

مقایسه روش‌های زمین آمار در درون‌یابی سطح ایستابی و بررسی ویژگی‌های مورفومتری و گرانولومتری نیکا (محدوده مورد مطالعه: هرات- شهرستان خاتم)

اعظم نجفی وفا^۱ , کاظم طاهری نژاد جوزم^۲ , مهران مقصودی^۳ 

^۱ دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ استاد گروه ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

 10.22034/grd.2026.24184.1685

چکیده

نبکاها، که به عنوان تپه‌های ماسه‌ای تثبیت شده توسط گونه‌های گیاهی شناخته می‌شوند، شاخص‌های مهمی در فرسایش بادی و تراکم ماسه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. پژوهش حاضر با هدف بررسی مورفومتری و پراکنش نبکاها، ویژگی‌های رسوبات ماسه‌ای و تأثیر رژیم باد و سطح ایستابی آب زیرزمینی در منطقه هرات، شهرستان خاتم، انجام شد. در این مطالعه، ۲۰ نمونه نبکا به روش ترانسکت خطی و ۳۶ حلقه چاه پیژومتری در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۹ مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های باد (۱۰ ساله) با استفاده از نرم‌افزارهای WR Plot و ArcGIS و تحلیل گل‌باد تجزیه و تحلیل شدند. نمونه‌های رسوبی نیز برای تعیین قطر ذرات، جورشدگی و کشیدگی با نرم‌افزار Gradistat آنالیز گردیدند. نتایج نشان داد که باد غالب منطقه از جهت جنوب‌غربی می‌وزد و بیشترین توان حمل ماسه در زمستان رخ می‌دهد، در حالی که توان حمل ماسه در مناطق شمال‌شرقی و شرقی کمتر است. ذرات ماسه دارای میانگین قطر ۰۷۴-۲۰p، جورشدگی نسبتاً خوب و منشأ واحد بودند. تحلیل‌های آماری نشان داد که بین برخی مؤلفه‌های مورفومتری نبکا و ویژگی‌های گیاهی مانند قطر تاج پوشش و قطر قاعده نبکا روابط معناداری وجود دارد، در حالی که سایر مؤلفه‌ها ارتباط معنادار نشان ندادند. میان‌یابی سطح ایستابی آب زیرزمینی با روش کریجینگ دقیق‌ترین نتایج را ارائه داد. یافته‌ها نشان داد که شکل‌گیری و پراکنش نبکاها تحت تأثیر ترکیبی از رژیم باد، مورفومتری نبکا، ویژگی‌های رسوبات و شرایط هیدرولوژیکی قرار دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای مدیریت اراضی خشک، تثبیت ماسه‌های روان و پایش فرسایش بادی و بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران فراهم کند.

تاریخ دریافت:

۳ اسفند ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۲۱ تیر ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:

مورفومتری نبکا، فرسایش

بادی، تثبیت ماسه‌های

روان، سطح ایستابی

۱ مقدمه

نبکاهای از عوارض ژئومورفولوژیکی شاخص در مناطق خشک و نیمه خشک هستند که در اثر تجمع ماسه در پای بوته های گیاهی تشکیل می شوند. این ساختارها با به دام انداختن رسوبات بادی در اطراف پوشش گیاهی، در تثبیت ماسه و کاهش جابه جایی ذرات نقش دارند و می توانند شدت فرسایش بادی را کاهش دهند (البناء^۱، ۲۰۰۷؛ کتس^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). فرسایش بادی یکی از فرآیندهای مهم ژئومورفولوژیکی در مناطق خشک و نیمه خشک است که نقش قابل توجهی در تغییر شکل سطح زمین و تشدید تخریب اراضی دارد. در این میان، برخی عوارض بیوژئومورفولوژیکی می توانند به عنوان شاخص هایی برای ارزیابی شدت فرسایش بادی و پایداری اکوسیستم های بیابانی مورد استفاده قرار گیرند. شناسایی این عوارض و بررسی ویژگی های آنها می تواند به درک بهتر فرآیندهای بیابان زایی و مدیریت اراضی خشک کمک کند. تشکیل، توسعه و پایداری این عوارض از جمله نبکاهای تحت تأثیر مجموعه ای از عوامل محیطی و انسانی مانند شرایط اقلیمی، رژیم باد، ویژگی های رسوبات ماسه ای، نوع و تراکم پوشش گیاهی، تغییرات هیدروژئولوژیکی محلی و فعالیت های انسانی قرار دارد (رحمانوف^۳ و همکاران، ۲۰۰۹؛ بائو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش های متعددی در ارتباط با بررسی ویژگی های رسوبی، فیزیکی و شیمیایی خاک، وضعیت مواد مغذی و فرآیندهای رشد و تکامل نبکاهای انجام شده است (ژانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژو^۶ و همکاران، ۲۰۱۵؛ لوو^۷ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کائو^۸ و همکاران، ۲۰۱۶؛ پول^۹ و همکاران، ۲۰۱۳؛ لوو و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج برخی از این مطالعات نشان می دهد که تخریب پوشش گیاهی سازنده نبکاهای می تواند موجب کاهش مواد مغذی خاک و افزایش شدت فرسایش بادی شود. با این حال، بررسی همزمان ویژگی های مورفومتری نبکاهای با عوامل هیدروژئولوژیکی، به ویژه تغییرات سطح ایستابی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات ژئومورفولوژیکی نشان داده اند که پراکنش مکانی نبکاهای می تواند بازتابی از شرایط محیطی و روند تخریب سرزمین باشد. تنگبرگ^{۱۰} (۱۹۹۴) در بررسی نبکاهای مناطق استپی شمال آفریقا نشان داد که این عوارض عمدتاً در مخروطافکنه ها توسعه یافته اند و افزایش فراوانی سیلاب ها و رسوب گذاری در شکل گیری آنها نقش دارد. گویجین^{۱۱} (۱۹۹۴، ۱۹۹۵) نیز در بیابان تکلهمکان به بررسی نوع، فرآیند رشد و ساختار داخلی نبکاهای در مقیاس وسیع پرداخت. همچنین منشینگ^{۱۲} و ابراهیم (۱۹۷۷) تمرکز نبکاهای در فرورفتگی های رسوبی را نشانه ای از تخریب شدید زمین دانسته و شکل گیری آنها را همزمان با افزایش فشارهای انسانی گزارش کردند.

در مطالعات جدیدتر نیز ابعاد مختلف این پدیده بررسی شده است. دو^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۴) فرآیند شکل گیری و تکامل نبکاهای را در فلات اوردوس در شمال چین بررسی کردند و نشان دادند که نبکاهای عمدتاً بر روی کانال های پالئویی یا لایه های پالئوسول توسعه

1 El-Bana

2 Quets

3 Rahmonov

4 Bao

5 Zhang

6 Zhou

7 Luo

8 Cao

9 Pool

10 Tangberg

11 Gujin

12 Manshing

13 Du

یافته‌اند و رسوبات آن‌ها بیشتر از ماسه‌های بسیار ریز و ریز تشکیل شده است. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به تحلیل لندفرم‌های نیکا پرداختند و امکان کمی‌سازی ویژگی‌های این عوارض را در مطالعات ژئومورفولوژی نشان دادند. ژو و یانگ^۱ (۲۰۲۳) نیز با استفاده از مطالعات میدانی و شبیه‌سازی تونل باد نشان دادند که ویژگی‌های مورفولوژیکی نیکاها تا حد زیادی تحت تأثیر شکل، تراکم و ساختار گیاهان سازنده آن‌ها قرار دارد. با وجود اهمیت نیکاها در کاهش اثرات فرسایش بادی و نقش آن‌ها به‌عنوان شاخص‌های تغییرات محیطی، بررسی ارتباط بین پراکنش فضایی، تراکم و ویژگی‌های مورفومتری نیکاها با عوامل کنترل‌کننده‌ای مانند فرایندهای بادی و تغییرات سطح ایستابی در نیکازارهای جنوب استان یزد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو هدف این پژوهش بررسی اهمیت نیکاها به‌عنوان شاخص‌های فرسایش بادی، تحلیل روابط بین تراکم و ویژگی‌های مورفومتری آن‌ها و ارزیابی تأثیر فرایندهای بادی و تغییرات سطح ایستابی بر تشکیل و توسعه آن‌هاست. در این راستا داده‌های ۳۶ ایستگاه پیژومتری طی سال‌های آبی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفته و از طریق درون‌یابی سطح ایستابی، ارتباط آن با ویژگی‌های مورفولوژیکی و پراکنش نیکاها تحلیل شده است.

۲ مبانی نظری

۳ روش شناسی پژوهش

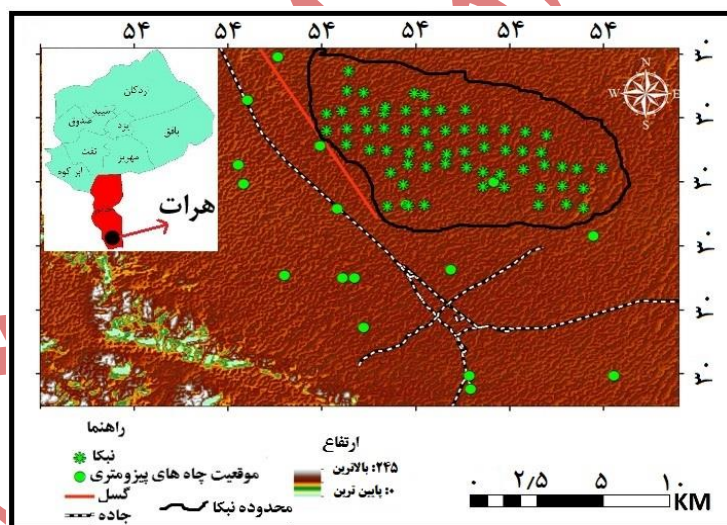
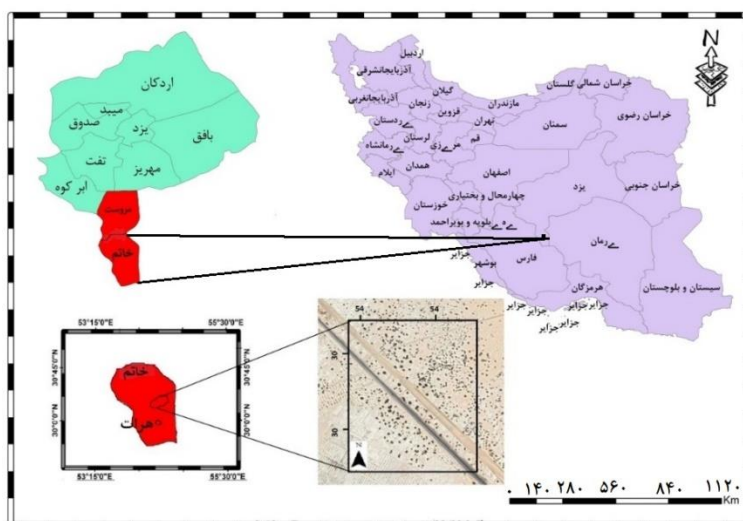
۳-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، دشت هرات در بخش مرکزی شهرستان خاتم در جنوب استان یزد است که به‌دلیل قرارگیری در اقلیم خشک تا فراخشک، وجود رسوبات سست آبرفتی و بادی، پوشش گیاهی پراکنده و افت سطح آب زیرزمینی، از مناطق مناسب برای بررسی نیکاها و فرسایش بادی به‌شمار می‌رود. این دشت با وسعتی در حدود ۸۲۰۰ کیلومتر مربع، $31^{\circ} 30' N$ تا $31^{\circ} 50' N$ (عرض شمالی) و $54^{\circ} 30' E$ تا $55^{\circ} 10' E$ (طول شرقی) قرار دارد و میانگین ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۶۰۰ متر است (شکل ۱).

میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه آن حدود ۸۴ میلی‌متر گزارش شده است که بیانگر محدودیت شدید رطوبتی و غلبه شرایط مساعد برای فعالیت فرایندهای بادی است. از نظر ژئومورفولوژیکی، دشت هرات بخشی از پهنه‌های آبرفتی و ماسه‌ای حاشیه دشت لوت است و رسوبات سست ماسه‌ای و سیلتی آن بستر مناسبی برای استقرار پوشش گیاهی و تشکیل نیکاها فراهم کرده‌اند. از نظر زمین‌شناسی نیز هرچند واحدهای سنگی قدیمی در ارتفاعات پیرامونی رخنمون دارند، اما رسوبات آبرفتی و بادی کواترنری مهم‌ترین واحدهای مرتبط با شکل‌گیری نیکاها در سطح دشت هستند (گزارش‌های داخلی وزارت نیرو، ۱۳۷۸). همچنین، بررسی داده‌های ۳۶ حلقه چاه پیژومتری نشان می‌دهد که متوسط افت سالانه سطح آب زیرزمینی در آبخوان هرات حدود ۰/۵ متر و کسری متوسط حجم مخزن آن، با فرض ضریب ذخیره ۷ درصد، حدود ۱۸ میلیون مترمکعب است؛ وضعیتی که می‌تواند بر پوشش گیاهی، پایداری نیکاها و تشدید فرسایش بادی اثرگذار باشد (گزارش ممنوعیت محدوده مطالعاتی هرات، ۱۳۹۰). در این راستا، گونه گز (*Tamarix spp*) به‌عنوان پوشش گیاهی غالب و سازنده نیکاها، نقش کلیدی در منطقه ایفا می‌کند. این گیاه چندساله و مقاوم به خشکی، با توسعه ریشه‌های عمیق و دسترسی به آب‌های زیرسطحی، از سازگاری

1 Zhou

مورفولوژیکی بالایی برخوردار است (باوم، ۱۹۷۸؛ گلن و ناگلر، ۲۰۰۵). ویژگی‌هایی نظیر برگ‌های متراکم برای کاهش تعرق، تحمل بالای شوری و همچنین تجمع رسوبات در پای بوته‌ها، گز را به عامل اصلی به دام‌اندازی ذرات ماسه‌ای و تشکیل نیکا در این اکوسیستم تبدیل کرده است (دی‌توماسو، ۱۹۹۸؛ قادری و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نیکاها و چاه‌های پیزومتری هرات شهرستان خاتم، استان یزد

۲-۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش‌شناسی مبتنی بر ترکیبی از مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و تحلیل‌های آماری و مکانی است. برای تبیین ویژگی‌های مورفومتری و رسوب‌شناسی نیکاها و بررسی ارتباط آن‌ها با فرآیندهای بادی و تغییرات وضعیت سطح ایستابی، مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی، ژئومورفولوژیکی، رسوبی و هیدروژئولوژیکی گردآوری و تحلیل شد.

۳،۱،۱ داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

در طول انجام پژوهش، سه مرحله بازدید میدانی از محدوده مورد مطالعه انجام شد. ابزارهای مورد استفاده در عملیات میدانی شامل متر نواری، دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) مدل Garmin eTrex 30x، شیب‌سنج و کیسه‌های نمونه‌برداری بود. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل اطلاعات اقلیمی منطقه، به‌ویژه داده‌های باد، داده‌های مکانی ثبت‌شده با GPS، تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 (OLI/TIRS) مربوط به سال ۱۳۹۹ و تصاویر Google Earth مربوط به همان سال بود. پردازش و تحلیل داده‌های مکانی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.8 انجام گرفت. همچنین نرم‌افزار WRPlot برای ترسیم گلباد و نرم‌افزار Sand Rose Graph برای تهیه گلماسه مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۳. تحلیل رژیم باد

داده‌های باد ایستگاه سینوپتیک هرات شامل مؤلفه‌های جهت و سرعت، طی دوره ۱۰ ساله ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ گردآوری شد. پس از پاک‌سازی و آماده‌سازی داده‌ها در Excel، گلبادهای سالانه و فصلی در هشت جهت اصلی و در پنج طبقه سرعت، با استفاده از نرم‌افزار WRPlot ترسیم گردید. برای تحلیل توان فرسایشی باد و جهت غالب حمل ماسه، از روش گلماسه (پس از فرایبرگر و لتاو^۱) استفاده شد. در این روش، تنها بادهایی با سرعت بیش از آستانه فرسایش (۱۲ نات) در محاسبه لحاظ گردید. مقادیر سرعت بالاتر از آستانه به واحدهای برداری توان حمل ماسه (DP^۲) تبدیل و نمودار گلماسه در جهات هشت‌گانه ترسیم شد. سپس با جمع برداری بازوهای نمودار، بردار برآیند حمل ماسه (RDP^۳) محاسبه گردید که بیانگر مقدار نسبی و جهت نهایی انتقال ماسه در منطقه است. برای ارزیابی میزان ثبات جهت باد، شاخص ثبات باد (UDI^۴) به‌عنوان نسبت RDP به DP محاسبه شد که نشان‌دهنده تمرکز یا پراکندگی جهت باد در بازه‌های زمانی مختلف است.

۳،۱،۲ ۳.۳. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مورفومتری نیکها

پس از تحلیل شرایط باد، عملیات میدانی برای تعیین مرزهای پراکنش نیکها و نمونه‌برداری مورفومتری انجام شد. نمونه‌برداری بر اساس روش تک‌بعدی و با استفاده از ترانسکت‌های خطی غربی-شرقی صورت گرفت که به‌منظور پوشش مناسب پهنه، در عرصه مستقر شدند.

برای هر نیکای برخوردکرده با ترانسکت، مولفه‌های مورفومتری شامل ارتفاع، قطر قاعده و شیب دامنه اندازه‌گیری شد. همچنین ویژگی‌های مورفولوژی گیاهی شامل ارتفاع گیاه و قطر تاج پوشش برداشت گردید. ارتفاع گیاه از بلندترین شاخه تا قله نیک، و قطر تاج پوشش از میانگین دو قطر عمود بر هم محاسبه شد. شیب دامنه با شیب‌سنج و قطر قاعده با متر نواری اندازه‌گیری شد.

حجم نیکها با فرض شکل هندسی مخروط ناقص و بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط داگیل و توماس^۵ (۲۰۰۲) محاسبه گردید:

$$V = 0.33 \pi r^2 h \quad (۱)$$

1 Fryberger & Lettau

2 Drift Potential

3 Resultant Drift Potential

4 Unidirectional Index

5 Dougil & Thomas

که در آن V حجم نبکا (مترمکعب)، h ارتفاع نبکا (متر) و r شعاع قاعده نبکا (متر) است.

۴.۳. نمونه برداری رسوب و تحلیل آزمایشگاهی

به منظور تحلیل های رسوب شناسی، ابتدا یک شبکه ۶۰ نقطه ای با ابعاد ۳۰×۳۰ متر بر اساس تصاویر Google Earth و نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ طراحی شد. از هر نقطه، یک نمونه رسوب از عمق ۱۰ سانتی متری برداشت و در مجموع ۲۰ نمونه به آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران انتقال یافت.

نمونه ها پس از خشک شدن، برای دانه سنجی به روش الک خشک آماده شدند. الک ها با قطرهای ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۲۵، ۶۳ و کمتر از ۶۳ میکرون مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای دانه بندی شامل میانگین، جورشدگی، کج شدگی و کشیدگی ذرات با استفاده از نرم افزار GRADISTAT نسخه ۴.۰ محاسبه شد. نمودارهای تجمعی و چولگی نیز در همان نرم افزار استخراج گردید.

۳.۱،۳. ۵.۳. تحلیل سطح ایستابی آب زیرزمینی

در این پژوهش، داده های سطح آب زیرزمینی ۳۶ حلقه چاه پیژومتری مربوط به سال ۱۳۹۹ که از وزارت نیرو دریافت شد، مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی ارتباط سطح ایستابی با پراکنش نبکاها، تحلیل و پهنه بندی داده ها در محیط ArcGIS 10.8 انجام شد. برای برآورد توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی از روش های میان یابی IDW و کریجینگ استفاده گردید. انتخاب این روش ها به دلیل کاربرد گسترده آن ها در مطالعات هیدروژئولوژی و توانایی مناسب در مدل سازی تغییرات مکانی متغیرهای پیوسته، از جمله سطح ایستابی آب زیرزمینی، صورت گرفت. روش کریجینگ یک روش زمین آماری مبتنی بر ساختار خود همبستگی مکانی داده ها است که با استفاده از مدل های سمی واریوگرام قادر به ارائه برآوردهای بهینه و بدون تورش از متغیرهای مکانی می باشد (گووآرتس^۱، ۱۹۹۷). در مقابل، روش IDW یک روش قطعی مبتنی بر فاصله است که در آن وزن هر نمونه تابعی از فاصله آن تا نقاط مجهول بوده و به طور گسترده برای برآورد سریع و مقایسه نتایج میان یابی در داده های محیطی مورد استفاده قرار می گیرد (واتسون و فیلیپ^۲، ۱۹۸۵).

در این پژوهش، برای روش کریجینگ از مدل های سمی واریوگرام کروی، نمایی و گوسی استفاده شد. به منظور ارزیابی دقت مدل های میان یابی، ابتدا داده ها با استفاده از تبدیل باکس-کاکس نرمال سازی شدند و سپس شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقایسه مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی محاسبه گردید. مقدار کمتر RMSE نشان دهنده دقت بالاتر مدل میان یابی است. در نهایت، روش دارای کمترین مقدار RMSE به عنوان روش بهینه انتخاب و نتایج در شش کلاس طبقه بندی شد.

1 Goovaerts

2 Watson and Philip

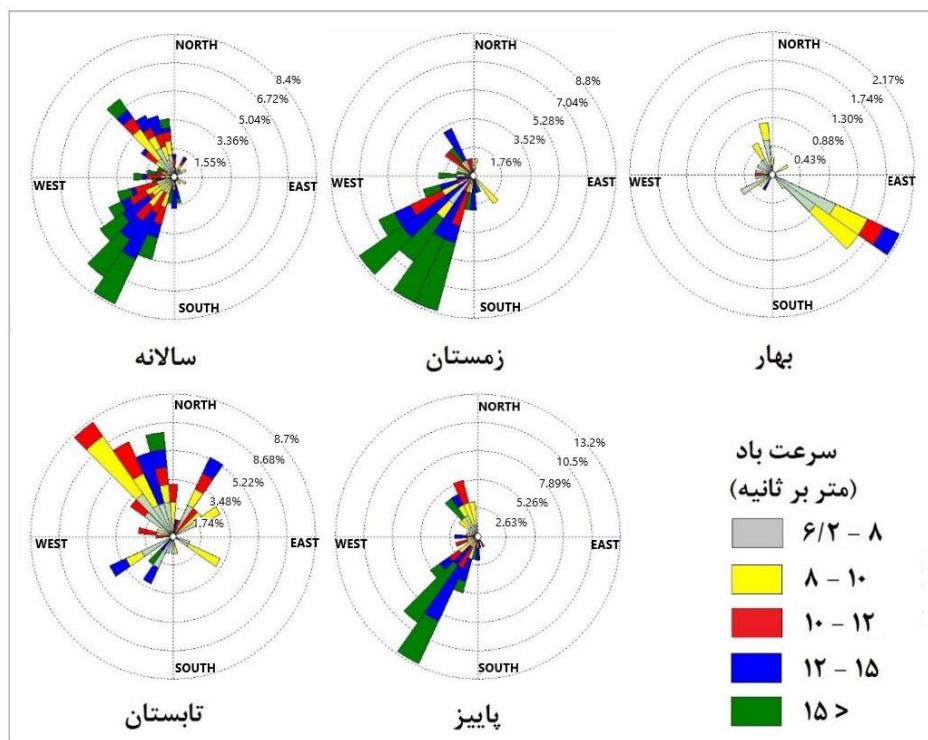


شکل ۲- نمایش تصویری نیکاهای هرات (تهیه: نگارندگان ۱۳۹۹)

۴ یافته‌ها و بحث

۱.۴. نتایج تحلیل داده‌های باد

نتایج تحلیل گلباد ایستگاه سینوپتیک هرات نشان داد که باد غالب سالیانه منطقه از جهت جنوب‌غربی می‌وزد. پس از آن، بادهای شمال‌غربی و جنوب‌شرقی از نظر فراوانی در رتبه‌های بعدی قرار داشتند، با این حال سهم آن‌ها در مقایسه با بادهای جنوب‌غربی کمتر بود. بررسی الگوی فصلی نیز بیانگر آن بود که این الگو تا حد زیادی در مقیاس فصلی تداوم داشته است (شکل ۳). همچنین نتایج تحلیل گلماسه نشان داد که بیشترین توان حمل ماسه (DP) مربوط به فصل زمستان با مقدار ۱۵۳۹ واحد برداری بوده است، در حالی که کمترین مقدار آن در فصل تابستان با ۳۴۹ واحد برداری ثبت شده است. توزیع مکانی DP در فصل زمستان نشان داد که بیشینه این شاخص عمدتاً در بخش جنوب‌غربی منطقه رخ داده و به تدریج به سمت شمال‌شرقی و شرق کاهش یافته است.



شکل ۳- گلباد ایستگاه سیویتیکی هرات

۴/۱/۱. ۲.۴. نتایج بردار برآیند حمل ماسه (RDP) و جهت غالب حمل ماسه (RDD)

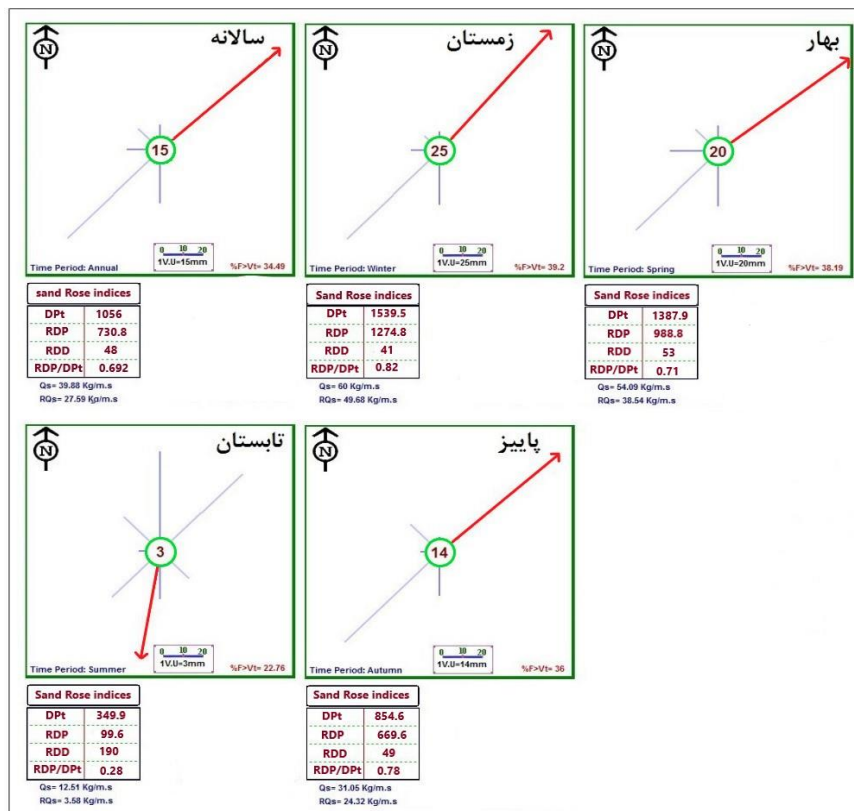
نتایج بردار برآیند حمل ماسه و جهت غالب حمل ماسه نشان داد که بیشترین مقدار RDP فصلی مربوط به فصل زمستان با مقدار ۱۲۷۴۸۶۵ بود و کمترین مقدار آن به فصل تابستان با مقدار ۹۹۶۳۶ اختصاص داشت. مقدار RDP سالیانه ایستگاه هرات برابر با ۷۳۰۸۰۸ محاسبه شد که بیانگر توان نسبتاً بالای بادهای منطقه در جابه‌جایی رسوبات ماسه‌ای است (جدول ۱). همچنین، تغییرات فصلی پتانسیل حمل ماسه در ایستگاه مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است.

همچنین نتایج مربوط به جهت غالب حمل ماسه نشان داد که در مقیاس سالیانه و در فصول زمستان، بهار و پاییز، جهت غالب حمل ماسه همسو با جهت باد غالب جنوب‌غربی بوده است. با این حال، در فصل تابستان الگوی متفاوتی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که جهت غالب حمل ماسه در این فصل تقریباً عمود بر جهت باد غالب جنوب‌غربی است. مقدار RDD در فصل تابستان ۱۹۰ درجه محاسبه شد که در مقایسه با مقدار ۴۱ درجه در زمستان افزایش قابل‌توجهی را نشان داد و بیانگر ناپایداری جهت بادهای حامل ماسه در این فصل بود (شکل ۴).

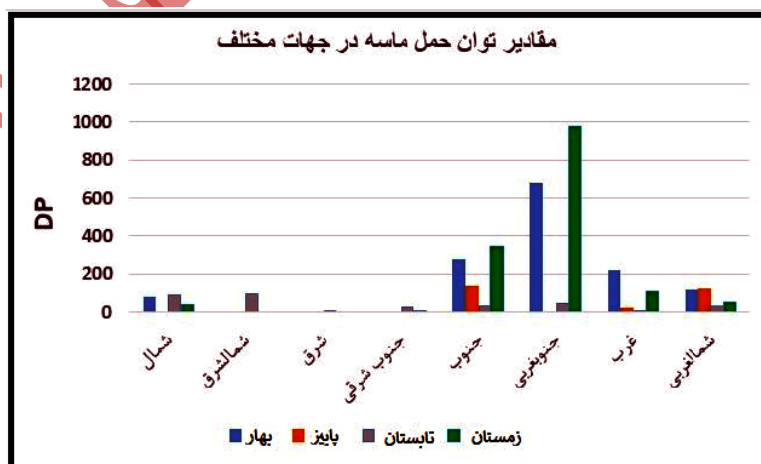
جدول ۱- نتایج شاخص‌های گلماسه در ایستگاه هرات

شاخص‌ها	فصل بهار	فصل تابستان	فصل پاییز	فصل زمستان	سالانه
DP	۱۳۸۷	۳۴۹	۸۵۴	۱۵۳۹	۱۰۵۶
RDP	۹۸۸/۸	۹۹/۶	۶۶۹/۶	۱۲۷۴/۸	۷۳۰/۸

۴۸	۴۱	۴۹	۱۹۰	۵۳	RDD
۰.۶۹	۰.۸۲	۰.۷۸	۰.۲۸	۰.۷۱	UDI



شکل ۴- گلماسه ایستگاه سینوپتیک هرات



شکل ۵- پتانسیل حمل فصلی ماسه در ایستگاه مورد مطالعه

۳.۴. نتایج تحلیل مورفومتری نبکاها ۴،۱،۲

در این پژوهش، ویژگی‌های مورفومتری ۲۰ نبکا در محدوده مطالعاتی مورد اندازه‌گیری و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای مورفومتری نبکاها در امتداد ترانسکت‌های مختلف از تغییرات قابل توجهی برخوردار هستند؛ موضوعی که بیانگر تأثیرپذیری این اشکال ژئومورفیک از ناهمگونی شرایط محیطی، به‌ویژه رژیم حاکم باد و خصوصیات رسوبی منطقه است. همچنین، تغییرات مشاهده‌شده در ابعاد، ارتفاع و حجم نبکاها نشان می‌دهد که فرآیندهای بادی و الگوی انتقال رسوبات نقش اساسی در شکل‌گیری، تحول و توسعه مورفولوژیکی آن‌ها ایفا می‌کنند (جدول ۲). نمایی از پارامترهای اندازه‌گیری‌شده و امتداد ترانسکت‌ها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- نمایی از پارامترهای اندازه‌گیری‌شده و امتداد ترانسکت‌ها در منطقه مورد مطالعه

جدول ۲- آمار توصیفی ویژگی‌های مورفومتری نبکاها و شاخص‌های باد منطقه

شاخص	مساحت (m^2)	حجم (m^3)	ارتفاع (m)	دامنه رو به باد (m)	پشت به باد (m)
میانگین	۳۳/۲۸	۷۰/۵۹	۹۷/۱	۲۰/۳۴	۸۸/۲۲
میانه	۷۱/۲۵	۴۵/۴۸	۹۲/۱	۱۱/۳۴	۳۰/۲۲
مد	۱۹/۱۵	۶۱/۴	۹۵/۱	۰۰/۳۴	۰۰/۳۰
واریانس	۶۴/۲۶۶	۳۱/۱۷۷۹	۱۸/۰	۸۰/۴۲	۷۴/۳۸
کمترین	۱۴/۲	۶۱/۴	۰۰/۱	۰۰/۲۱	۰۰/۶
بیشترین	۷۷/۶۴	۹۳/۱۹۸	۲۰/۳	۰۰/۴۸	۰۰/۳۹
انحراف معیار	۳۲/۱۶	۱۸/۴۲	۴۲/۰	۵۴/۶	۲۲/۶

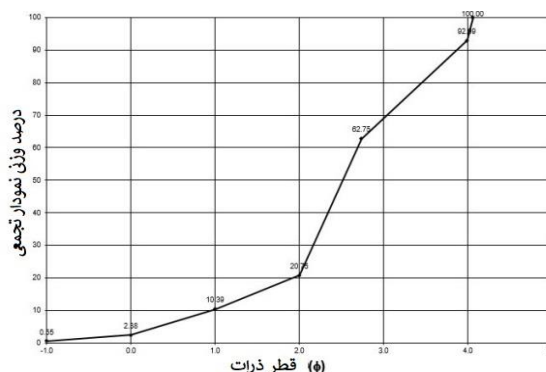
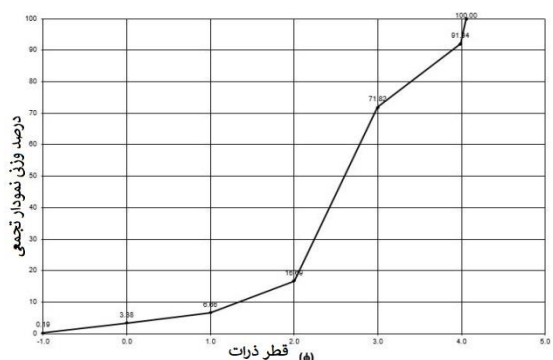
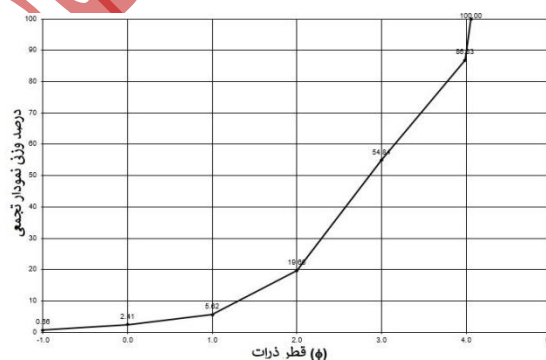
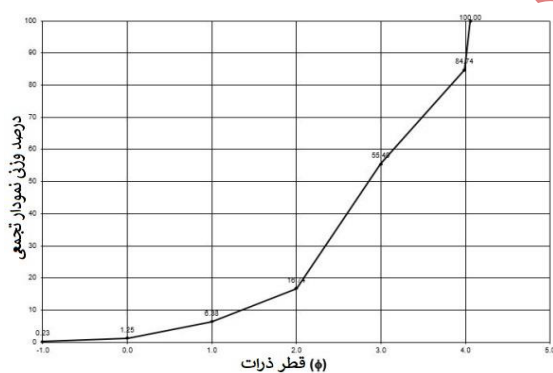
۴.۴. ویژگی‌های دانه‌بندی و پارامترهای آماری رسوبات نبکاها

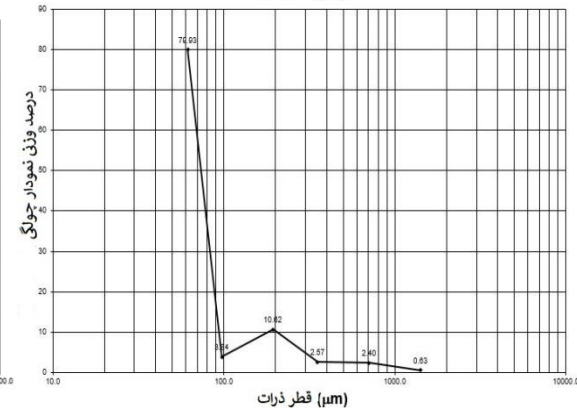
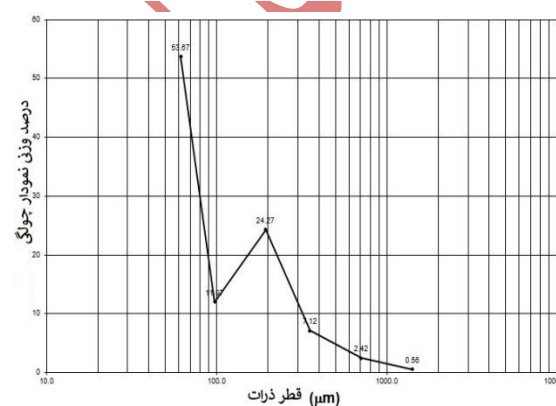
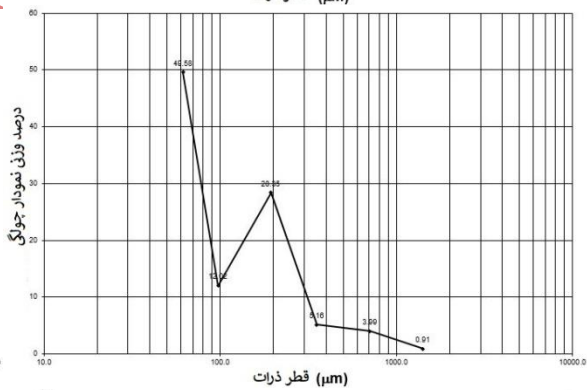
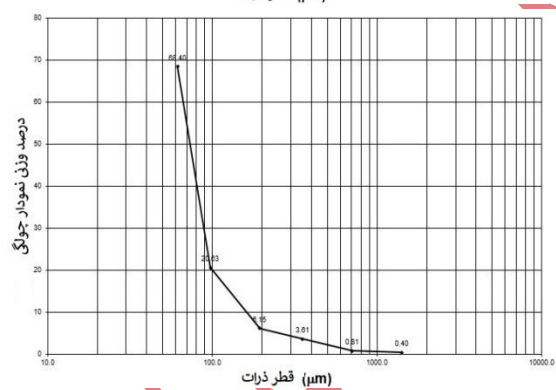
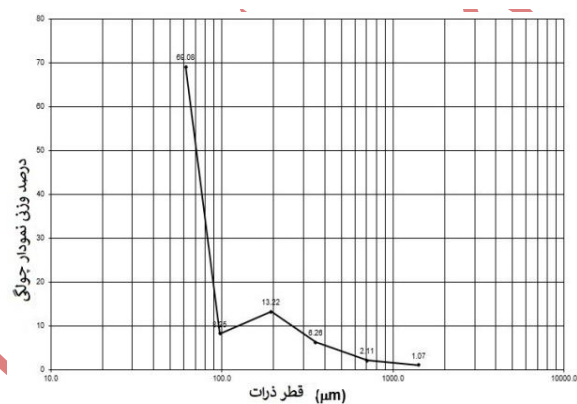
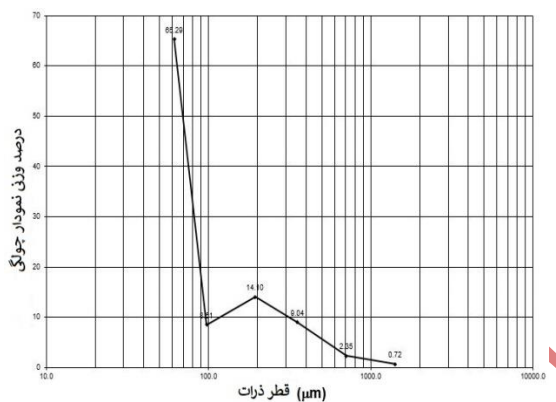
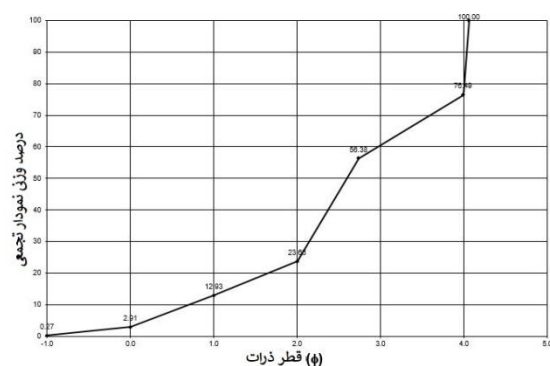
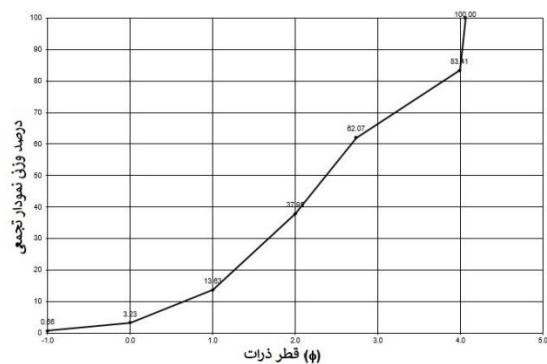
بر اساس نتایج حاصل از آزمایش دانه‌بندی و پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GRADISTAT نسخه ۴.۰، میانگین اندازه ذرات در نمونه‌های مورد بررسی برابر با $\phi 2.054$ به‌دست آمد. بیشترین مقدار میانگین قطر ذرات مربوط به نمونه شماره ۱۰ با مقدار $\phi 3.061$ و کمترین مقدار مربوط به نمونه شماره ۱۸ با مقدار $\phi 2.360$ بود که نشان‌دهنده غالب بودن ذرات ماسه‌ای نسبتاً یکنواخت در رسوبات منطقه مورد مطالعه است (جدول ۳).

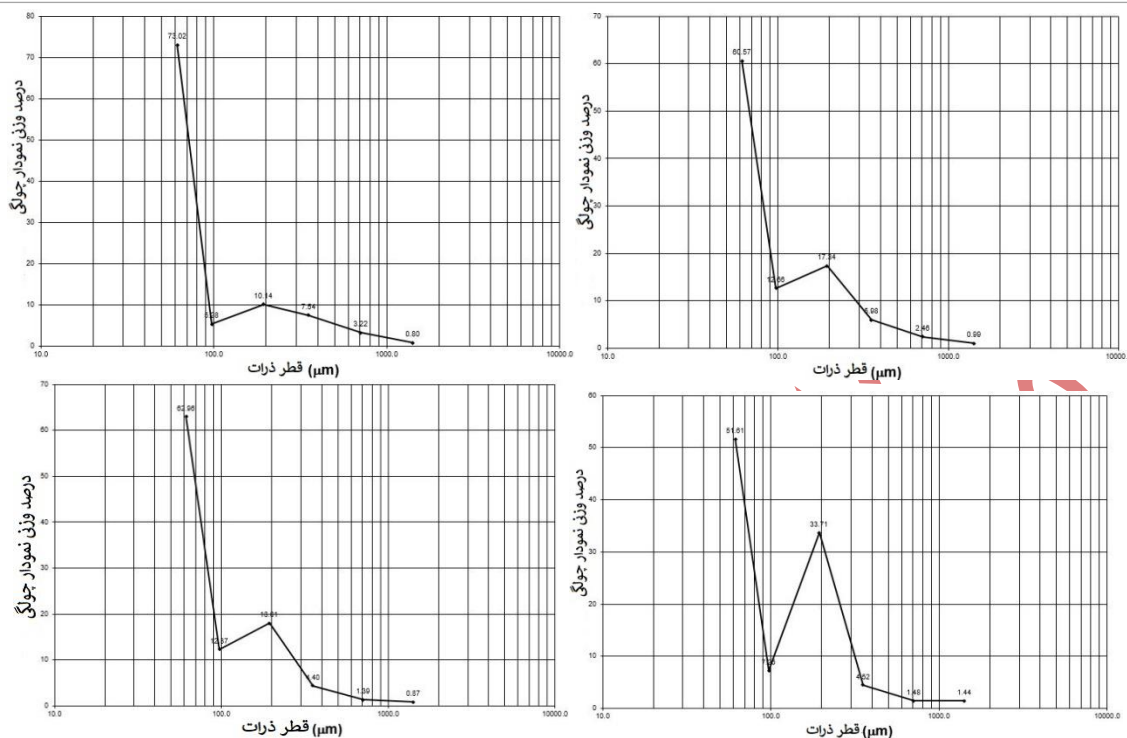
میانگین شاخص جورشدگی در نمونه‌ها برابر با ۱۰۳۴ محاسبه شد که بیانگر جورشدگی نسبتاً مناسب رسوبات است. بر اساس نتایج ارائه‌شده، نمونه شماره ۱۰ کمترین میزان جورشدگی را نشان می‌دهد. درشت‌تر بودن ذرات در این نمونه می‌تواند نشان‌دهنده نزدیکی منبع تأمین رسوبات باشد؛ به‌گونه‌ای که ذرات فرصت کمتری برای حمل طولانی، تفکیک و جورشدگی مناسب در طی فرآیند انتقال داشته‌اند (جدول ۳).

نتایج مربوط به شاخص کج‌شدگی نیز نشان داد که میانگین این شاخص برابر با ۰.۷۷۳- است که بیانگر گرایش نسبی توزیع ذرات به سمت دانه‌های درشت‌تر و در عین حال توزیع نسبتاً متقارن اندازه ذرات در نمونه‌ها می‌باشد. مقایسه شاخص‌های جورشدگی و کج‌شدگی نشان می‌دهد که اندازه ذرات از یکنواختی نسبی برخوردار بوده و احتمالاً منشأ رسوبات در بخش عمده‌ای از منطقه مشابه است. منحنی تجمعی و توزیع فراوانی اندازه دانه‌های رسوبی نمونه‌های منتخب نیز این الگو را نشان می‌دهد (شکل ۷).

علاوه بر این، نتایج شاخص کشیدگی نشان داد که نمونه شماره ۱۸ دارای کمترین مقدار کشیدگی است. میانگین کشیدگی نمونه‌ها برابر با ۳.۵۱ محاسبه شد که بیانگر قرارگیری منحنی توزیع اندازه ذرات در محدوده کشیده تا بسیار کشیده است. این وضعیت نشان‌دهنده تمرکز بیشتر ذرات در یک دامنه مشخص از اندازه دانه‌ها و غالب بودن یک جمعیت رسوبی مشخص در رسوبات منطقه مورد مطالعه است (جدول ۳).







شکل ۷- منحنی تجمعی و توزیع فراوانی اندازه دانه‌های رسوبی نمونه‌های منتخب

جدول ۳- شاخص‌های آماری دانه‌بندی رسوبات بر اساس روش Ward & Folk (۱۹۵۷)

نمونه	میانگین (Mean, ϕ)	جورشدگی (Sorting, ϕ)	کج‌شدگی (Skewness)	کشیدگی (Kurtosis)
۱	۲/۹۵	۱/۰۸	۰/۰۲	۱/۲۷
۲	۲/۹۱	۱/۰۸	۰/۰۶	۱/۲۳
۳	۲/۹۶	۱/۰۵	۰/۱۰	۱/۲۵
۴	۳/۱۲	۰/۹۳	۰/۱۶	۱/۲۶
۵	۲/۸۲	۱/۰۶	۰/۰۳	۱/۴۶
۶	۲/۸۵	۱/۰۱	۰/۰۲	۱/۴۹
۷	۲/۸۹	۰/۹۷	۰/۰۰	۰/۹۹
۸	۲/۸۷	۱/۱۲	۰/۱۵	۱/۲۴
۹	۲/۷۹	۱/۱۶	۰/۰۶	۰/۸۴
۱۰	۲/۸۱	۱/۱۴	۰/۰۴	۰/۸۲
۱۱	۳/۴۱	۰/۸۰	۰/۵۰	۳/۰۹
۱۲	۲/۷۷	۱/۱۱	۰/۱۶	۱/۳۲
۱۳	۲/۸۰	۱/۱۶	۰/۱۷	۰/۸۶
۱۴	۲/۸۴	۱/۱۸	۰/۰۹	۰/۸۸
۱۵	۲/۸۲	۱/۰۷	۰/۰۳	۱/۳۰
۱۶	۲/۸۲	۱/۰۸	۰/۱۱	۱/۲۴
۱۷	۲/۹۷	۱/۲۹	۰/۰۱	۱/۱۷

۱۸	۲/۹۰	۱/۱۶	۰/۰۵	۱/۲۵
۱۹	۲/۸۳	۱/۱۷	۰/۱۲	۱/۳۱
۲۰	۲/۸۶	۱/۰۷	۰/۱۱	۱/۲۸

۵.۴. تحلیل زمین‌آماري داده‌های سطح ایستابی و انتخاب روش میان‌یابی

به‌منظور بررسی الگوی فضایی سطح ایستابی و تراکم نبکاها در محدوده مورد مطالعه، داده‌های مربوط به ۳۶ حلقه چاه پیزومتری منطقه طی دوره آماری مورد بررسی جمع‌آوری و تحلیل شد. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، مدل‌های مختلف نیم‌تغییرنما (Semivariogram) بر داده‌ها برازش داده شد و پارامترهای زمین‌آماري با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید.

به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش میان‌یابی، دقت روش‌های مختلف با استفاده از شاخص جذر میانگین مربعات خطا ارزیابی شد. نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است. مقدار RMSE در روش‌های مختلف بین ۰.۳۶ تا ۲۴.۹۷ متغیر بود. بر اساس نتایج، روش کریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای کروی (Spherical) کمترین میزان خطا را نشان داد و به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای میان‌یابی داده‌های سطح ایستابی، تراکم نبکاها و نقاط GPS انتخاب شد.

نتایج نشان داد که مدل کروی دارای برازش مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها بوده و بیانگر وجود همبستگی مکانی مطلوب بین داده‌های چاه‌های پیزومتری است. همچنین، با توجه به پراکنش مناسب چاه‌ها در محدوده مطالعه و مقادیر دامنه تأثیر، الگوی تغییرات سطح ایستابی از پیوستگی فضایی قابل قبولی برخوردار است. بر اساس اصول زمین‌آمار، متغیرهایی که دارای همبستگی مکانی قوی‌تر و واریانس تخمینی کمتری باشند، به تعداد نمونه‌برداری کمتری برای برآورد دقیق نیاز دارند.

در مجموع، روش کریجینگ با نیم‌تغییرنمای کروی، با مقادیر RMSE برابر با ۰.۳۶، ۰.۴۴ و ۰.۵۷، مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی و تحلیل فضایی متغیرهای مورد بررسی در منطقه تشخیص داده شد.

جدول ۴-مقایسه میزان خطای RMSE روش‌های مختلف میان‌یابی برای تراکم نبکاها، سطح ایستابی و نقاط GPS

ردیف	روش‌های میان‌یابی	میزان خطا		
		میزان خطا RMSE نقاط GPS	RMSE سطح ایستابی	میزان خطا RMSE نبکا
۱	Kriging_Probability_k-Bessl	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۶۰
۲	Kriging_Probability_Spherical	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۵۷
۳	Kriging_Probability_Gaussian	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۶۵
۴	IDW	۰/۴۹	۲۰/۳۳	۲۴/۹۷

۵. بحث

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های باد در ایستگاه هرات نشان داد که باد غالب منطقه عمدتاً از جهت جنوب‌غربی می‌وزد و بیشترین توان حمل ماسه نیز در همین راستا، به‌ویژه در فصل زمستان، مشاهده شده است؛ به‌طوری‌که مقدار DP برابر با ۱۵۳۹ واحد برداری برآورد گردید. پس از آن، بادهای شمال‌غربی و جنوب‌شرقی از نظر فراوانی وقوع در رتبه‌های بعدی قرار دارند، با این حال سهم آن‌ها در جابه‌جایی و انتقال ماسه در مقایسه با باد غالب کمتر است. بررسی شاخص همگنی جهت باد (UDI) نیز نشان داد که

مقدار سالانه این شاخص برابر با ۰.۶۹ است که بیانگر ثبات نسبی جهت باد در طول سال می‌باشد. در مقابل، کمترین مقدار UDI در فصل تابستان و برابر با ۰.۲۸ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تغییرپذیری شدید جهت بادهای ماسه‌زا در این فصل است. این نتایج با یافته‌های کتس و همکاران (۲۰۱۳) و البنا و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد؛ پژوهش‌هایی که نقش باد غالب و پایداری جهت وزش آن را به‌عنوان یکی از عوامل اساسی در شکل‌گیری، توسعه و پراکنش نبکاها مطرح کرده‌اند. همچنین، نتایج گل‌ماسه بیانگر آن است که جهت غالب انتقال ماسه در اغلب فصول سال با جهت باد غالب جنوب‌غربی انطباق دارد، در حالی که در فصل تابستان جهت غالب انتقال ماسه تقریباً عمود بر باد غالب است. این موضوع بیانگر تأثیرپذیری الگوی انتقال ماسه از تغییرات فصلی باد و نیز عوامل محیطی محلی نظیر اختلاف دما، شدت تابش خورشیدی و پوشش گیاهی است (رحمانثوف و همکاران، ۲۰۰۹).

تحلیل مورفومتری نبکاها نشان داد که ویژگی‌هایی نظیر ارتفاع، حجم و قطر قاعده نبکاها به‌شدت تحت تأثیر شدت و جهت باد، نوع پوشش گیاهی و فاصله از منابع تأمین ماسه قرار دارند. بیشترین ارتفاع و حجم نبکاها در امتداد جهت جنوب‌غربی و در مجاورت منابع ماسه‌ای مشاهده شد؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های لوو و همکاران (۲۰۱۶) و کائو و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشته و بیانگر نقش تعیین‌کننده شرایط محیطی محلی در کنترل مورفولوژی نبکاها است. افزون بر این، بررسی رابطه میان ساختار مورفولوژیک گیاهان و مخروط ماسه‌ای نبکاها نشان داد که گونه‌های گیاهی دارای تاج گسترده‌تر و ارتفاع بیشتر، توان بالاتری در تثبیت ماسه و کاهش فرسایش بادی دارند. این یافته با نتایج مطالعات مقصودی و همکاران (۱۳۹۱) در ایران و مشینگ و ابراهیم (۱۹۷۷) در شمال آفریقا همسو است و نشان می‌دهد که ویژگی‌های ریخت‌شناختی گیاهان و مخروط ماسه‌ای به‌صورت مستقیم بر میزان پایداری، تراکم و توسعه نبکاها اثرگذار هستند.

نتایج حاصل از دانه‌بندی و تحلیل گرانولومتری نمونه‌های رسوبی نشان داد که ذرات ماسه از یکنواختی نسبی برخوردار بوده و احتمالاً دارای منشأ رسوبی مشترک هستند. میانگین اندازه ذرات برابر با $\phi 2.574$ محاسبه شد؛ به‌طوری‌که بیشترین قطر ذرات مربوط به نمونه شماره ۱۰ با مقدار $\phi 3.061$ و کمترین قطر مربوط به نمونه شماره ۱۸ با مقدار $\phi 2.360$ بود. همچنین، میانگین شاخص جورشدگی برابر با ۱.۰۳۴ به‌دست آمد که بیانگر جورشدگی نسبتاً مناسب رسوبات است، در حالی‌که میانگین شاخص کج‌شدگی برابر با ۰.۷۷۳- نشان‌دهنده توزیع تقریباً متقارن ذرات می‌باشد. افزون بر این، میانگین کشیدگی ۳.۵۱ بیانگر قرارگیری رسوبات در طبقه کشیده تا بسیار کشیده است. این نتایج حاکی از آن است که رسوبات نبکاها عمدتاً تحت تأثیر بادهای محلی و حمل‌ونقل کوتاه‌برد قرار داشته‌اند و فرصت کافی برای جورشدگی کامل در طی انتقال طولانی‌مدت را نداشته‌اند. یافته‌های حاضر با نتایج موسوی حرمی (۱۳۸۹) و قربانیان و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد که بر وجود رابطه مستقیم میان اندازه ذرات، میزان جورشدگی و فاصله حمل رسوبات تأکید کرده‌اند.

علاوه بر این، بررسی ارتباط میان تراکم نبکاها و سطح ایستابی آب زیرزمینی نشان داد که کاهش سطح ایستابی موجب کاهش توان تثبیت ماسه و تضعیف رشد گیاهان سازنده نبکا می‌شود. این نتیجه با یافته‌های البنا و همکاران (۲۰۰۷) و کتس و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد که منابع آب زیرسطحی را یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری، توسعه و پایداری نبکاها معرفی کرده‌اند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میان متغیرهایی نظیر باد غالب و توان حمل ماسه، ویژگی‌های مورفومتری نبکاها، خصوصیات دانه‌ای رسوبات و دسترسی به منابع آب زیرزمینی، ارتباط و تعامل متقابل وجود دارد و این عوامل در مجموع نقش اساسی در شکل‌گیری، تراکم و الگوی پراکنش نبکاها در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند.

بر این اساس، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در مدیریت اراضی خشک و نیمه‌خشک و نیز برنامه‌ریزی‌های مرتبط با تثبیت ماسه‌های روان و کاهش فرسایش بادی کاربرد مؤثری داشته باشد. استفاده از شاخص‌هایی نظیر تراکم و مورفومتری نبکاها به‌عنوان نمایه‌های

فرسایش بادی، امکان پایش و ارزیابی روند بیابان‌زایی را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای انتخاب گونه‌های گیاهی سازگار با شرایط محیطی، در راستای احیای اکولوژیکی و تثبیت ماسه‌ها، فراهم آورد.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که رژیم باد منطقه هرات نقش اساسی در شکل‌گیری، توسعه و تغییرات مورفولوژیک نیک‌ها ایفا می‌کند. تحلیل داده‌های باد بیانگر آن بود که باد غالب سالیانه عمدتاً از جهت جنوب‌غربی می‌وزد و این الگو در بیشتر فصول سال نیز تداوم دارد. همسو بودن جهت غالب حمل ماسه (RDD) با جهت باد غالب در فصول زمستان، بهار و پاییز نشان‌دهنده تأثیر مستقیم سامانه‌های بادی منطقه بر فرآیند جابه‌جایی و رسوب‌گذاری ذرات است. در مقابل، تغییر جهت RDD در فصل تابستان بیانگر ناپایداری نسبی شرایط باد و تغییر در الگوی انتقال رسوبات در این فصل است.

نتایج تحلیل گلماسه و شاخص‌های حمل رسوب نشان داد که بیشترین توان حمل ماسه (DP) و بردار برآیند حمل ماسه (RDP) در فصل زمستان رخ می‌دهد. این امر بیانگر افزایش توان فرسایش بادی، جابه‌جایی ذرات و فعالیت فرآیندهای بادی در این فصل است. کاهش مقادیر DP و RDP در فصل تابستان نیز نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال رسوبات در این دوره زمانی کاهش یافته و شرایط باد از پایداری کمتری برخوردار است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فصلی رژیم باد تأثیر مستقیمی بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری منطقه دارد.

بررسی ویژگی‌های مورفومتری نیک‌ها نشان داد که این عوارض از نظر ابعاد، حجم و ویژگی‌های هندسی دارای تغییرات قابل‌توجهی هستند. این تغییرپذیری بیانگر اثر متقابل عوامل محیطی از جمله شدت و جهت باد، میزان رسوبات در دسترس، شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی بر فرآیند شکل‌گیری و تکامل نیک‌ها است. به‌طور کلی، توسعه بیشتر برخی نیک‌ها را می‌توان ناشی از تمرکز بالاتر رسوبات و پایداری نسبی رژیم باد در بخش‌هایی از منطقه دانست.

نتایج حاصل از تحلیل دانه‌بندی و پارامترهای آماری رسوبات نیز نشان داد که رسوبات منطقه از جورشدگی نسبتاً مناسب و یکنواختی قابل‌قبولی برخوردار هستند. مقادیر کج‌شدگی و کشیدگی بیانگر غالب بودن ذرات در محدوده مشخصی از اندازه دانه‌ها و شباهت نسبی منشأ رسوبات است. این وضعیت نشان می‌دهد که فرآیندهای بادی منطقه در انتقال و تفکیک ذرات عملکرد نسبتاً یکنواختی داشته و رسوبات تحت تأثیر شرایط محیطی نسبتاً مشابهی جابه‌جا و نهشته شده‌اند.

همچنین، نتایج تحلیل زمین‌آماری داده‌های سطح ایستابی نشان داد که روش کریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای کروی، مناسب‌ترین روش برای میان‌یابی داده‌های سطح ایستابی و تراکم نیک‌ها در منطقه مورد مطالعه است. برازش مناسب مدل کروی و مقادیر پایین RMSE بیانگر وجود همبستگی مکانی مطلوب بین داده‌های چاه‌های پی‌زومتری و پیوستگی فضایی مناسب سطح ایستابی در منطقه است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌تواند در نحوه استقرار پوشش گیاهی و در نتیجه شکل‌گیری و پایداری نیک‌ها نقش مؤثری داشته باشد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بیانگر وجود ارتباط مستقیم میان رژیم باد، ویژگی‌های رسوبی، شرایط سطح ایستابی و ویژگی‌های مورفومتری نیک‌ها در منطقه هرات است. فرآیندهای بادی به‌عنوان مهم‌ترین عامل ژئومورفولوژیک منطقه، ضمن کنترل جابه‌جایی رسوبات، در الگوی پراکنش و تکامل نیک‌ها نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. از سوی دیگر، وضعیت سطح ایستابی و شرایط محیطی منطقه نیز بر پایداری پوشش گیاهی و تثبیت رسوبات تأثیرگذار است. بنابراین، شناخت دقیق تعامل میان این عوامل می‌تواند نقش

مهمی در مدیریت مناطق بیابانی، کنترل فرسایش بادی، برنامه‌ریزی منابع طبیعی و پیش‌بینی تغییرات محیطی در منطقه هرات داشته باشد.

References

- Abbasi, H., et al. (2013). *Analysis of desert sediment grading*. Geography and Planning Publications. [In Persian].
- El-Bana, M. I., Nijs, I., Kockelbergh, F., & El-Bana, M. I. (2007). Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic mounds (nebkhas) in an arid coastal ecosystem. *Plant and Soil*, 293, 63–74.
- Ghorbanian, D., Hosseini, N., Abbasi, H., & Goli Jirandeh, A. (2013). Investigation of morphoscopic and granulometric characteristics of sand particles in Khartouran Erg of Shahrud. *Proceedings of the Third National Conference on Wind Erosion and Dust Storms*. [In Persian].
- Glenn, E. P., & Nagler, P. L. (2005). Comparative ecophysiology of *Tamarix ramosissima* and native trees in western U.S. riparian zones. *Journal of Arid Environments*, 61(3), 419–446.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
- Guijin, M. (1994). The environmental significance of vegetation cones of the Taklimakan Desert, China. *Arid Zone Research*, 11(1), 34–40. [In Chinese].
- Guijin, M. (1995). Types, origin, and evolution of the vegetation cones of the Taklimakan Desert. *Arid Zone Research*, 12, 31–37. [In Chinese].
- Hesp, P., & McLachlan, A. (2000). Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes. *Journal of Arid Environments*, 44, 155–167. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0515>
- Kassas, M. (1995). Desertification: A general review. *Journal of Arid Environments*, 30, 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(95\)90072-7](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(95)90072-7)
- Kassas, M. (1995). Desertification: A global challenge. *Environmental Conservation*, 22(3), 179–189.
- Kelly, R. H., & Burke, I. C. (2001). Heterogeneity of soil organic matter following death of individual plants in shortgrass steppe. *Ecology*, 82, 1256–1261. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[1256:HOSOMF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[1256:HOSOMF]2.0.CO;2)
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, 119–139.
- Luo, W., Zhao, W., & Liu, B. (2016). Growth stages affect species richness and vegetation patterns of nebkhas in the desert steppes of China. *Catena*, 137, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.019>
- Luo, W., Zhou, H., et al. (2016). Spatial variability of nebkha morphology under different vegetation conditions. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1134.
- Masghoodi, M., Negahban, S., Bagheri Seid Shakri, S., & Chezgha, S. (2012). Comparison and analysis of the geomorphological characteristics of nebkhas of four plant species in the west of Lut Plain (East of Shahdad–Takab Plain). *Physical Geography Research*, 79, 55–76. [In Persian].

- Memarian Khalilabad, H., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M. R., & Alavi Panah, S. K. (2005). Provenance of aeolian sediments in Rafsanjan region. *Iranian Journal of Natural Resources*, (3), 531–544. [In Persian].
- Memarian Khalilabad, H., Safdari, A. A., & Ekhtesasi, M. R. (1999). Provenancing of aeolian sediments in Fedisheh Neyshabur region. *Journal of Iranian Range and Desert Research*, 6(1), 26–41. [In Persian].
- Ministry of Energy. (2008). *Report on the prohibition of the Herat study area* (Internal report). [In Persian].
- Monshing, M., & Ibrahim, S. (1977). Nebkha morphology and desertification in North Africa. *Geoderma*, 18, 109–123.
- Mousavi Harami, S. M. R. (2010). *Geomorphology and sedimentology of Iranian deserts*. University of Tehran Press. [In Persian].
- Pool, M. R., Pool, S. K., Parvaneh, I., Dehghani, Z., & Rostamian, M. (2013). Nebkhas of *Salvadora persica* and their effect on the growth and survival of *Prosopis cineraria*, *Tamarix aphylla*, and *Capparis decidua* trees and shrubs. *Flora*, 208, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.01.004>
- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2001). *Salt-affected soils and their management*. FAO Land and Water Bulletin.
- Quets, J. J., Temmerman, S., El-Bana, M. I., Al-Rowaily, S. L., Assaeed, A. M., & Nijs, I. (2013). Unraveling landscapes with phytogenic mounds (nebkhas): An exploration of spatial pattern. *Acta Oecologica*, 49, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2012.11.003>
- Quets, J. J., El-Bana, M. I., Al-Rowaily, S. L., Assaeed, A. M., Temmerman, S., & Nijs, I. (2016). A mechanism of self-organization in a desert with phytogenic mounds. *Ecosphere*, 7(1), 1–20. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1187>
- Rahmonov, O., Snytko, V. A., & Szczypek, T. (2009). Phytogenic hillocks as an effect of indirect human activity. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 53, 359–367. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2009/0036>
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernandez, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., & Walker, B. (2007). Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316, 847–851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>
- Roodgarmi, P., & Abbasi, H. R. (2013). Morphological, physico-chemical and mineralogical characteristics of Abardejh sand dunes in Varamin. *Journal of Soil Research (Water and Soil Science)*, 27(1), 233–243. [In Persian].
- Shahriar, A., & Taheri Nejad, K. (2018). The role of wind direction and wind homogeneity index in temporal development and determination of sand dune morphology (Sadegh Abad Erg–Bafq). *Journal of Quaternary Iran*, 3(2), 187–198. [In Persian].
- Xue, D., & Yang, Y. (2023). Morphology, distribution, and formation of the nebkhas on Gobi and desert in China. In *Sand dunes of the Northern Hemisphere* (pp. 152–162). CRC Press.
- Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, 2, 315–327.

- Zhang, H., Li, S., Mason, J. A., Yizhaq, H., Gui, D., & Xu, Z. (2024). Biogeomorphological niche of a landform: Machine learning approaches reveal controls on the geographical distribution of *Nitraria tangutorum* nebkhas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(5), 1515–1529. <https://doi.org/10.1002/esp.5101>
- Zhang, P. J., Yang, J., Zhao, L. Q., Bao, S., & Song, B. Y. (2011). Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China. *Plant and Soil*, 347, 79–90. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0795-3>
- Zhou, H., Zhao, W., Luo, W., & Liu, B. (2016). Species diversity and vegetation distribution in nebkhas of *Nitraria tangutorum* in the desert steppes of China. *Ecological Research*, 30, 735–742. <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1302-3>

مقاله آماده انتشار