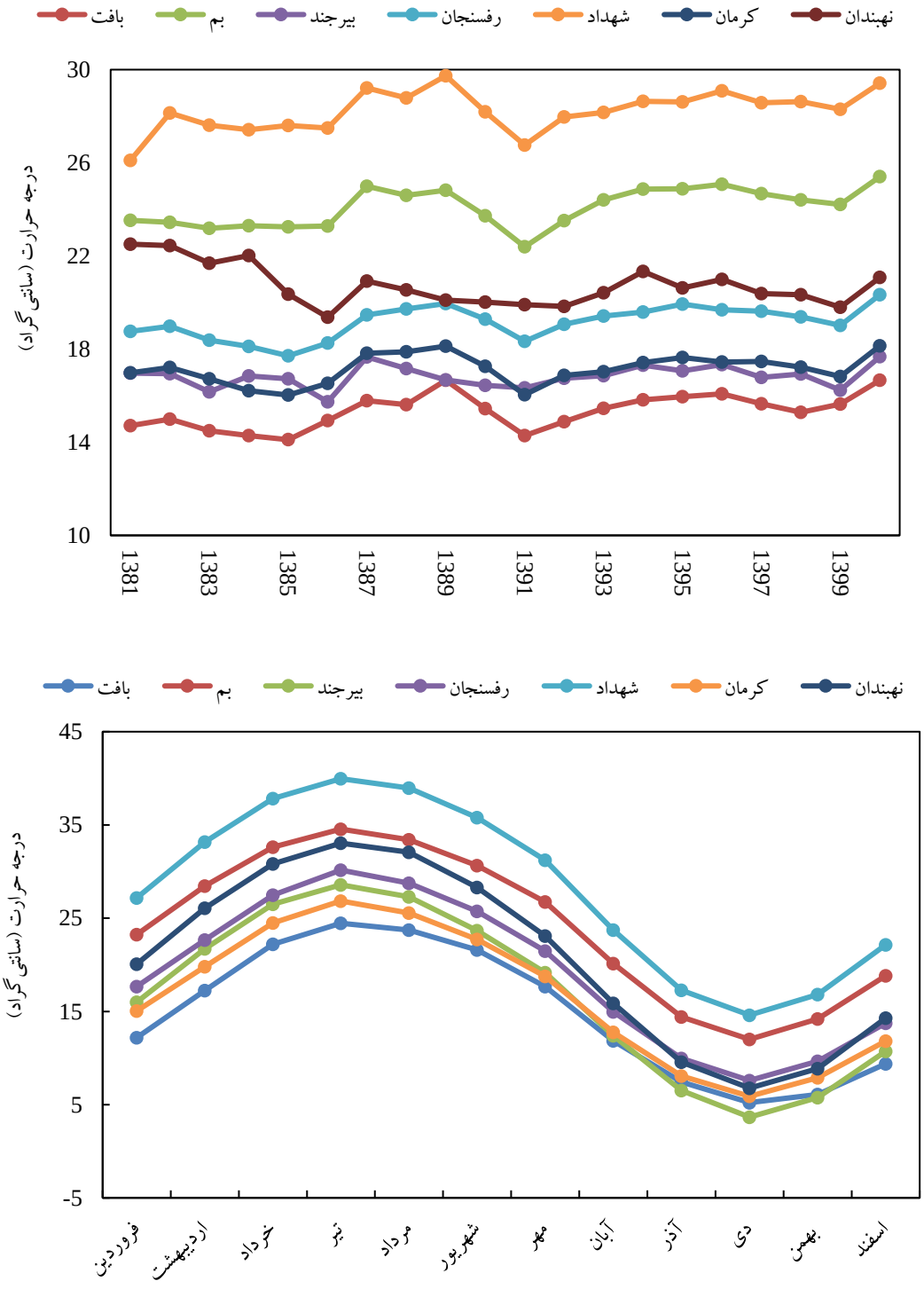
[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



شکل ۲: تغییرات بلندمدت بارندگی سالانه (بالا) و تبخیروتعرق ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت

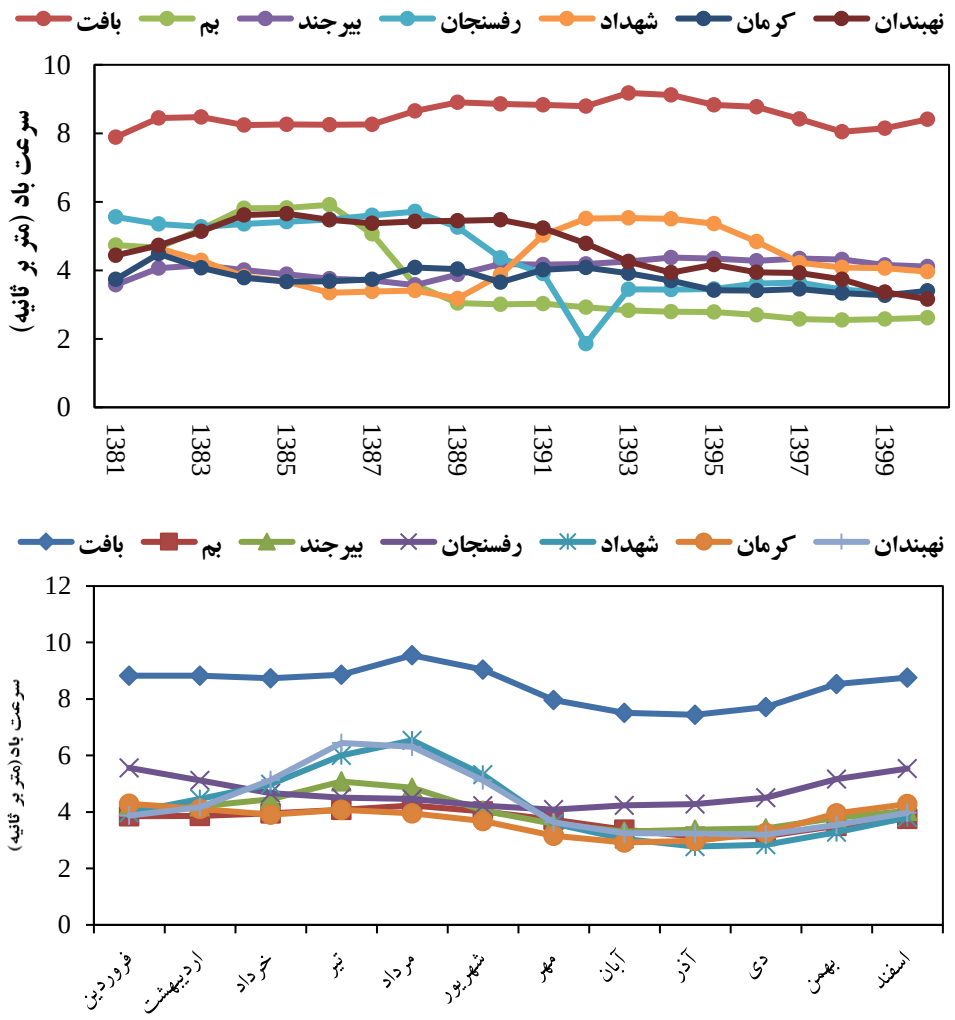
بر اساس شکل ۳ بیش‌ترین میانگین درجهٔ حرارت سالانه در ایستگاه شهداد ۲۸/۲ درجهٔ سانتی‌گراد و کم‌ترین میانگین آن در ایستگاه بافت با ۱۵/۳ درجهٔ سانتی‌گراد بود. بیش‌ترین درجهٔ حرارت سالانه در ایستگاه شهداد در سال ۱۳۸۹ با ۲۹/۷ درجهٔ سانتی‌گراد و کم‌ترین درجهٔ حرارت سالانه در سال ۱۳۸۵ با ۱۴/۱ درجهٔ سانتی‌گراد در ایستگاه بافت مشاهده شده است. محدودهٔ مورد 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 شهداد 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 مورد مطالعه غرب و شمال است (شکل ۴).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



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

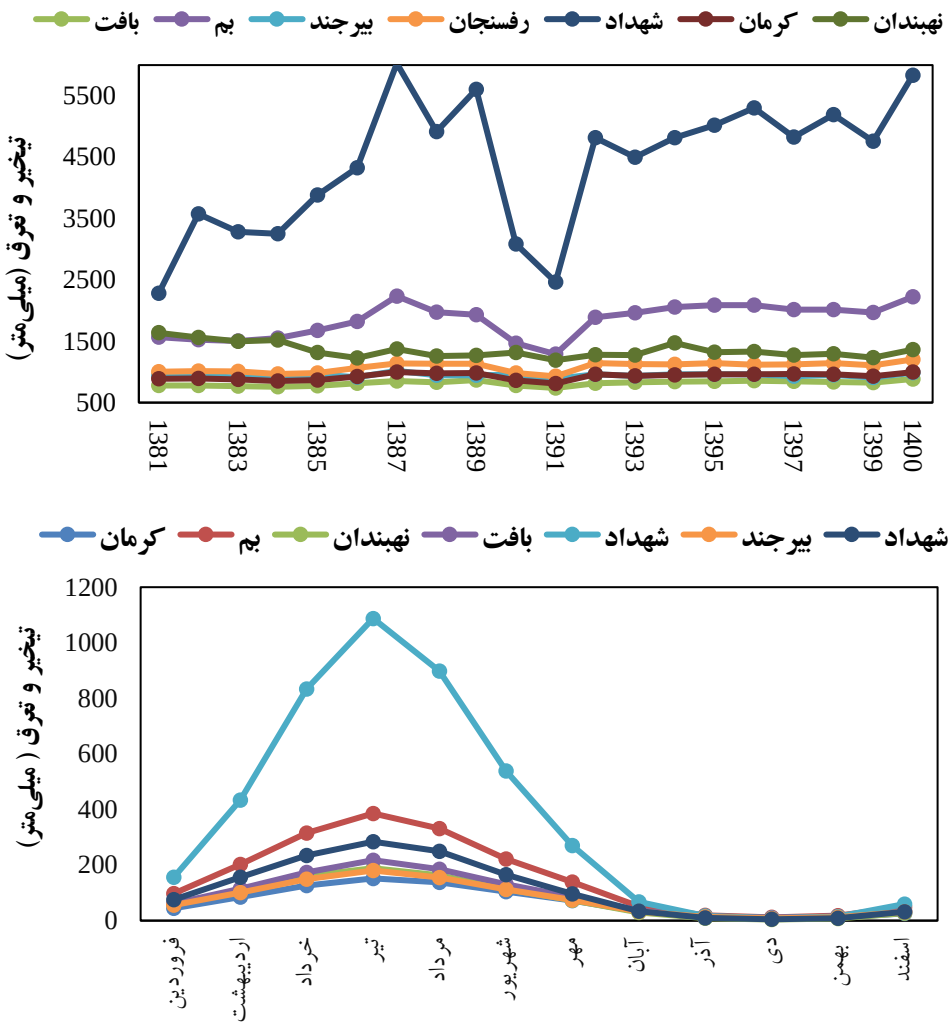
[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



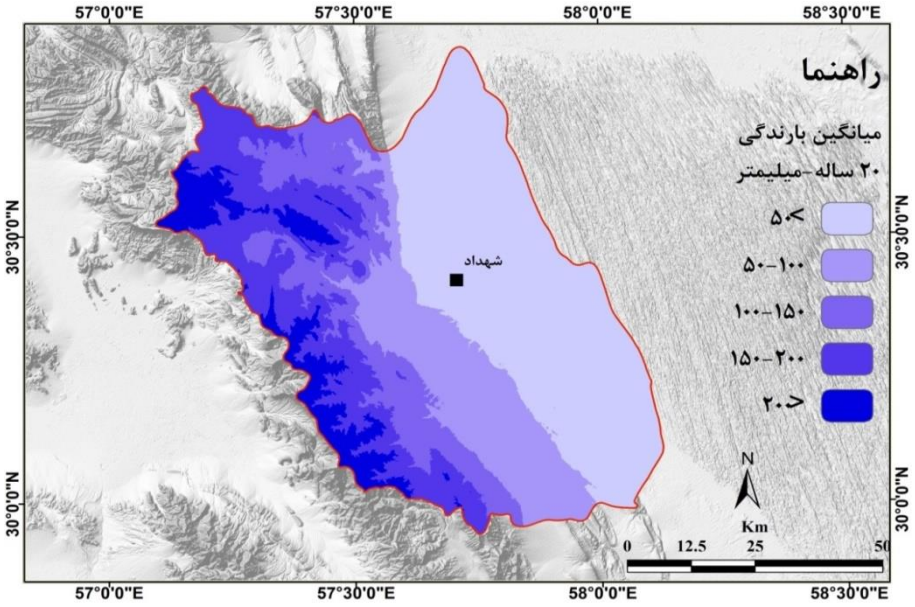
شکل ۴: تغییرات بلندمدت سرعت باد غالب سالانه (بالا) و ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت

نتایج حاصل از تحلیل تبخیروتعرق پتانسیل در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت برای دورهٔ زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۱ حاکی از آن است که در تیر همزمان با اوج رخدادهای دمایی و کاهش بارندگی، مقدار تبخیروتعرق پتانسیل بیش‌ترین مقدار را نسبت به سایر ماه‌های سال دارد. بیش‌ترین میانگین تبخیروتعرق ماهانه و سالانه به‌ترتیب برابر با ۱۰۸۷/۶ میلی‌متر در تیر و برابر با ۶۰۲۶/۹ میلی‌متر در سال ۱۳۸۷ مربوط به ایستگاه شهداد نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است (شکل ۵). در نهایت با استفاده از دورهٔ 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 روبه‌رو هستند و در سمت غربی منطقه مطالعاتی (ایستگاه بافت) افزایش بارندگی و کاهش دما وجود دارد.

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

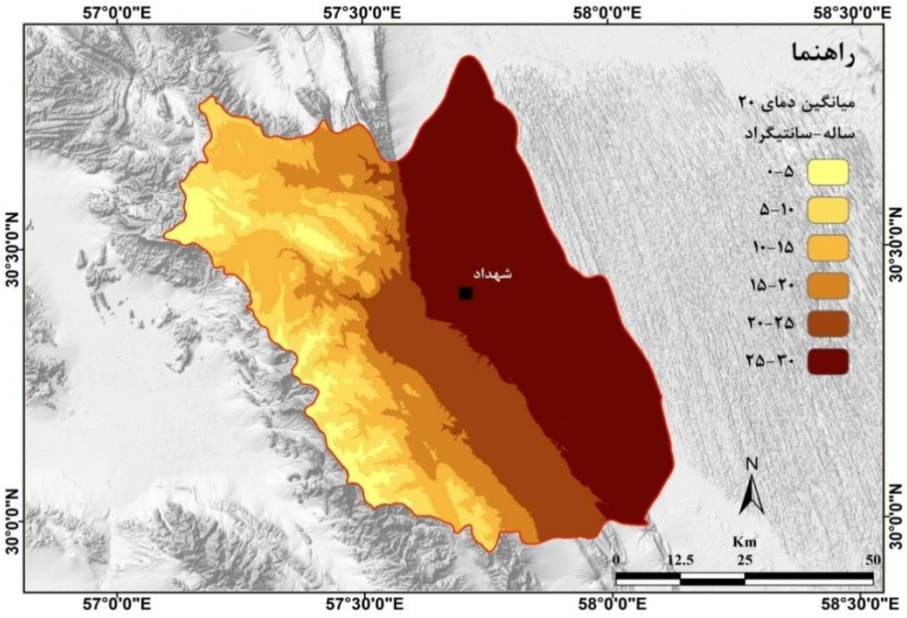


شکل ۵: تغییرات بلندمدت تبخیروتعرق پتانسیل سالانه (بالا) و ماهانه (پایین) ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت



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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



شکل ۷: نقشه هم‌دمای ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت

۴ـ۲ـ محاسبهٔ سرعت و جهت باد

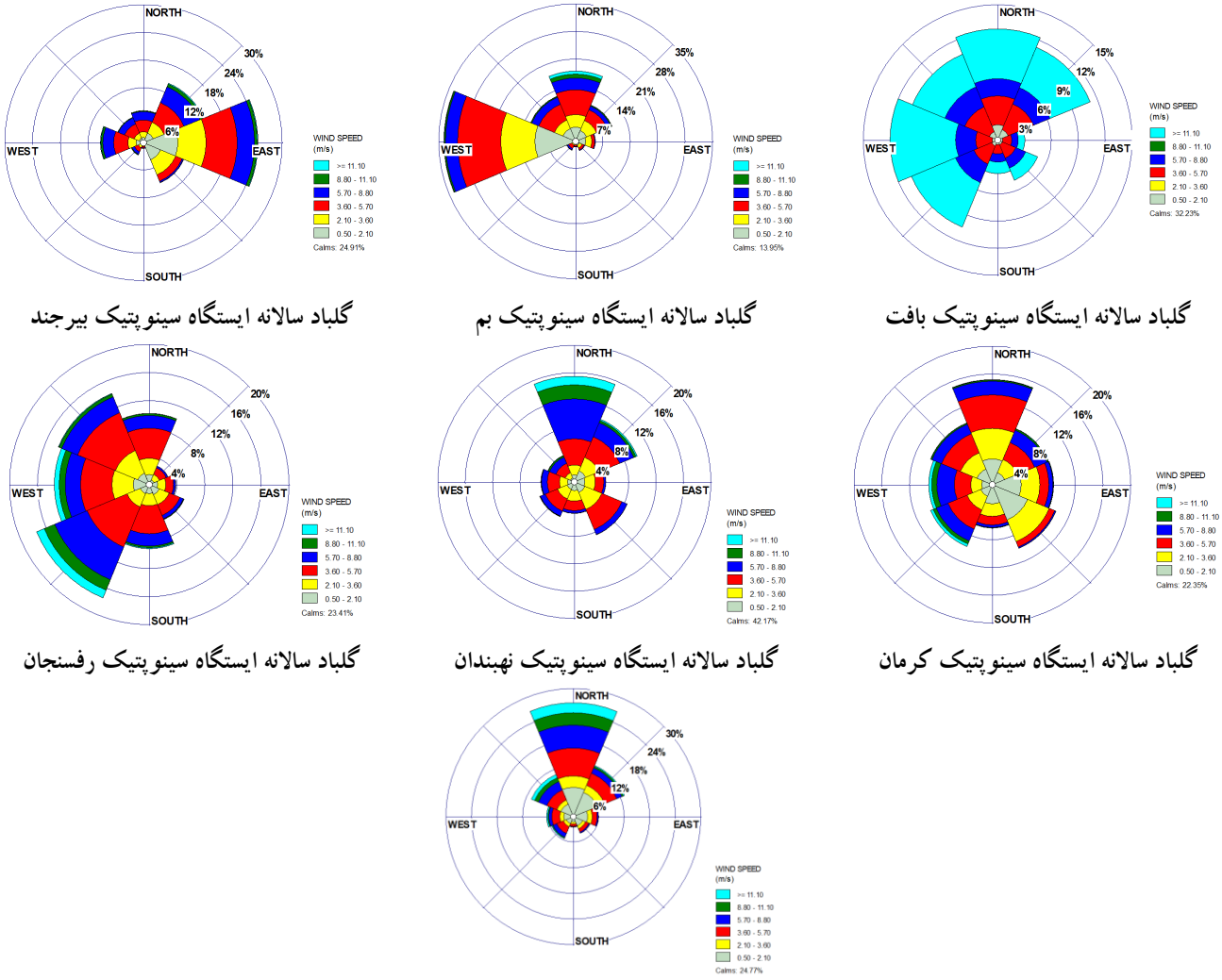
درصد فراوانی بادهای با سرعت بیش‌تر از سرعت آستانهٔ فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین با سرعت شش متر بر ثانیه (Zangenehtabar et al, 2021) در ایستگاه‌های سینوپتیک غرب بیابان لوت (جدول ۳) نشان داد که پدیدهٔ گردوغبار در ایستگاه بافت نسبت به سایر ایستگاه‌ها به‌دلیل بالاتر بودن بادهای فرساینده نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیش‌تر است و ایستگاه نهبندان 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 ۰/۵ متر بر ثانیه) در شش کلاس و جهت گلبادهای سالانه هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه در هشت کلاس تهیه شد. با توجه به گل‌باد سالانه به‌ترتیب در ایستگاه‌های بافت، بم، بیرجند، کرمان، نهبندان، رفسنجان و شهداد مشاهده می‌شود که ۳۲/۲۳، ۱۳/۹۵، ۲۴/۹۱، ۲۲/۳۵، ۴۲/۱۷، ۲۳/۴۱ و ۲۴/۷۷ درصد از کل ساعات دیده‌بانی سالانه، هوا آرام و بدون جهت می‌وزد. جهت غالب وزش بادها در ایستگاه بافت شمال و غرب، کرمان، نهبندان و شهداد شمالی، ایستگاه بم غربی، ایستگاه بیرجند شرقی و ایستگاه رفسنجان جنوب‌غربی است (شکل ۸).

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

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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک بافت

گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک بم

گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک بیرجند

گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک کرمان

گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک نهبندان

گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک رفسنجان

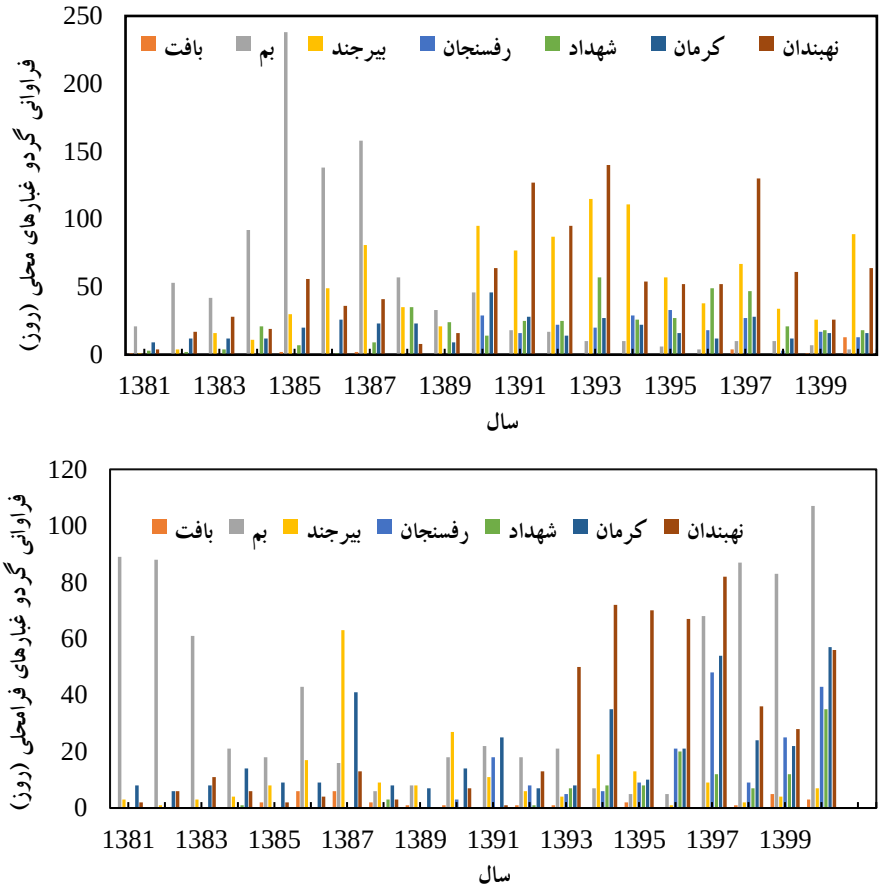
گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک شهداد

شکل ۸: گلباد سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه طی دورهٔ آماری ۲۰ ساله

۴-۳- محاسبهٔ فراوانی تعداد روزهای گردوغبار

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 نهبندان 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).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]



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

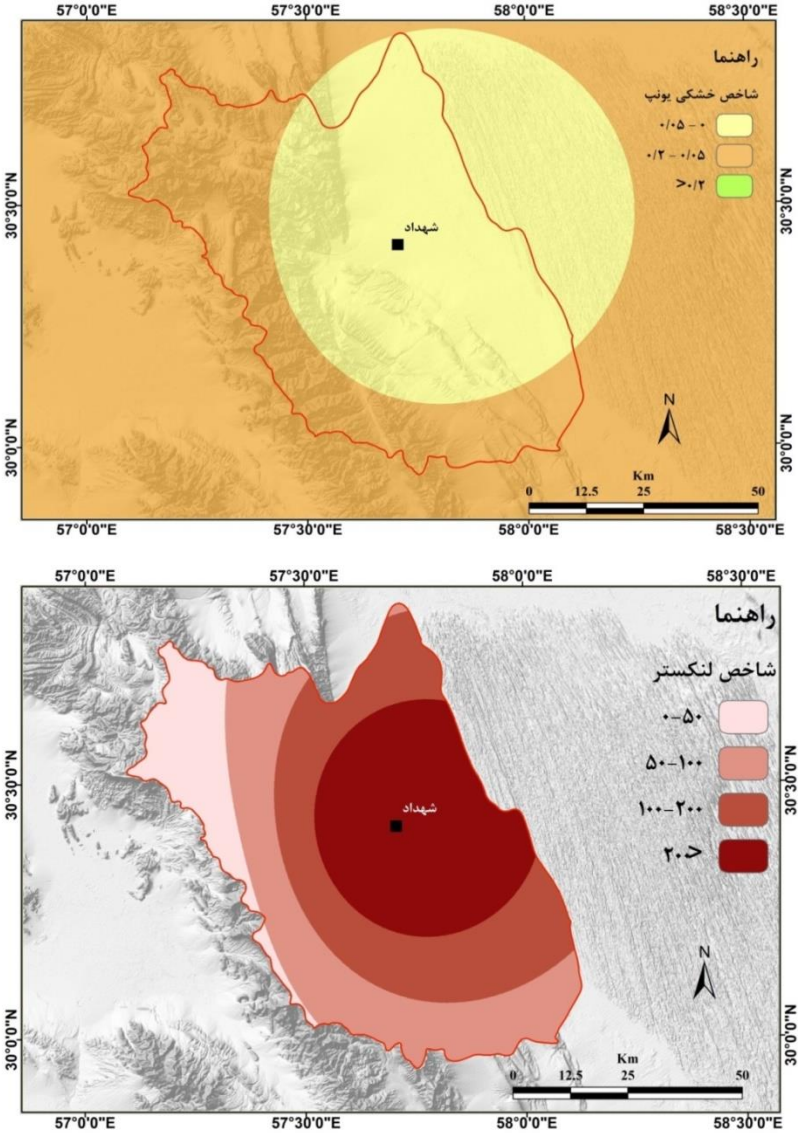
۴-۴- محاسبهٔ میزان تحرک تپه‌های ماسه‌ای

متوسط شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ای (شاخص لنکستر) ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت در دورهٔ 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. محاسبهٔ شاخص خشکی ایستگاه‌ها نشان داد که شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه به‌دلیل فعال 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 بدان‌معناست 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 تحرک‌پذیری ماسه در کل بیابان لوت افزوده شده و خطر بیابان‌زایی در منطقه تشدید می‌شود. این مسئله در تطابق با شاخص لنکستر و پتانسیل تحرک‌پذیری ماسه در این منطقه است (شکل ۱۰).

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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

ایستگاه	درصد باد فرساینده	بارندگی (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در سال)	بارندگی مؤثر (میلی‌متر)	شاخص لنکستر	فعالیت تپه‌های ماسه‌ای	اقلیم (شاخص خشکی)	خطر بیابان‌زایی
بافت	۴۳/۷۳	۲۴۲	۸۱۶	۰/۳	۱۴۷	فعال	نیمه خشک	شدید
بم	۸/۱۸	۳۱۵	۱۸۴۲	۰/۱۷	۴۸	غیرفعال	خشک	بسیار شدید
بیرجند	۱۰/۱۶	۱۳۶	۹۴۵	۰/۱۴	۷۱	فعال در نوک	خشک	بسیار شدید
رفسنجان	۱۴/۱۵	۷۱	۱۰۷۹	۰/۰۷	۲۱۴	کاملاً فعال	خشک	بسیار شدید
شهداد	۱۳/۷۴	۳۰	۴۳۸۷	۰/۰۱	۲۰۲۷	کاملاً فعال	فراخشک	بیابان واقعی
کرمان	۷/۹۷	۱۱۱	۹۲۸	۰/۱۲	۶۷	فعال در نوک	خشک	بسیار شدید
نهبندان	۱۰	۹۸	۱۳۵۱	۰/۰۷	۱۳۷	فعال	خشک	بسیار شدید

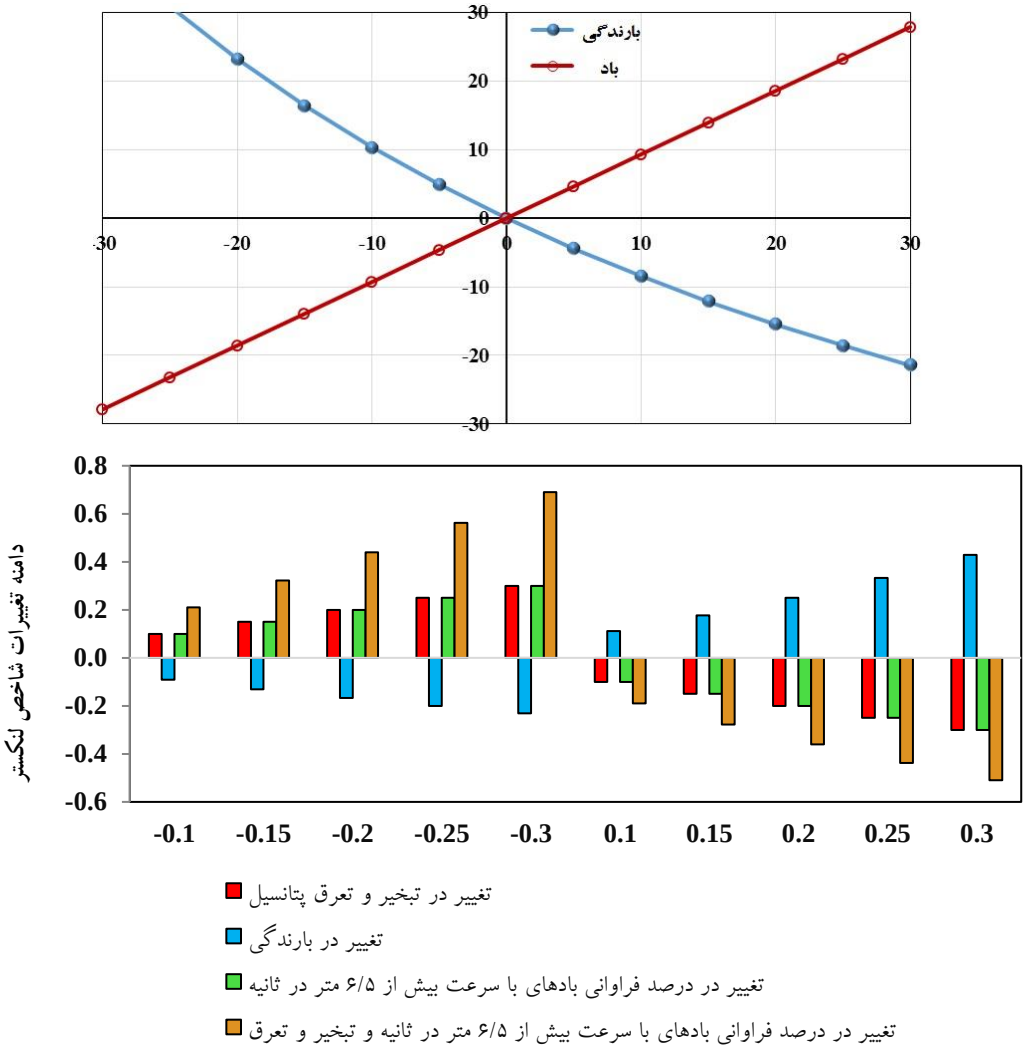


شکل ۱۰: تغییرات شاخص‌های خشکی یونپ (بالا) و لنکستر (پایین) در ایستگاه‌های سینوپتیک بیابان لوت

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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

نتایج حاصل از آزمون تحلیل حساسیت (شکل ۱۱) نشان داد شاخص تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات باد دارای رابطه مثبت و نسبت به تغییرات ناشی از بارندگی دارای رابطه منفی است. به‌عبارتی با افزایش ۳۰ درصدی سرعت بادهای فرساینده در ایستگاه، شاخص تحرک‌پذیری ماسه حدود ۳۰ درصد افزایش و با کاهش ۳۰ درصدی سرعت باد، شاخص تحرک‌پذیری ماسه حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. چنان‌چه مقدار میانگین بارندگی به مقدار ۳۰ درصد افزایش یابد، شاخص لنکستر کاهش ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد. بر عکس آن، اگر میزان بارندگی ۳۰ درصد کاهش یابد، شاخص لنکستر افزایش ۴۳ درصدی را نشان می‌دهد. حساسیت تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات افزایش ناشی از بارندگی بیش‌تر از سرعت باد بوده است. این امر اشاره به نقش مؤثر بارندگی در منطقهٔ 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 آستانهٔ فرسایش (بالا) و دامنه تغییرات شاخص لنکستر (پایین) در ایستگاه سینوپتیک شهداد

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

شاخص تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات تبخیروتعرق دارای رابطه مثبت بوده و چنان‌چه در آینده درصد تبخیروتعرق در ایستگاه سینوپتیک شهداد، ۳۰ درصد افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت. بر عکس آن نیز اگر میزان تبخیروتعرق ۳۰ درصد کاهش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. با افزایش ۳۰ درصدی تبخیروتعرق 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 ۵۰ درصد کاهش می‌یابد که تاثیر این دو مؤلفه در زمان افزایش بیش از کاهش است (شکل ۱۱).

۵ـ 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 تبخیروتعرق 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 تحرک‌پذیری 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 شکل‌زایی آن را در فصل وزش این بادها دو چندان می‌کند (Zangenehtabar et al, 2021).

نتایج این پژوهش نشان داد که در طول دورهٔ آماری ۲۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۱) 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 آستانهٔ 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 نهبندان 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 تبخیروتعرق اشاره نمود. افزایش روند درجهٔ حرارت موجب افزایش بادهای با سرعت بیش‌تر از آستانهٔ 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 دورهٔ آماری ۲۰ ساله به‌دلیل فعال بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی و فرامحلی عموماً دارای شرایط نیمه‌خشک، خشک و فراخشک بوده است. این بدان‌معناست که ۷۰ درصد محدودهٔ مورد مطالعه از نظر اقلیمی در معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید، ۱۵ درصد آن در معرض خطر بیابان واقعی (ایستگاه شهداد) و ۱۵ درصد در معرض خطر بیابان‌زایی شدید قرار دارد. بر این اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

تحرک‌پذیری ماسه افزوده شده و خطر بیابان‌زایی را تشدید می‌نماید با افزایش خطر بیابان‌زایی در منطقه فعالیت تپه‌های ماسه‌ای نیز افزایش یافته است.

محاسبهٔ شاخص خشکی ایستگاه‌ها نشان داد که شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه به‌دلیل فعال 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 نیمه‌مرطوب در ایستگاه‌های واقع در ارتفاعات است. این بدان‌معناست 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 محاسبهٔ شاخص لنکستر، میزان فعالیت بالقوه تپه‌های ماسه‌ای تعیین و مناطق فعال از غیرفعال تفکیک شده است. نتایج پهنه‌بندی این شاخص نشان داد که میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای عمدتاً کاملاً فعال و فعال در نوک تپه‌ها بوده است. فقط در ایستگاه بم غیرفعال است که به جهت تثبیت و کاهش فعالیت گردوغبار و اقدامات مدیریتی از قبیل نهال‌کاری، جنگل‌کاری‌های دست‌کاشت بیابانی، قرق و مالچ‌پاشی در تپه‌های ماسه‌ای انجام شده است اما با توجه به فعالیت تپه‌ها در سایر ایستگاه‌ها، این اقدامات کافی نبوده و نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی جدید است. هم‌چنین وقوع پدیدهٔ گردوغبار به طرق مختلف از قبیل تشدید بیماری‌ها و آفات محصولات کشاورزی و فضای سبز، بروز تصادفات به‌علت کاهش میدان دید، لغو پروازها، افزایش مراجعه بیماران در بخش‌های آلرژی، قلب، تنفسی و پوست به‌طور سالانه خسارات جدی به جامعه انسانی وارد می‌کند.

پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی دو سنجه بارندگی و باد بر تحرک‌پذیری ماسه در آینده با تحلیل حساسیت نشان داد که حساسیت تحرک‌پذیری 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 تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات تبخیروتعرق دارای رابطه مثبت است. با افزایش ۳۰ درصدی تبخیروتعرق 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 ۵۰ درصد کاهش می‌یابد که تاثیر این دو مؤلفه در زمان افزایش بیش از کاهش می‌باشد.

به‌طور کلی نتایج بررسی ارتباط میان شاخص تحرک ماسه و متغیرهای اقلیمی حاکی از آن است که بارندگی و تبخیروتعرق پتانسیل بیش‌ترین تأثیر را بر تحرک ماسه در منطقه مطالعاتی دارند. با توجه به افزایش تعداد روزهای گردوغبار که مشکلی برای محیط‌زیست منطقه محسوب می‌شود (Yarahmadi et al, 2015)، تغییر اقلیم از طریق بررسی و محاسبهٔ تغییر متغیرهای اقلیمی (Ashkenazy et al, 2012) گزارش شده است. بررسی‌های پیشین در ارتباط با علل و پیامدهای تغییر ضرایب یا شاخص‌های اقلیمی در پهنه‌های آب و هوایی ایران نشان می‌دهد که تغییر ویژگی‌های آب و هوایی از جمله افزایش ضریب خشکی می‌تواند ازجمله دلایل تخریب سرزمین و به‌تبع آن افزایش رخدادهای گردوغبار به شمار آید. نتایج پیش‌بینی بیان‌گر آن است که وضعیت تحرک رسوبات بادی ناشی از تپه ماسه‌ای 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 می‌تواند در راستای

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

پیش‌بینی وضعیت آینده تپه‌های ماسه‌ای و تعیین اقدامات مدیریتی مناسب برای کنترل و کاهش خسارت احتمالی به سایر کاربری‌های موجود در منطقهٔ 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*)
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*)
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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

16. Hamdan, M.A., Refaat, A.A., & Abdel Wahed, M. (2016). Morphologic characteristics and migration rate assessment of Barchanss 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
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
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/jdmal.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*)

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]

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*).
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*).
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*)
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*)
44. Yasien Al-Gurairy, 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

[DOI: 10.61186/jeer.14.1.79]