

برآیند در ایستگاه اراک با ۱/۹۳ واحد برداری اتفاق می‌افتد. شاخص همگنی جهت باد در ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) دارای رژیم بادی بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند است و در سایر ایستگاه‌ها بادهای دوجته با زاویه باز اتفاق می‌افتد. با در نظر گرفتن توانایی حمل هر واحد بردار، بیش‌ترین قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود ۴/۲۹۵ مترمکعب در واحد عرض در ایستگاه قزوین و کم‌ترین قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود ۵/۶ مترمکعب در واحد عرض در ایستگاه اراک برآورد گردید. پتانسیل بالای بادهای حوضه دریاچه نمک به‌ویژه ایستگاه قزوین در تولید رسوب ناشی از فرسایش بادی دارد. هم‌چنین مطالعات عمیق‌تری در مورد تأثیرات فرسایش باد در بازیابی پوشش گیاهی، تنوع زیستی و بهره‌وری زمین انجام گردد.

واژگان کلیدی: باد غالب، رسوب، رژیم بادی، دریاچه نمک، فرساینده، قزوین.

مقدمه

تپه‌های شنی یک سیستم اکولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و فیزیکی مهم، منحصربه‌فرد و پیچیده را تشکیل می‌دهند [۷، ۱۷ و ۱۱]. تقریباً ۲۰ درصد از مناطق بیابانی تپه‌های شنی هستند و آن‌ها را تهدیدی برای سکونتگاه‌های انسانی، مزارع کشاورزی، جاده‌ها و غیره می‌دانند [۹]. این تپه‌ها 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 رسوبی هستند [۱]. میدان‌های ماسه‌ای نزدیک به 5×10^6 کیلومترمربع از سطح کره زمین را پوشانیده [۲۲] و از تپه‌های ماسه‌ای با اشکال مختلف تشکیل شده است. تشکیل آن‌ها به دلیل روابط متقابل بین رژیم بادی و فرآیندهای رسوب‌گذاری است [۱۰]. تپه‌های ماسه‌ای، نهشته‌ای از ماسه‌های متفاوت از نظر شکل و اندازه بوده که بر اثر فعالیت باد به وجود می‌آیند [۳۷] و تا حدود ۲۵ درصد مناطق بیابانی را به خود اختصاص می‌دهند. برحسب گزارش سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، تغییر و جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای مانند تغییرات اقلیمی در حال افزایش است (همان) بعلاوه، تغییر اقلیم به‌صورت افزایش خشکی بر اثر افزایش دما، کاهش پوشش گیاهی و خشک‌سالی‌های پی‌درپی، سبب جابجایی و گسترش بیش‌تر تپه‌های ماسه‌ای می‌شود [۳۰، ۳۵ و ۱۸].

نقش فرساینده‌گی باد و پهنه‌بندی حمل ماسه به‌منظور
شناسایی اشکال تپه‌های ماسه‌ای

فرهاد ذوالفقاری^{۱*}، مهین حنیفه پور^۲، لیلا بیابانی^۳

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

DOI: 10.22034/WMJ.2024.2036310.1078

چکیده

باد به‌عنوان عامل اصلی در تخریب و فرسایش مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که برای جلوگیری از اثرات تخریبی آن باید شناخت کافی از ویژگی بادهای منطقه حاصل گردد. هدف از انجام این تحقیق بررسی رژیم‌های بادی فرساینده با استفاده از داده‌های ساعتی سرعت و جهت باد برای ترسیم گلماسه، گلباد، گلتوفان و هم‌چنین پتانسیل حمل ماسه در شش ایستگاه واقع در حوضه دریاچه نمک جهت تعیین کلاس‌های سرعت باد و توان حمل ماسه و تأثیر آن را در شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای می‌باشد. با بررسی و ارتباط بین الگوی مکانی و وضعیت تحریک‌پذیری بادهای فرساینده، شرایط تشکیل و گسترش تپه‌های ماسه‌ای مشخص می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای WRPLOT و Sand Rose Graph داده‌های بادسنجی شش ایستگاه سینوپتیک اراک، گلپایگان، فرودگاه امام خمینی (ره)، کاشان، قزوین و قم در دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۲-۲۰۲۱) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پهنه‌بندی پتانسیل نهایی حمل ماسه و بررسی مقادیر آن به‌صورت سالانه و فصلی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. نتایج حاصل از گلبادهای سالانه منطقه نشان داد که علی‌رغم تغییرات زمانی و مکانی بسیار زیاد باد در منطقه، عمده بادهای غالب از سمت شمال غربی و پس از آن غرب می‌وزد. گلتوفان‌های سالانه منطقه نشان داد که عمده بادهای غالب و فرساینده از سمت شمال غربی می‌وزد. ارزیابی گلماسه سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار برآیند جبری پتانسیل حمل ماسه در ایستگاه قزوین با $2/4220$ واحد برداری و کم‌ترین مقدار

۱- استادیار دانشگاه سراوان، ایران

۲- دکتری مهندسی منابع طبیعی - بیابانزدانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی منابع طبیعی - بیابانزدانی، دانشکده منابع طبیعی

دانشگاه تهران *پست الکترونیک نویسنده مسئول

Email: zol.farhad@gmail.com

پیشرفت تپه‌های ماسه‌ای تقریباً در تمام کشورهای شمال آفریقا مشکلات زیست‌محیطی شدیدی از جمله بیابان‌زایی را ایجاد می‌کند [۳۲]. به‌ویژه، منطقه لیبی تا حد زیادی تحت تأثیر تپه‌های شنی قرار گرفته زیرا بخش بزرگی از جنوب غربی لیبی پوشیده از شن و ماسه است که تقریباً بیش از ۲۵۰ هزار هکتار است [۲۰]. در نتیجه، بسیاری از شهرهای لیبی، از جمله پایتخت آن طرابلس، در معرض حرکت شن و ماسه قرار دارند. در چنین شهرهایی، حرکت شن و ماسه نه تنها مردم را تحت تأثیر قرار داده است، بلکه شبکه‌های جاده‌ای و سایر سامانه‌های حمل‌ونقل را نیز تهدید کرده است. بین باد و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای رابطه مستقیمی وجود دارد.

در سطح جهانی، محرک‌های یکپارچه اکوسیستم تپه‌های شنی نسبتاً فعال در همه‌جا وجود دارند. عوامل کلیدی برای تشکیل و توسعه سیستم تپه‌های شنی از جمله وجود رسوبات شنی در دسترس، سرعت باد به اندازه کافی بالا برای به حرکت درآوردن رسوب، وجود پوشش گیاهی متصل به شن و فضای کافی برای به حرکت درآمدن را می‌توان نام برد [۸ و ۱۶]. طوفان‌ها هم‌چنین بر تحرک تپه‌های شنی از طریق تغییر در عرضه رسوب و تأثیرات بر پویایی جامعه گیاهی تأثیر می‌گذارند [۲۳]. تغییرات در این عوامل در طول زمان، زنجیره‌ای از تحرک تپه‌های شنی را از تپه‌های بسیار فعال که به‌طور کامل از ماسه برهنه تشکیل شده تا تپه‌های کاملاً گیاهی یا «پایدار» را ایجاد می‌کند [۱۶، ۲۱ و ۳۸]. بر این اساس، با تحلیل داده‌های بادسنجی یک ایستگاه، نوع تپه‌های ماسه‌ای شکل گرفته را می‌توان پیش‌بینی نمود و برعکس با دیدن تپه‌های ماسه‌ای به رژیم بادی منطقه پی برد [۳۹].

به علت اینکه باد عامل اصلی تخریب و فرسایش در مناطق بیابانی محسوب می‌گردد، برای جلوگیری از اثرات تخریبی آن باید شناخت کافی داشت، بنابراین لازم است منطقه در یک دوره آماری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مهم‌ترین عوامل سرعت باد، جهت باد غالب و فراوانی باد است که می‌توان با استفاده از ترسیم گلباد، گلتوفان و گلماسه‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه نتایج مربوط به عوامل سرعت باد را استخراج نمود [۴].

در ارتباط با بررسی رژیم بادی مطالعات زیادی در سایر نقاط جهان و ایران انجام شده که به شرح ذیل است: اشکنزی^۱ و همکاران [۷] تحرک تپه‌های ماسه‌ای را تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی در بیابان‌های کالاهاری و استرالیا مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات پیش‌بینی شده در DP و بارش به‌طور کلی قابل توجه نیست و تپه‌های بیابانی مناطق استرالیا و کالاهاری به احتمال زیاد تا اواخر قرن بیست و یکم فعال نخواهند شد. با این وجود، تپه‌های استرالیا به دلیل کاهش بارندگی و افزایش قدرت باد نسبت به کالاهاری فعال‌تر هستند. ارزیابی رژیم باد و فعالیت حمل‌ونقل رسوب در تپه‌های ساحلی کالیفرنیا نشان داد که سرعت آستانه باد محاسبه شده برای ۴۱۷ رویداد حمل‌ونقل از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ بین ۵/۱۸ متر بر

1. Ashkenazy

ثانیه تا ۸/۴۹ متر بر ثانیه بوده و از هیچ روند فصلی خاصی پیروی نمی‌کرد. تقریباً ۲/۳ از پتانسیل حمل ماسه در ماه‌های مارس تا ژوئن بوده و به‌صورت یک‌جهته می‌باشد و از تشکیل تپه‌های عرضی پشتیبانی می‌کند [۳]. توان حمل ماسه و حرکت تپه‌های ماسه‌ای در سه دهه گذشته در ارگ خارطوران واقع در شمال شرقی ایران نشان داد که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ در حمل ماسه افزایش شدیدی رخ داده است 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. در نهایت تپه‌های شنی برای مدت طولانی ثابت شده‌اند و شدت شاخص تحرک متأثر از تغییرات آب‌وهوایی است [۲۸]. هم‌چنین تغییر اقلیم و تأثیر آن بر گسترش پدیده تپه‌های شنی و تخریب اراضی کشاورزی در عراق طی دوره آماری ۱۹۸۴-۲۰۲۲ نشان داد که مهم‌ترین دلیل افزایش پدیده تپه‌های شنی، تغییرات اقلیمی و همراه با کمبود بارندگی و افزایش مداوم میانگین دمای سالانه منطقه است [۴۳].

صادقی و همکاران [۳۱] در بررسی تأثیر بادهای فرساینده بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای دشت سمنان به این نتیجه رسیدند که پتانسیل حمل ماسه‌بادی در همه ایستگاه‌های مورد بررسی، بر اساس سرعت آستانه شش متر بر ثانیه نسبتاً زیاد و بیش از ۳۰۰۰ واحد برداری (VU) در طول سال است که زیاد بودن پتانسیل بادهای ایجاد فرسایش بادی و حمل ماسه در منطقه را نشان می‌دهد. مطالعه نظری سامانی و همکاران [۲۷] در بررسی تلفیق داده‌های بادسنجی با ژئومورفولوژی ارگ کاشان نشان داد که فراوانی وزش باد نسبت به سرعت آن، نقش مهم‌تری در انتقال ماسه‌ها و مورفولوژی ارگ به عهده داشته‌اند. بررسی ویژگی‌های رژیم بادی و پتانسیل حمل ماسه در ریگ سرخس واقع در گوشه شمال شرقی کشور نشان داد که انرژی باد ریگ سرخس (DP=193, UDI=7/0) در کلاس کم قرار دارد که بیش‌ترین مقدار در مردادماه (VU 3/28) و کم‌ترین در آبان‌ماه (VU 6/5) رخ داده است. بر اساس مشاهدات میدانی، فعالیت ماسه‌های روان از شمال و جنوب به سمت مرکز ریگ کاهش می‌یابد [۲].

بررسی ویژگی‌های رژیم بادی و پتانسیل حمل ماسه در تپه‌های ساحلی جاسک نشان داد که بیش‌ترین فراوانی بادهای فرساینده در فصل تابستان و در ماه‌های مرداد و شهریور و کم‌ترین فراوانی در فصل پاییز و در آبان‌ماه مشاهده شده است. جهت باد ماسه آور نیز عمدتاً شمال غربی و انرژی باد بر اساس قابلیت حمل، در کلاس کم قرار دارد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان به ترتیب در آبان و مهرماه بوده است [۵]. در شناسایی کانون‌های گردوغبار بر مبنای خصوصیات باد و وضعیت پوشش زمین در قم مشاهده گردید که مناطق مرکزی و شمالی استان قم به دلیل وجود نوع پوشش شورزار و ماسه‌زار، ضریب بالای DPT و هم‌چنین میانگین بالای سرعت باد، مستعد تولید گردوغبار است، بنابراین بر اساس شاخص‌های ضریب DPT و سرعت باد، این مناطق به‌عنوان کانون‌های تولید گردوغبار

در استان قم محسوب می‌شوند [۱۹]. نتایج حاصل از بررسی باد در شناسایی منشأ و مسیر انتقال ماسه در محدوده تپه‌های ماسه‌ای دروازه‌قرآن یزد نشان داد که بادهای شدید در فصول خشک با امتداد شمال غربی، نقش مهمی در شکل‌گیری، توسعه و جابه‌جایی ماسه‌ها ایفا می‌کنند [۳۳]. هم‌چنین در بررسی تأثیر کاربری اراضی بر غلظت گردوغبار و میزان هدررفت خاک در منطقه عین خوش - دهلران نشان داده شد که کم‌ترین میزان هدررفت به کاربری‌های جنگل طبیعی کنار و کشاورزی و بیشترین مقدار آن به اراضی تپه ماسه‌ای اختصاص دارد [۲۴] و با کاشت کهور پاکستانی و سیاه‌تاغ به‌عنوان بادشکن بیولوژیک و ایجاد خرد اقلیم نتایج نشان داد که بادشکن طراحی‌شده برای گونه کهور پاکستانی، مسافت بیش‌تری از اراضی پشت بادشکن را محافظت کرده و سرعت باد را تا مسافت بیش‌تری از بادشکن اولیه کاهش داده است [۲۵].

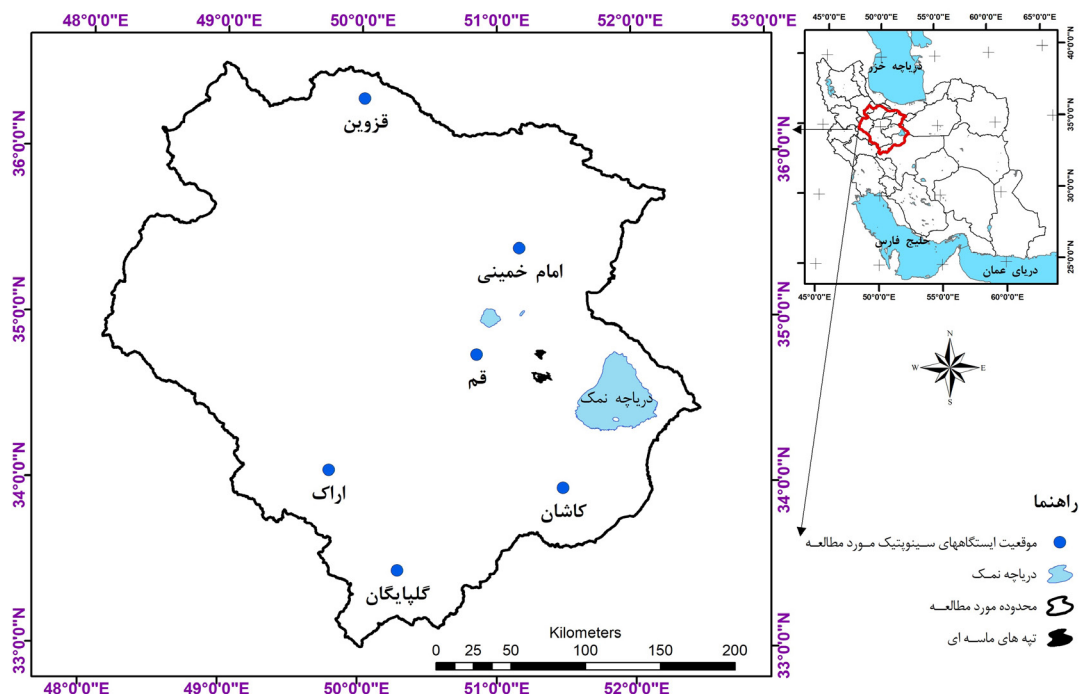
از آنجاکه پدیده حرکت ماسه‌های روان به‌عنوان یکی از فرآیندهای مهم تخریب سرزمین و یک چالش جدی در ایران به‌شمار می‌رود و عوامل اقلیمی نیز در این پدیده نقش بسزایی دارند؛ از این‌رو بررسی و شناخت این عوامل از جنبه تأثیر آن‌ها بر بروز و تشدید تحریک‌پذیری ماسه‌های روان، برای جلوگیری از تشدید بحران‌های زیست‌محیطی در آینده یک ضرورت انکارناپذیر است. آگاهی از وضعیت تپه‌های ماسه‌ای می‌تواند ما را در مدیریت و حفاظت از آن‌ها یاری دهد. با توجه به اینکه در ایران پهنه‌های گسترده‌ای از ماسه‌های بادی وجود دارد در پژوهش حاضر تپه‌های ماسه‌ای حوضه دریاچه نمک با توجه به نقش ویژه این حوضه به‌عنوان یکی از مستعدترین مناطق در تولید گردوغبار و یکی از فرآیندهای مهم

تخریب سرزمین و یک چالش جدی در ایران به‌شمار می‌رود؛ مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین آگاهی از وضعیت پدیده فرسایش بادی و میزان فعالیت رسوبات بادی به‌ویژه در لندفرم‌های حساس به این پدیده‌ی مخرب زیست‌محیطی و نیز شناسایی عوامل اقلیمی مؤثر بر آن می‌تواند گامی مؤثر در کاهش روند بیابان‌زایی و بهبود کیفیت هوا به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک باشد. هم‌چنین مساحت این حوضه در حدود ۲۶ میلیون هکتار است و حدود ۲۶ درصد از جمعیت کشور در این حوضه در استان‌های قم، تهران، اصفهان، سمنان زندگی می‌کنند که تاکنون مطالعاتی در خصوص بررسی حرکت ماسه‌های روان در این منطقه با توجه به تأثیرپذیری منطقه در برابر این پدیده صورت نگرفته است. با توجه به موارد فوق، هدف از پژوهش حاضر پهنه‌بندی خطر حمل ماسه‌های بادی و ارتباط آن با پتانسیل حمل ماسه توسط بادهای فرساینده در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک است تا بتوان با ارتباط بین الگوی مکانی و وضعیت تحریک‌پذیری، شرایط تشکیل و گسترش تپه‌های ماسه‌ای مشخص گردد.

داده‌ها و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه دریاچه نمک در ایران مرکزی در محدوده جغرافیایی 35° $31^{\circ}07'$ تا $48^{\circ}07'$ عرض شمالی و $52^{\circ}19'$ $30'$ طول شرقی و $26^{\circ}31'$ $25'$ تا $31^{\circ}07'$ عرض شمالی در زون ۳۹ قرار دارد و از شمال به رشته‌کوه‌های البرز، از غرب به رشته‌کوه‌های زاگرس، از جنوب به کوه کرکس و از شرق به دشت کویر محدود می‌شود. از نظر ارتفاعی، بیشینه ارتفاع آن با



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک

دوره آماری از		دوره آماری تا		ارتفاع از سطح دریا (m)	نام ایستگاه
ماه	سال	ماه	سال		
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۱۷۰۳	اراک
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۱۸۷۰	گلپایگان
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۹۹۰	فروگاه امام خمینی
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۹۵۵	کاشان
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۱۲۷۹	قزوین
۱	۲۰۰۲	۱۲	۲۰۲۱	۸۷۹	قم

گردید و علاوه بر میزان DpT^2 ، میزان TsF^3 یا مقدار کل ماسه حمل شده در جهات مختلف که معمولاً برحسب کیلوگرم بر متر در سال می‌باشد بیان گردید. بررسی مقادیر DpT در مناطق حساس جهان نشان می‌دهد که حداکثر مقدار DpT معادل ۸۰۰-۱۰۰۰ واحد برداری در طول سال می‌باشد. لذا فرایبرگر و دین^۴ [۱۴] با توجه به مقادیر مختلف توان حمل باد، (DpT) قدرت فرسایش و دبی حمل ماسه توسط باد در ایستگاه‌های مختلف مناطق بیابانی جهان به شرح جدول (۲) کلاسه‌بندی نموده‌اند.

در این پژوهش نیز با در نظر گرفتن کمترین حد سرعت آستانه فرسایش بادی (۵/۶ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری) [۴۲ و ۱۲]، گلماسه ایستگاه‌های مذکور تهیه گردید. از دیگر شاخص‌های حاصل از ترسیم گلماسه، شاخص همگنی برای حمل ماسه (UDI^5) است که رابطه ۱ تعریف شده است.

$$UDI = (RDP/DpT)$$

رابطه ۱

$RDP =$ مقدار نهایی حمل ماسه (اندازه بردار منتهجه) و $DpT =$ کل

توان حمل ماسه است.

هرچه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان ثبات باد یک‌جهت خاص است و بادهای یک‌جهتی در منطقه زیادتر بوده و می‌توان نتیجه گرفت تپه‌های ماسه‌ای از نوع بارخان هستند. برعکس هرچه مقدار این نسبت به سمت صفر تمایل پیدا کند، بیانگر عدم ثبات در جهت باد است و بادهای قدرتمند چندجهتی بر منطقه حاکم خواهند شد، در نتیجه تپه‌ها از نوع تپه‌های ستاره‌ای یا قورد خواهند بود [۳۴]. ابعاد تپه‌های ماسه‌ای بسیار متغیر هستند؛ به طوری که عرض تپه‌های ماسه‌ای از یک متر تا حدود یک کیلومتر و محدوده ارتفاعی آن‌ها در حدود ۳۰ سانتی‌متر تا ۳۰۰ متر تغییر می‌کند. در شکل‌گیری ابعاد تپه‌ها، عوامل گوناگونی چون نیروی باد و جهت باد دخالت دارند؛ به گونه‌ای که تپه‌های ماسه‌ای خطی در بادهای شدید که از دو جهت می‌وزند (شاخص UDI به صفر نزدیک است)، دارای ابعاد بزرگ‌تری هستند و فاصله آن‌ها از یکدیگر نسبت به بادهایی که از یک جهت می‌وزند (UDI نزدیک به یک)، کمتر است. پس از محاسبه شاخص‌های فوق، به بررسی شکل تپه‌های ماسه‌ای موجود

۴۳۲۳ متر در فاصله ۱۶ کیلومتری شمال فشم قرار دارد و کم‌ترین ارتفاع منطقه، ۶۵۷ متر از سطح دریای آزاد می‌باشد که در حدود ۴۳ کیلومتری شمال شرق قم در محدوده مطالعاتی مسیله قرار دارد. این حوضه از شمال و شمال غرب به حوضه آبریز رودخانه‌های مازندران و سفیدرود بزرگ، از شرق و جنوب شرق به حوضه‌های آبریز کویر مرکزی و سیاه کوه و گاوخونی، از جنوب و جنوب غرب به حوضه‌های آبریز کارون و کرخه محدود شده است. شیب تدریجی این حوضه به سوی شرق است و سه چاله‌ی اصلی آن، دریاچه نمک، دریاچه حوض سلطان و کویر میقان هستند. متوسط میزان بارندگی ۱۴۰ میلی‌متر و تبخیر و تعرق سالیانه ۱۲۰۸ میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به هدف تحقیق و آمارهای مورد نیاز پژوهش ایستگاه‌های کاشان، گلپایگان، اراک، قم، امام خمینی و قزوین با پراکنش مناسب در سطح حوضه انتخاب گردید که در شکل (۱) نمایش داده شده است. داده‌های بادسنجی دوره آماری ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ به‌عنوان دوره شاخص مطالعاتی برای ایستگاه‌های مربوطه به شرح جدول (۱) مورد بررسی قرار گرفت.

روش تحقیق

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی از نرم‌افزار WRPLOT 8.0.2 و بر اساس داده‌های سمت و سرعت باد بیش‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه در ۶ کلاس و ۸ جهت اصلی و فرعی (شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب، شمال غرب و شمال) گلبادهای سالانه و فصلی برای هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. هم‌چنین با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار مذکور و با در نظر گرفتن سرعت پایه‌ای برابر با سرعت آستانه فرسایش بادی، گلتوفان‌های سالانه و فصلی ایستگاه‌های مورد بررسی تهیه شد.

با استفاده از نرم‌افزار Sand Rose Graph گلماسه ایستگاه‌های مورد مطالعه ترسیم گردید. گلماسه نموداری است که در اثر انجام عملیات پیچیده جبر برداری و محاسبه مقدار انرژی قابل حمل ماسه توسط باد به دست می‌آید. این نمودار بیانگر توان فرسایش بادی و مقدار نسبی حمل ماسه در جهت‌های مختلف جغرافیایی است. با استفاده از نرم‌افزار گلماسه نما از رابطه لئیو و لئیو^۱ (۱۹۷۸) استفاده

1. Lettau

2. Drift Potential total

3 Total amount of sand transported in different directions

4. Fryberger & Dean

5 Uni Directional Index

جدول ۲: ارزیابی قابلیت فرسایش بادی بر اساس محاسبات آماری توان حمل ماسه [۱۵]

قابلیت فرسایش بادی	برآیند جبری	دبی حمل ماسه ۱	برآیند برداری / جبری	تغییرپذیری جهات باد	طبقه‌بندی جهات باد
کم	DP < ۲۰۰	بیش‌تر از ۳۳	UDI < ۰/۳	کم	بادهای یک جهته
متوسط	۲۰۰ < DP < ۴۰۰	بین ۱۷ تا ۳۳	۰/۳ < UDI < ۰/۸	متوسط	بادهای دو جهته با زاویه منفرجه
زیاد	DP > ۴۰۰	کم‌تر از ۱۷	UDI > ۰/۸	زیاد	بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند

جدول ۳: میانگین سرعت باد (m/s) و جهت باد غالب سالانه و فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

نام ایستگاه	سالانه		بهار		تابستان		پاییز		زمستان	
	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب (m/s)	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب (m/s)	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب (m/s)	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب (m/s)	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب (m/s)
اراک	W	۴/۴	W	۴/۶۱	NE	۳/۷۰	W	۴/۶۹	W	۴/۶۹
گلپایگان	NE	۳/۶۱	W	۵/۲۹	NE	۴/۰۶	NE	۵/۵۸	NE	۳/۵۶
فرودگاه امام خمینی (ره)	NW	۶/۲	NW	۶/۶۵	NW	۶/۵۶	NW	۵/۴۲	NW	۵/۲۱
کاشان	NW	۳/۲	NW	۴/۰۵	E	۳/۶۸	NW	۲/۶۷	NW	۲/۴۸
قزوین	SE	۳/۶	SE	۳/۶۰	SE	۳/۵۷	SE	۳/۶۷	SE	۳/۱۹
قم	W	۳/۶	W	۴/۰۹	E	۳/۹۹	W	۳/۸۳	W	۲/۹۰

در منطقه پرداخته شد و انطباق شکل تپه‌های ماسه‌ای با شاخص UDI مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور به دست آوردن برآیند برداری در جهات مختلف بعد از تجزیه نیروها در امتداد محورهای طولی و عرضی بردار برآیند DPt محاسبه گردید. هم‌چنین RDP^۱ برآیند برداری پتانسیل حمل ماسه، RDD^۲ جهت حمل ماسه و نیز مقدار کل ماسه حمل شده در جهات مختلف بر حسب کیلوگرم بر متر در سال برآورد گردید. در نهایت قدرت حمل ماسه و توان فرسایشی باد بر اساس تقسیم‌بندی استاندارد فرایبرگر بر اساس جدول (۲) انجام شد.

در پایان پس از انجام محاسبات در سامانه اطلاعات جغرافیایی، پتانسیل حمل ماسه و یا مقدار کل ماسه حمل شده در جهات مختلف به صورت سالانه و فصلی در منطقه مورد مطالعه پهنه‌بندی شده است.

نتایج و بحث

زمین‌های خشک در بسیاری از نقاط جهان توزیع شده است. اثرات ترکیبی سوء مدیریت اراضی، استفاده ناپایدار از آب و تغییرات اقلیمی باعث تبدیل بسیاری از مناطق به دیم و در نتیجه افزایش مناطق بیابانی و تشکیل تپه‌های ماسه‌ای بادی شده است [۶]. در این مقاله پهنه‌بندی خطر حمل ماسه‌های بادی و ارتباط آن با پتانسیل حمل ماسه توسط بادهای فرساینده در ایستگاه‌های سینوپتیک

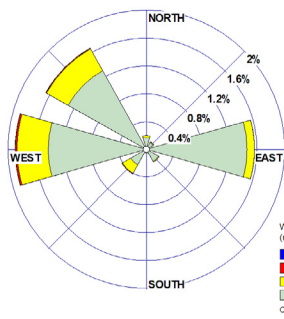
حوضه دریاچه نمک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از گلبادهای سالانه و فصلی هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه در جدول (۳) بر اساس متربرثانه و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین ارائه شده است. بیش‌ترین متوسط سرعت باد به ترتیب در فصل بهار، تابستان و پاییز با جهت شمال غربی مربوط به ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) و در فصل زمستان با جهت جنوب غربی مربوط به ایستگاه گلپایگان و کم‌ترین متوسط سرعت باد در فصل بهار و تابستان در ایستگاه قزوین با جهت جنوب شرقی و در فصل پاییز و زمستان در ایستگاه کاشان با جهت شمال غربی و جنوب غربی است. جهت باد غالب در ایستگاه‌های مورد مطالعه غرب و شمال غربی می‌باشد که بررسی وضعیت اطلاعات مربوط به بادهای منطقه بیانگر این است که تحت تأثیر عوامل مختلف جغرافیایی خصوصاً توپوگرافی، میزان سرعت، جهت و قدرت حمل در منطقه مورد مطالعه تفاوت زیادی دارد که با نتایج به دست آمده در شناسایی کانون‌های گردوغبار بر مبنای خصوصیات باد در استان قم مشخص گردید که جهت باد غالب در ایستگاه‌های مورد مطالعه متفاوت می‌باشد [۱۹].

نتایج حاصل از گلفان‌های سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک در شکل (۲) نشان داد که ایستگاه قزوین با ۶۳/۱۳ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین با جهت جنوب شرقی در فصل بهار بیش‌ترین و ایستگاه اراک با ۴/۸/۸ متر بر

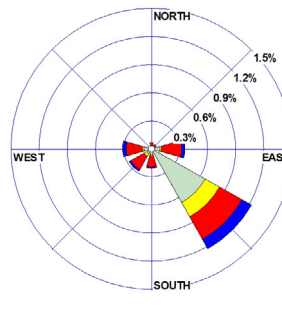
1. Resultant drift potential
2. Resultant drift direction

جدول ۴: میانگین سرعت باد و جهت باد غالب سالانه و فصلی بر اساس سرعت آستانه فرسایش در ایستگاه‌های مورد مطالعه

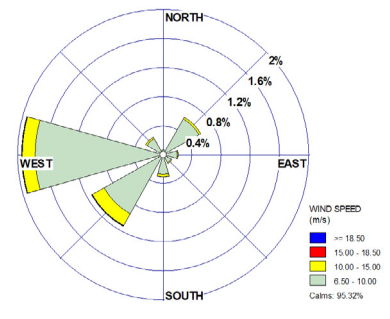
نام ایستگاه	سالانه		بهار		تابستان		پاییز		زمستان	
	میانگین سرعت باد غالب	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب	جهت باد غالب	میانگین سرعت باد غالب	جهت باد غالب
اراک	۸/۷۴	W	۸/۷۷	W	۸/۴۸	NW	۸/۶۶	W	۸/۸۹	W
گلپایگان	۹/۵۹	NE	۹/۶۶	SW	۹/۱	W	۹/۵	W	۹/۷۵	SW
فرودگاه امام خمینی (ره)	۹/۷۰	NW	۹/۷۵	NW	۹/۶۷	NW	۹/۴۴	NW	۹/۶۷	NW
کاشان	۹/۶۲	NW	۹/۸۴	SW	۹/۱۳	E	۹/۵۶	SW	۱۰/۱۳	SW
قزوین	۱۲/۹۷	SE	۱۱/۸۷	SE	۱۲/۱۱	SE	۱۳/۶۳	SE	۱۱/۸۹	SE
قم	۹/۱۰	W	۹/۱۱	NW	۸/۵۴	E	۹/۱۷	NW	۹/۴۱	W



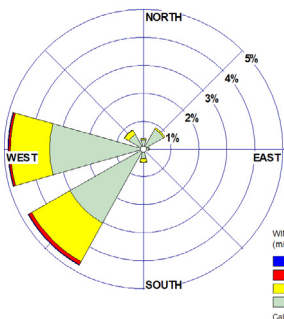
ایستگاه قزوین



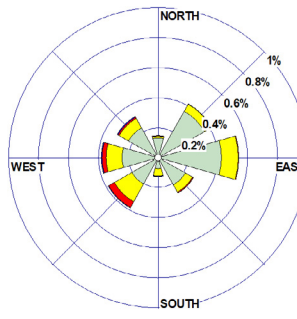
ایستگاه امام خمینی (ره)



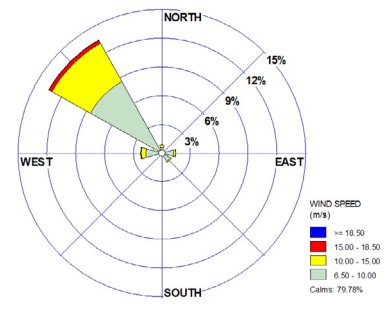
ایستگاه اراک



ایستگاه گلپایگان



ایستگاه کاشان

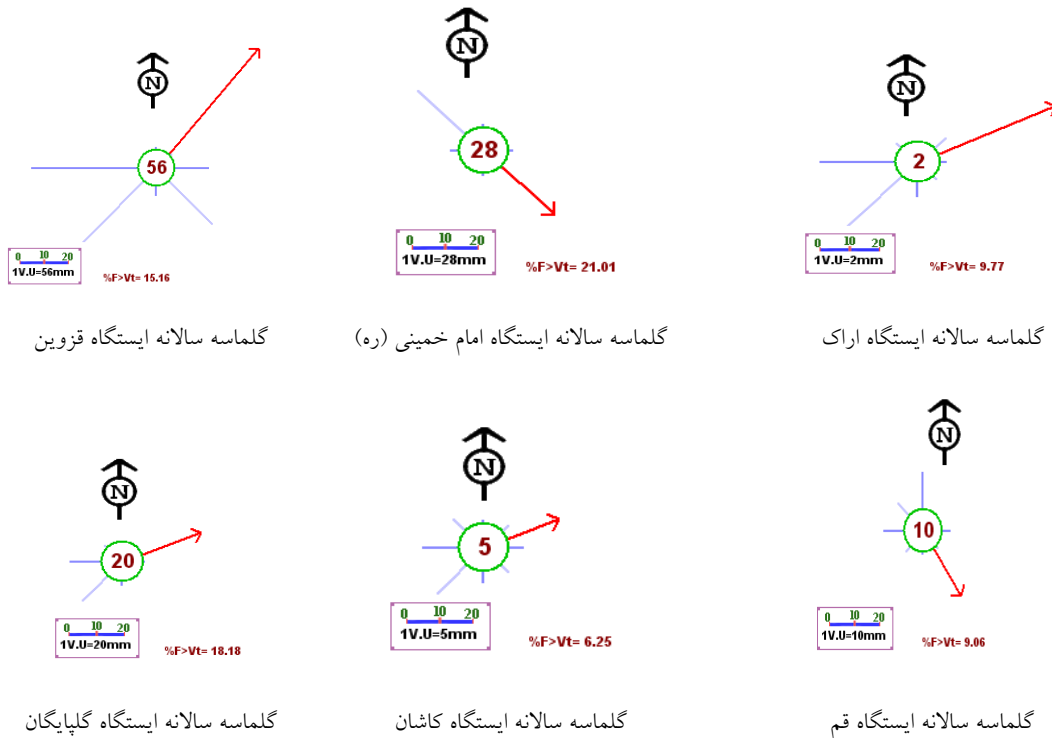


ایستگاه قم

شکل ۲: گلتوفان‌های سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک

حمل ماسه در ایستگاه قزوین با $4220/2$ واحد برداری که نشان از قدرت فرسایشی بالا و کم‌ترین مقدار برآیند در ایستگاه اراک با $93/1$ واحد برداری بود که نشان از قدرت فرسایشی کم است. شاخص همگنی جهت باد بیانگر این است که عموماً ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه بین $0/38$ تا $0/818$ می‌باشد که در ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) دارای رژیم بادی بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند و در سایر ایستگاه‌ها بادهای دوجهته با زاویه باز است. شاخص همگنی در پیش‌بینی نحوه شکل‌گیری و پیشرفت رخساره‌های بادی نقش بسزایی دارد. از نسبت UDI می‌توان به‌منزله یک شاخص کلیدی مناسب جهت تفسیر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای استفاده

ثانیه با جهت شمال غربی در فصل تابستان کم‌ترین سرعت آستانه فرسایش بادی را دارند (جدول ۴). جهت بادهای فرساینده در ایستگاه‌های مورد مطالعه غرب و شمال غربی می‌باشد که در مطالعه بادهای فرساینده حاشیه دریاچه ارومیه جهت بادهای فرساینده جنوب و جنوب غربی می‌باشد [۲۶] هم‌چنین در مطالعه شهریار و همکاران [۳۳] در شناسایی منشأ و مسیر انتقال ماسه در محدوده تپه‌های ماسه‌ای دروازه قرآن یزد، امتداد شمال غربی، نقش مهمی در شکل‌گیری، توسعه و جابه‌جایی ماسه‌ها ایفا می‌کنند. ارزیابی گلماسه سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۵) و شکل (۳) نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار برآیند جبری پتانسیل



شکل ۵: گلماسه‌های سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک

جدول ۵: شاخص‌های اصلی گلماسه ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک

DSF	TSF	RQs	Qs	RDP/DPT	RDD	RDP	DPt	نام ایستگاه
۵۳۷۰/۱۱	۸۶۳۱/۶۴	۱/۸۴	۲/۹۶	۰/۶۱۵	۶۵	۵۷/۲۷۱	۱/۹۳	اراک
۴۱۸۳۷/۱۴	۵۲۸۹۲/۹۶	۱۴/۳۳	۱۸/۱۱	۰/۷۹	۶۸	۳۰۰/۰۸۸	۸/۳۷۹	گلپایگان
۸۰۲۳۸/۷۹	۹۸۱۶۱/۹۲	۲۷/۴۸	۳۳/۶۲	۰/۸۱۸	۱۳۴	۴۱۱/۵۹۷	۵۰۳	فرودگاه امام خمینی (ره)
۳۵۷۶/۶۹	۹۳۴۴/۹	۱/۲۲	۳/۲	۰/۳۸۱	۶۷	۵۵/۵۴۳	۱۴۵/۶	کاشان
۲۵۵۱۰/۹	۷۳۵۲۳/۹	۸۷/۳۶	۲۵۱/۷۹	۰/۴۶۴	۴۰	۲۱۴۳/۵۹۳	۴۲۲۰/۲	قزوین
۱۸۲۵۳/۹۷	۳۲۰۷۸/۴۸	۶/۲۵	۱۰/۹۹	۰/۵۷۱	۱۴۶	۱۲۹/۸	۲۲۷/۴	قم

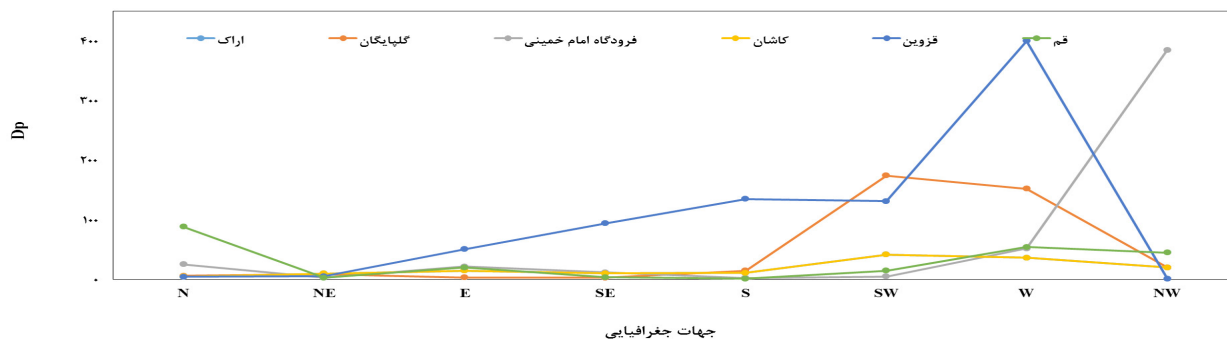
موردمطالعه نشان می‌دهد که جهت حرکت ماسه‌ها در ایستگاه‌های اراک، گلپایگان، کاشان و قزوین جنوب غربی به شمال شرقی و در ایستگاه‌های امام خمینی (ره) و قم از شمال غربی به جنوب شرقی می‌باشد (شکل، ۶) که با مطالعه راهی و همکاران [۲۹] در ارزیابی وضعیت فرساینده‌گی باد و پهنه‌بندی پتانسیل حمل ماسه در استان بوشهر مطابقت دارد.

نتایج گلماسه‌های فصلی ایستگاه‌های حوضه دریاچه نمک در جدول (۶) و شکل (۷) نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار برآیند جبری به پتانسیل حمل ماسه از نظر فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در هر ۴ فصل در ایستگاه قزوین و فصل بهار با $۱۶۱۶/۳$ واحد برداری مشخص گردید. هم‌چنین مقدار کل ماسه حمل شده در جهات مختلف به صورت فصلی نیز در ایستگاه قزوین و فصل بهار با مقدار $۲۸۱۵۶۲/۶$ کیلوگرم در متر بر سال مشاهده شد. کم‌ترین مقدار برآیند جبری به پتانسیل حمل ماسه از نظر فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل بهار، تابستان و پاییز در ایستگاه اراک و در فصل پاییز در ایستگاه کاشان مشاهده گردید.

کرد [۳۹]. فرایبرگر [۱۵] و واسون و هدی [۳۷] نیز در پژوهش‌های خود بیان کرده‌اند که در شرایطی که مقدار عددی UDI کم‌تر از $۰/۵$ باشد، امکان شکل‌گیری تپه‌های طولی و سیلک‌های دندان‌های کشیده و سیف زیاد می‌شود که بر این اساس شکل تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) بیش‌تر به صورت بارخان و در سایر ایستگاه‌ها به صورت بارخان‌های طولی و تپه‌های خطی (سیف و سیلک) می‌باشد. یافته‌های گودی [۱۷] مبین این است که تغییرپذیری جهت باد در حدود $۰/۶۸ - ۰/۵$ در کلاس کم تا متوسط باعث تشکیل تپه‌های هلالی می‌شود که با یافته‌های این تحقیق همخوانی دارد. هم‌چنین با مطالعه [۱۳] در تحلیل فرسایش بادی و تعیین جهت حرکت ماسه‌های روان منطقه جاسک و نتایج زنگنه تبار و همکاران [۴۰] در تحلیل فرساینده‌گی باد و پتانسیل حمل ماسه‌های روان واقع در قلمرو بیابان لوت مطابقت دارد.

مقایسه جهت بردار برآیند توان حمل ماسه (RDD) در ایستگاه‌های

1. Fryberger
2. Wasson & Hyde



شکل ۶: پتانسیل حمل ماسه در جهت‌های مختلف در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک

جدول ۶: نتایج فصلی پتانسیل حمل ماسه و برآورد حمل ماسه ایستگاه‌های مورد مطالعه

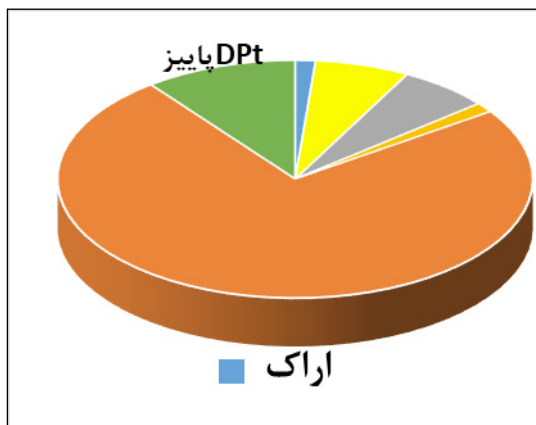
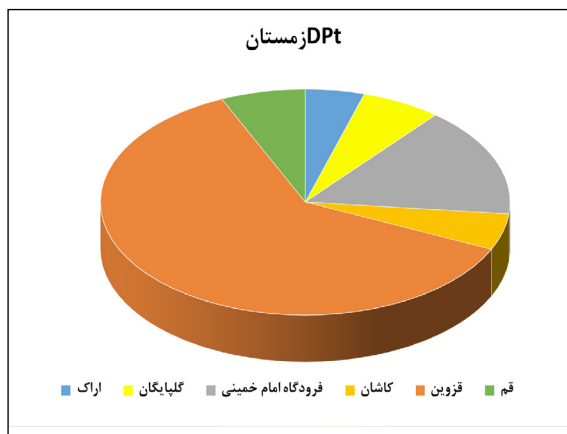
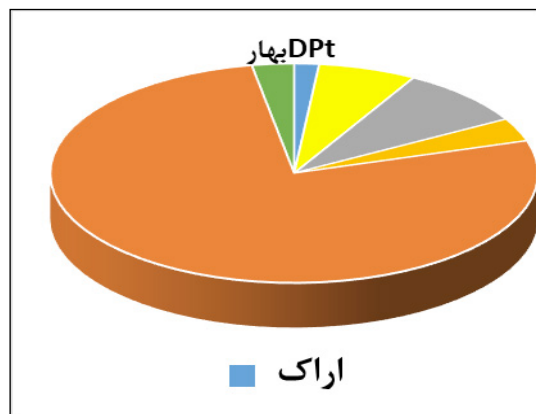
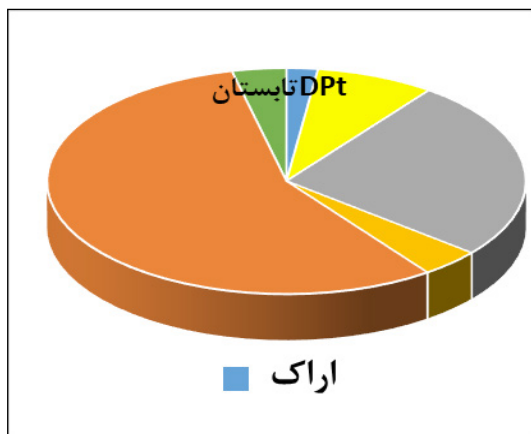
تابستان				بهار				نام ایستگاه
RDP	UDI	TSF	DPt	RDP	UDI	TSF	DPt	
۳/۶۰۶	۰/۲۹۳	۱۱۳۹/۴۳	۱۲/۳	۲۳/۴۰۹	۰/۶۸	۳۲۰۷/۲	۳۴/۴	اراک
۲۴/۰۸۳	۰/۵۱۳	۶۷۷۲/۱۶	۴۶/۹	۱۰۹/۹۳۲	۰/۸۰۶	۱۹۴۷۱/۸۶	۱۳۶/۴	گلپایگان
۱۱۳/۰۷۱	۰/۷۴۹	۲۹۴۸۴/۶۲	۱۵۰/۹	۱۴۶/۴۵۵	۰/۸۰۸	۳۵۳۷۶/۳۹	۱۸۱/۲	فرودگاه امام خمینی
۱۱/۰۴۵	۰/۴۶۸	۱۵۱۰/۳۷	۲۳/۶	۳۰/۴۶۳	۰/۴۲۱	۴۶۳۰/۳۹	۷۲/۳	کاشان
۱۱۲/۳۷۹	۰/۳۴۱	۶۶۳۵۱/۳۳	۳۲۹/۲	۱۲۷۵/۷۶۹	۰/۷۸۹	۲۸۱۵۶۲/۶	۱۶۱۶/۳	قزوین
۱۶	۰/۷۴۸	۳۰۲۲/۲۴	۲۱/۴	۳۸/۰۷۹	۰/۶۵۲	۸۲۵۵/۸۴	۵۸/۴	قم
زمستان				پاییز				نام ایستگاه
RDP	UDI	TSF	DPt	RDP	UDI	TSF	DPt	
۲۷/۴۵۹	۰/۸۳۵	۳۱۰۷/۸	۳۲/۹	۹/۸۴۹	۰/۷۴۱	۱۲۱۰/۳۵	۱۳/۳	اراک
۳۸/۹۷	۰/۸۷۳۱۷۹	۱۸۱۱۳/۸۲	۴۴/۶۳	۵۱/۶۲۴	۰/۸۳۱	۸۴۳۲/۰۴	۶۲/۱	گلپایگان
۹۷/۴۵۳	۰/۸۸	۲۱۵۶۱/۲۷	۱۱۰/۸	۵۵/۹۷۳	۰/۹۳	۱۱۷۵۴/۳۳	۶۰/۲	فرودگاه امام خمینی
۲۴/۳۵۲	۰/۶۶۴	۲۳۶۴/۵۹	۳۶/۷	۱۰/۴۴۴	۰/۸۱۶	۸۳۰/۰۳	۱۲/۸	کاشان
۱۸۲/۸۳۳	۰/۴۲۲	۷۶۲۹۶/۸۵	۴۳۳/۶	۳۸۴/۱۹۴	۰/۵۳۶	۱۵۱۰۰/۵/۱	۷۱۶/۷	قزوین
۴۰/۰۲۵	۰/۸۴۸	۶۶۴۳/۱	۴۷/۲	۹۰/۷۹۶	۰/۹۰۵	۱۴۱۶۱/۱۷	۱۰۰/۳	قم

این است که بیش‌ترین پتانسیل حمل ماسه در ایستگاه قزوین است و ایستگاه‌های فوق متاثر از بادهای متعدد فرعی با جهات گوناگون در فصول مختلف سال به‌ویژه در بهار و زمستان است.

با توجه به اینکه هر واحد بردار توانایی حمل ۰/۰۷ مترمکعب ماسه را در عرض یک متر از زمین می‌تواند داشته باشد [۱۴]. با در نظر گرفتن میانگین ۹۳/۱۰ واحد برداری برای اراک، قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود ۶/۵ مترمکعب در واحد عرض بوده و برای ایستگاه گلپایگان با میانگین ۳۷۹/۸۰ واحد برداری قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود ۲۶/۶ مترمکعب در واحد عرض به دست آمد. هم‌چنین قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال برای فرودگاه امام خمینی (ره) با میانگین ۵۰۳ واحد برداری معادل ۳۵/۲ مترمکعب در واحد عرض و برای ایستگاه کاشان قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال با میانگین ۱۴۵/۶ واحد برداری معادل ۱۰/۲ مترمکعب در واحد عرض بود، برای ایستگاه قزوین نیز با میانگین ۴۲۲۰/۲۰ واحد برداری، قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در

شاخص همگنی جهت باد بیانگر این است که عموماً در ایستگاه اراک، در فصل بهار و پاییز بادهای دوجبهته با زاویه باز و در فصل تابستان بادهای یک‌جبهته و در فصل زمستان بادهای چندجبهته مرکب با زاویه تند وجود دارد. در ایستگاه‌های گلپایگان و فرودگاه امام خمینی (ره) در فصل بهار، پاییز و زمستان بادهای چندجبهته مرکب با زاویه تند و در فصل تابستان بادهای دوجبهته با زاویه باز مشاهده گردید، در ایستگاه کاشان فصل بهار، تابستان و زمستان بادهای دوجبهته با زاویه باز و در فصل پاییز بادهای چندجبهته مرکب با زاویه تند وجود داشت، در ایستگاه قزوین هر ۴ فصل بادهای دوجبهته با زاویه باز و در ایستگاه قم فصل‌های بهار و تابستان بادهای دوجبهته با زاویه باز و فصل‌های پاییز و زمستان بادهای چندجبهته مرکب با زاویه تند می‌باشند.

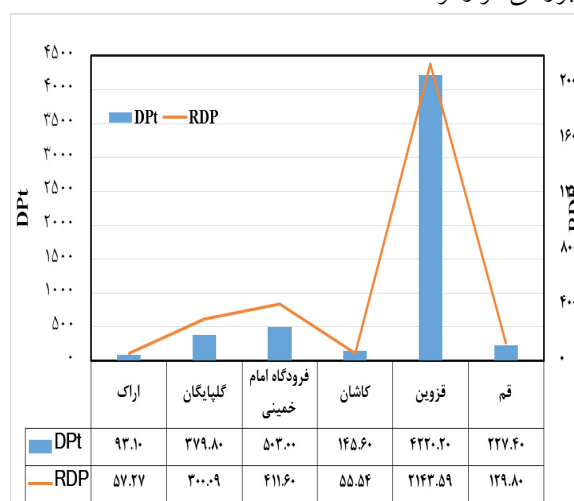
رابطه پتانسیل حمل ماسه و برآورد برآیند برداری که نشان‌دهنده قدرت جابه‌جایی ماسه در یک‌جهت خاص است، بر اساس ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است، نتایج بیانگر



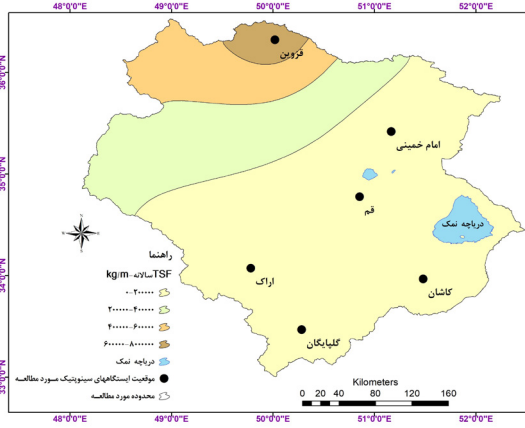
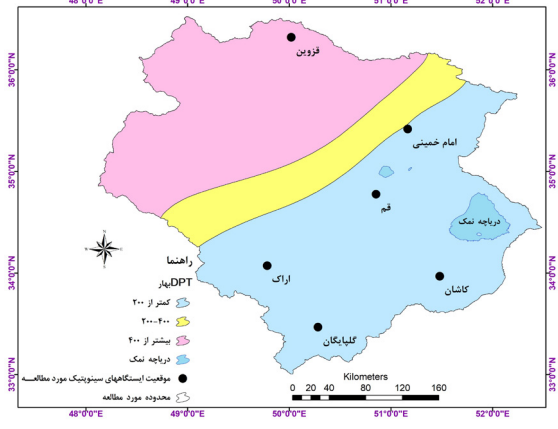
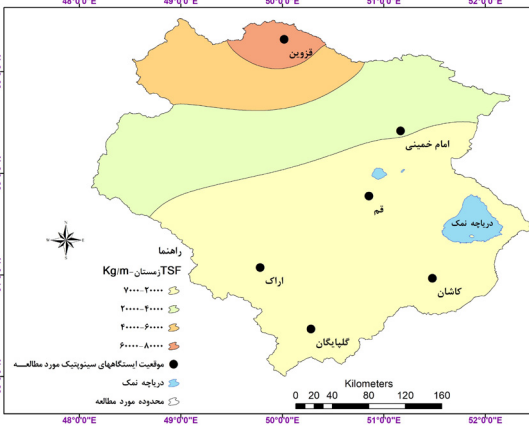
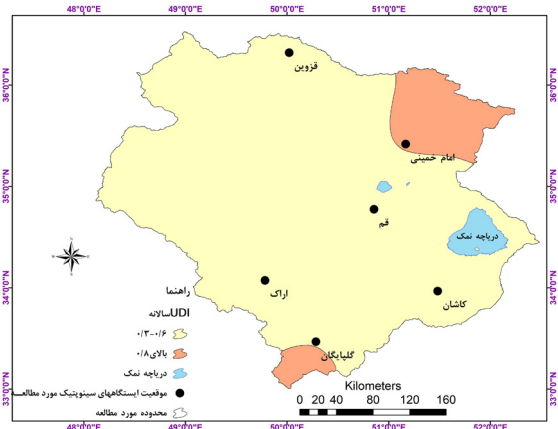
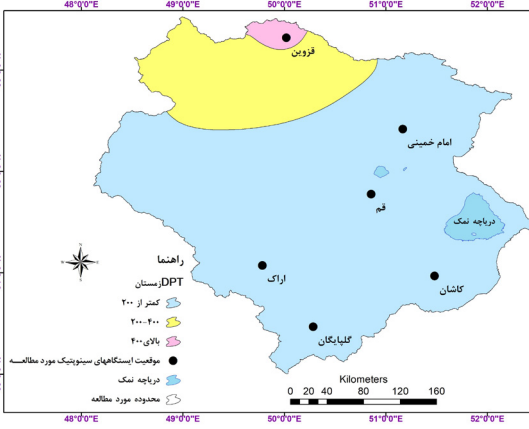
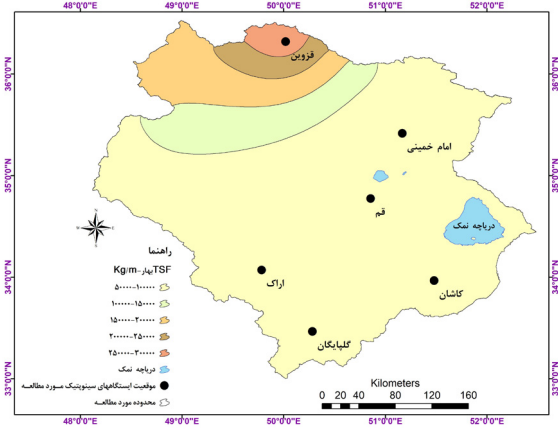
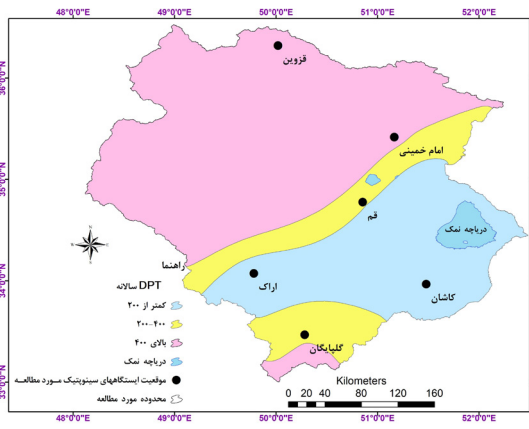
شکل ۷: نتایج فصلی پتانسیل حمل ماسه و برآورد حمل ماسه ایستگاه‌های مورد مطالعه

پتانسیل نهایی حمل ماسه‌ها و برآورد مقدار کل حمل ماسه سالانه و فصل‌های زمستان و بهار که مؤثر در فرسایش هستند در شکل (۹) پهنه‌بندی گردید. پهنه‌بندی پتانسیل حمل ماسه سالانه مقدار ۹۰ تا ۴۲۲۰ واحد برداری، در فصل بهار بین ۳۰ تا ۱۶۲ هزار واحد برداری و در فصل زمستان بین ۳۰ تا ۴۳۵ واحد برداری به دست آمد. نتایج پهنه‌بندی برآورد توان حمل ماسه سالانه ۲۰۰۰۰۰-۸۰۰۰۰۰۰ تن در متر بر سال، در فصل بهار ۵۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰۰ تن در متر بر سال و در فصل زمستان ۲۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ تن در متر بر سال را نشان داد. بر اساس نقشه شاخص همگنی بیش‌ترین اشکال تپه‌های ماسه‌ای از نوع بارخان طولی می‌باشد؛ که در مطالعه راهی و همکاران [۲۹] در راستای ارزیابی وضعیت فرسایش‌گری باد در استان بوشهر، فصول فرسایش‌زای زمستان و بهار است.

سال حدود ۲۹۵/۴ مترمکعب در واحد عرض و در ایستگاه قم با میانگین ۲۲۷/۴ واحد برداری قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود ۱۵/۹ مترمکعب در واحد عرض برآورد گردید که در مقاله اکبرپور و همکاران [۵] در بررسی ویژگی‌های رژیم بادی و پتانسیل حمل ماسه در تپه‌های ساحلی قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۸: رابطه پتانسیل حمل ماسه و برآیند توان حمل ماسه ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۹: پهنه‌بندی سالانه و فصلی پتانسیل توان حمل ماسه و برآورد مقدار کل حمل ماسه بر اساس ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق سعی شد با استفاده از داده‌های مربوط به باد ایستگاه‌های هواشناسی حوضه دریاچه نمک، جهت باد و میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و الگوی مهاجرت تپه‌ها شناسایی گردد. نتایج حاصل از گلبادها نشان داد که بیش‌ترین متوسط سرعت باد در فصل بهار با جهت شمال غربی مربوط به ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) و کم‌ترین متوسط سرعت باد در فصل پاییز در ایستگاه کاشان با جهت شمال غربی وجود دارد. هم‌چنین نتایج حاصل از گلتوفان‌های سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه نمک نیز نشان داد که ایستگاه قزوین با $13/63$ متر بر ثانیه با جهت جنوب شرقی در فصل بهار بیش‌ترین و ایستگاه اراک با $8/48$ متر بر ثانیه با جهت شمال غربی در فصل تابستان کم‌ترین سرعت آستانه فرسایش بادی را دارند.

ارزیابی گلماسه سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار برآیند جبری پتانسیل حمل ماسه در ایستگاه قزوین با $220/2$ واحد برداری و کم‌ترین مقدار برآیند در ایستگاه اراک با $93/1$ واحد برداری است. شاخص همگنی جهت باد در ایستگاه فرودگاه امام خمینی (ره) دارای رژیم بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند و در سایر ایستگاه‌ها بادهای دوجته با زاویه باز است.

در گلماسه‌های فصلی ایستگاه‌های حوضه دریاچه نمک مشاهده شد که بیش‌ترین مقدار برآیند جبری به پتانسیل حمل ماسه از نظر فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در هر ۴ فصل در ایستگاه قزوین و فصل بهار رخ می‌دهد، هم‌چنین مقدار کل ماسه حمل شده در جهات مختلف به صورت فصلی نیز در ایستگاه قزوین و فصل بهار مشاهده می‌شود. کم‌ترین مقدار برآیند جبری پتانسیل حمل ماسه از نظر فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل بهار، تابستان و پاییز در ایستگاه اراک و در فصل پاییز در ایستگاه کاشان مشاهده گردید.

رابطه پتانسیل حمل ماسه و برآورد برآیند برداری که نشان‌دهنده قدرت جابه‌جایی ماسه در یک جهت خاص می‌باشد، در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که بیش‌ترین پتانسیل حمل ماسه در ایستگاه قزوین و ایستگاه‌های فوق متاثر از بادهای متعدد فرعی با جهات گوناگون در فصول مختلف سال به‌ویژه در بهار و زمستان است. با در نظر گرفتن توانایی حمل هر واحد بردار، بیش‌ترین قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود $295/4$ مترمکعب در واحد عرض در ایستگاه قزوین و کم‌ترین قابلیت جابه‌جایی میزان ماسه در سال حدود $6/5$ مترمکعب در واحد عرض در ایستگاه اراک برآورد گردید.

یافته‌های این پژوهش نشان از پتانسیل بالای بادهای حوضه دریاچه نمک به‌ویژه ایستگاه قزوین در تولید رسوب ناشی از فرسایش بادی دارد. مناطق مختلف این حوضه، وضعیت سمت و سرعت‌های مختلفی از باد را تجربه کرده که این موضوع بر جهت

حمل ذرات رسوب و نیز شکل‌گیری عوارض و رخساره‌های مختلف فرسایش بادی مؤثر بوده است. از طرفی، اهمیت تحلیل داده‌های بادسنجی در تعیین بهتر پتانسیل فرسایش بادی و نیز پتانسیل حمل ماسه‌بادی در حوضه دریاچه نمک مشخص گردید. نتایج هم‌چنین نشان داد که در فصل‌های مختلف سال و موقعیت‌های مکانی متفاوت، سرعت و جهت بادهای فرساینده متفاوت است. ناهمگنی در موقعیت رخساره‌ها، بادهای فزاینده در فصل‌های مختلف سال و تفاوت در سرعت‌های آستانه فرسایش بادی در اراضی باعث ایجاد چنین تنوعی می‌شود [۳۵]. میزان خطر فرسایش بادی در این حوضه در فصل‌های پاییز و تابستان حداقل و در فصل‌های بهار و زمستان حداکثر بود.

منابع

1. Abbasnejad, A., and Zahab Nouri, S. 2012. Identify the forms of wind erosion of Rafsanjan plain. Quantitative geomorphologic research. 1 (2): 127-144. (In Persian)
2. Abassi, H.R., kashki, M., Rahdari, M.R., gohardoust, A., and Lotfi Nasab Asl, S. 2020. The Features of Wind's Regime and Sand Transport Potential in Sarakhs Erg. Iranian Journal of Range and Desert Research. 27 (2): 372-384. (In Persian)
3. Adhikari, P. 2017. Assessment of Wind Regime and Sediment Transport Activity at Oceano Dunes, California, Thesis Master of Science.
4. Ahmadi, H. 2012. Applied Geomorphology, Tehran University Publications (In Persian)
5. Akbarpour Bonab B, Hanifehpour M, Biabani L., and 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 (In Persian)
6. Altameemi, Z., and Al-Taie, A. 2022. Sand Dunes Reviewing: Wind Effect and Dunes Classification, Algerian Journal of Engineering and Technology (AJET), 7: 1-8.
7. Ashkenazy, Y., Yizhaq, H. and Tsoar, H. 2012. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts, Climatic Change 112(3): 1-23.
8. Delgado-Fernandez, I., and Davidson-Arnott, R. 2011. Meso-scale aeolian sediment input to coastal dunes: the nature of aeolian transport events

- Anari, A. 2022. Identification of dust centers based on wind characteristics and land cover condition (Case study: Qom province). *Quantitative geomorphologic research*, 11(1): 44-61. (In Persian)
20. Kojas, S.F. 2015. Sand dune movement and its impact on human activities in the North Western coast region of Libya. An analysis of the sediment characteristics of sand dunes, and their movement using satellite images, and the effects of encroachment on farms assessed by a questionnaire survey. University of Bradford.
21. Levin, N., Kidron, G.J., and Ben-Dor, E. 2008. A field quantification of coastal dune perennial plants as indicators of surface stability, erosion or deposition *Sedimentology*, 55 (4): 751-772.
22. Livingstone, I., Bristow, C., Bryant, R.G., Bullard, J., White, K., Wigs, G.F.S., Baas, A.C.W., Bateman, M.D., and Thomas, D.S.G. 2010. The Namib Sand Sea Digital Database of aeolian dunes and key for cing variables. *Aeolian Research*, 12, 93–104.
23. Miller, T., Gornish, E.S., and Buckley, H.L. 2010. Climate and coastal dune vegetation: Disturbance, recovery, and succession, *Plant Ecology* 206(1):97-104.
24. Mirhasani, M., Rostami, N., Bazgir, M., and Tavakoli, M. 2018. An Investigation of Land-Use Effect on Dust Concentration and Soil Loss in Desert Areas: A Case of Ein Khosh-Dehloran, Ilam. *Journal of Environmental Erosion Research*. 8 (1):1-20 (In Persian)
25. Mirhasani, M., Rostami, N., Bazgir, M., and Tavakoli, M. 2021. The Role of Biological Windbreak in the Creation of Microclimate in Arid Areas of Dehloran, Ilam, *Geography and Sustainability of Environment*, 10(4): 73-90 (In Persian)
26. Nazari Samani, A.A., Biabani, L., Abbasi, H.R., and 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 (IJRDR)*, 25(3): 594-612. (In Persian)
27. Nazari Samani, A.A., Tavakkoli Fard, A., Ghasemieh, H. Mashhadi, N., and rahdari, M.R. 2017. Integration of anemometers data and geomorphology *Geomorphology*, 126 (1–2): 217-232.
9. Dong, Z., Chen, G., He, X., Han, Z., and Wang, X. 2005. *Journal of Arid Environments*, 57(3): 329-344.
10. Dong, Z., Qian, G., Lv, P., and HU, G. 2013. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. *Earth-Science Reviews*, 120, 20–39.
11. Durán, O., Eric, P., and Herrmann, H.J. 2010. A continuous model for sand dunes: Review, new developments and application to barchan dunes and barchan dune fields, *Earth Surface Processes and Landforms* 35(13):1591 – 1600.
12. Ekhtesasi, M. R., Saremi naeini, M. A., and Saremi. Naeini, A. 2005. Software design Sand Rose (Sand rose graph 2.0) processor, Soil erosion and sediment transport wind. The first national conference on wind erosion, Iran, Yazd. 9p. (In Persian)
13. Ekhtesasi, M. R., and Dadfar, S. 2013. Investigation of the relationship between hurricanes on the southern coasts of Iran and the morphology of sand dunes, *Natural Geography Research*, 45 (4), 72-61. (In Persian)
14. Fryberger, S.G. and Dean. G. 1979. Dune form Sand Wind regime. United States Geological Survey. In: Professional Paper, p. 137-140.
15. Fryberger, S.G. 1984. Dune forms and wind Regimes, in E.D. McKee (ed), *A Study of Global Sand Seas*, 137-140, United States Geological Survey, Professional Paper.
16. Gao, J., Kennedy, D.M., and Konlechner, T.M. 2020. Coastal dune mobility over the past century: A global review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(6): 814-836.
17. Goudie, A.S., and Viles, H.A. 2015. Landscapes and Landforms of Namibia, Part of the book series: *World Geomorphological Landscapes (WGLC)*
18. Hermas, E., Leprince, S., and El-Magd, I. A. 2012. Retrieving Sand Dune Movements Using Sub-Pixel Correlation of Multi-Temporal Optical Remote Sensing Imagery, Northwest Sinai Peninsula, Egypt. *Remote Sensing of Environment* 121, 51-60.
19. Karam, A., Sffari, A., Ahmadabadi A., and

36. Sparavigna, A. C. 2013. A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. *The International Journal of Sciences* 2 (8): 33-42.
37. Tavakkoli Fard, A., Nazari Samani, A.A., Mashhadi, N., Ghasemieh, H., and Hodayi Arani, M. 2014. Investigation of granulometry of aeolian sediments in relation of sand dune morphology (Case study: Kashan Erg). *Iranian Journal of Natural Resources*. 67(2): 189-202. (In Persian)
38. Tsoar, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 357: 50-56.
39. Wasson, R. J., and Hyde, R. 1983. Factors Determining Desert Dune Type, *Nature*, 304:337- 339.
40. Zangenehtabar, S., maghsoudi, M., menbari, F., and 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. (In Persian)
41. Zhang, Z., Dong, Z., and Li, C. 2015. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert. *Journal of Aeolian Research*. 17: 1-13.
42. Yamani, M., and Gourabi, A. 2011. The role of urban management in achieving sustainable development of urban tourism in the city of Kermanshah. *Arid Regions Geographic Studies* 1 (4). (In Persian)
43. Yasien Al-Gurairy, A. S., and 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.
- of sand dunes in Kashan Erg, *Iranian Journal of Natural Resources*. 24(1): 67-79. (In Persian)
28. Rahdari, M.R., and Rodríguez-Seijo, A. 2021. Monitoring Sand Drift Potential and Sand Dune Mobility over the Last Three Decades (Khartouran Erg, Sabzevar, NE Iran), *sustainability*, 13(9050):1-16.
29. Rahi, Gh, Abbasi, H., Goli, A.M., and Biabani, L. 2023. Assessment of Wind Erosivity and Zonation of Potential Sand Drifts Over the Bushehr Province to Identify Dust Emission Sources, Extension and Development of Watershed Management, 11(41): 32-43. (In Persian)
30. Redsteer, M. H., Kelley, K. B., and Francis, H. 2011. Monitoring and Analysis of Sand Dune Movement and Growth on the Navajo Nation, Southwestern United States. *USGS Survey Fact Sheet* 2011-3085.
31. Sadeghi, M., Karimi Ahmadabad, M., Ekhtesasi, M.R., and Rajabi, M.R. 2015. Impact of erosive winds on morphology of sand dunes in Semnan Plain. *Journal of Watershed Engineering and Management* 7(1): 53-63. (In Persian)
32. Schuster, M., Durringer, P., Ghienne, JF., Vignaud, P., Mackaye, HT., Likus, A., and Brunet, M. 2006. The age of the Sahara Desert. *Science*. 311(5762):821.
33. Shahriar, A., Mazidi, A., Sharifi Pichoun, M., and 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. (In Persian)
34. Shahriar, A., and Taherinejad, K. 2018. The Role of Wind Direction and Unidirectional Index in the Time Development and Determining the Sand Dunes Morphology (Case Study: Sadegh Abad Erg-Bafq). *Quaternary journal of Iran*. 4(2): 201-214. (In Persian)
35. Sharifi Paichoon, M., Omidvar, K., and Miri, Z. 2020. Morphological study of the sand dunes in Zarrin Erg and its adaptation to the regional wind data, *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 8(1): 1-27. (In Persian)



Abstract

The Role of Wind Erosion and Zonation of Sand Transport in Order to Identify the Shapes of Sand Dunes

F. Zolfaghari^{1*}, M. Hanifehpour² and L. Biabani³

Received: 2024/07/21 Accepted: 2024/09/30

Wind is the main factor in the destruction and erosion of arid and semi-arid areas, and in order to prevent its destructive effects, sufficient knowledge of the characteristics of the winds in the region must be obtained. The purpose of this research is to investigate the erosive wind regimes using hourly data of wind speed and direction to draw sand rose, wind rose, storm flowers and also the potential of sand transport in 6 stations located in the Salt Lake basin to determine the speed classes. The wind and the ability to carry sand and its effect on the formation of sand dunes. By examining the relationship between the spatial pattern and the state of excitability of erosive winds, the conditions for the formation and expansion of sand dunes are determined. In this research, using WRPLOT and Sand Rose Graph software, anemometer data of 6 synoptic stations of Arak, Golpaygan, Imam Khomeini Airport (RA), Kashan, Qazvin and Qom were analyzed and analyzed in a statistical period of 20 years (2002-2021). The zoning of the final potential of sand transport and its annual and seasonal values were prepared using ArcGIS software. The results of the annual Wind Roses of the region showed that despite the great temporal and spatial changes of the wind in the region, most of the prevailing winds blow from the northwest and then the west. The annual storm flowers of the region showed that most of the dominant and erosive winds blow from the northwest. The annual assessment of Sand Rose in the studied stations shows that the highest value of the algebraic result of the sand carrying potential occurs at Qazvin station with 4220.2 vector units and the lowest value of the result occurs at Arak station with 93.1 vector units. The wind direction homogeneity index at Imam Khomeini Airport station (RA) has a wind regime of mixed multidirectional winds with a sharp angle, and in other stations, bidirectional winds with a wide angle occur. Taking into account the carrying capacity of each vector unit, the highest transferability of the amount of sand per year is about 295.4 cubic meters per unit of width at Qazvin station and the lowest transferability of sand per year is about 6.5 cubic meters per unit of width at the station. Arak was estimated. The high potential of the winds of the Namak Lake basin, especially the Qazvin station, has the potential to produce sediment caused by wind erosion. Also, more in-depth studies should be conducted on the effects of wind erosion on vegetation recovery, biodiversity and land productivity.

Keywords: Prevailing wind, Deposition, Air diet, Salt lake, Farsayandeh, Qazvin.

1. Assistant Professor, University of Saravan, Iran *Corresponding author e-mail address: Email:zol.farhad@gmail.com
2. PhD in Natural Resources Engineering-Desertification, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran
3. PhD Student in Natural Resources Engineering-Desertification, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran