

بررسی دانه‌بندی رسوبات بادی در رابطه با مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: ارگ کاشان)

- ❖ اصغر توکلی فرد؛ کارشناس ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
- ❖ علی‌اکبر نظری سامانی*؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ ناصر مشهدی؛ استادیار مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران
- ❖ هدی قاسمی؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
- ❖ مجتبی هدایی آرانی؛ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

چکیده

ارگ ریگ بلند کاشان یکی از مهم‌ترین پهنه‌های پوشیده از ماسه است که، از دیدگاه ژئومورفولوژی، مجموعه‌ای متشکل از انواع تپه‌های ماسه‌ای مهم در ایران به‌شمار می‌آید. این تحقیق به منظور مقایسه دانه‌بندی رسوبات بادی در اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای و نیز قسمت‌های مختلف تپه‌های عرضی واقع در قسمت شمالی ارگ کاشان انجام شد. به منظور تعیین متغیرهای آماری مختلف، از رسوبات موجود در هر یک از انواع تپه‌های ماسه‌ای نمونه‌برداری شد. سپس، آزمایش دانه‌بندی هر یک از نمونه‌ها، بر اساس روش الک خشک، انجام گرفت و، در نهایت، پارامترهای آماری، از قبیل قطر میانگین، جورشدگی، کج‌شدگی، کشیدگی، d_{10} و d_{90} تعیین گردید. آنگاه، با انجام دادن آزمون توکی، معنی‌دار بودن اختلاف هر یک از متغیرها در تپه‌های مختلف بررسی شد. در نهایت، نتایج نشان داد که متغیرهای قطر میانگین، جورشدگی، d_{10} و d_{90} بین تپه‌های تثبیت‌شده و تپه‌های ماسه‌ای فعال در سطح ۹۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند. همچنین، مشخص شد که در تپه‌های عرضی، متغیرهای قطر میانگین و d_{90} در دامنه پشت به باد با بخش پایینی دامنه رو به باد اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد دارند، در حالی که با بخش میانی و بالایی دامنه رو به باد اختلاف معنی‌داری ندارند. نتایج مبین آن است که نسبت همگنی ابعاد دانه‌های ماسه در تپه‌های مختلف متفاوت است و این ناشی از تفاوت تغییرات سرعت باد در قسمت‌های مختلف ارگ و همچنین تپه‌های مختلف است.

واژگان کلیدی: ارگ کاشان، تپه‌های عرضی، تپه‌های طولی، تپه‌های فعال، دانه‌بندی، فرسایش بادی

مقدمه

بیابان‌ها مهم‌ترین بوم‌نظام (اکوسیستم) در محیط طبیعی ایران و قلمرو طیف گسترده‌ای از فرایندهای شکل‌زا به حساب می‌آیند؛ به‌ویژه با توجه به این نکته که طی دوره کواترنر این محیط شاهد تغییرات گسترده اقلیمی و محیطی بوده است. فرسایش بادی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌زا و تأثیرگذار بر محیط طبیعی و زندگی بشری در مناطق خشک به حساب می‌آید. اگرچه در بیشتر باورها حضور تپه‌های ماسه‌ای دلیل بر فعال بودن فرسایش بادی است، در عمل چنین نیست [۲]. تپه‌های ماسه‌ای شکل و حالت خاصی از طبیعت است که خمیرمایه آن، در کل، ذرات ماسه است که توسط باد به این شکل‌های ویژه تحول و تکامل یافته‌اند [۳]. باذسیالی است که حدود ۲۸ درصد از خشکی‌های جهان را تحت سیطره خود دارد [۱۴] و یکی از پیامدهای ژئومورفولوژی آن حمل و رسوب‌گذاری ماسه‌های روان است [۱۱]. به‌طور کلی، ماسه در مکان‌هایی تجمع می‌یابد که بنابر دلیلی (اعم از کاهش سرعت، زبری یا رطوبت زمین و وجود ناهمواری‌ها) در آن انرژی باد در امتداد جهت حرکت ماسه به اندازه کافی کاهش یابد [۶]. مناطق حاصل از رسوبگذاری تپه‌های ماسه‌ای یا ارگ در زبان محلی بیشتر مناطق ایران به نام ریگزار شناخته می‌شود و از نظر مساحت باید حداقل پهنه‌ای معادل ۴۰ تا ۱۲۵ کیلومترمربع را در بر بگیرد. بررسی‌های مربوط به مورفولوژی و حرکت تپه‌های ماسه‌ای، پایه و اساس شناخت فرایندهای بادی و مقادیر انتقال ماسه را فراهم می‌کند؛ آغازگر این تحقیقات، بگنولد (۱۹۴۱) بود. در این میان، شناخت حرکت تپه‌های بارخان، به دلیل خصوصیات

منحصربه‌فرد خود، بیشتر بررسی شده است. در سال‌های اخیر هم پیشرفت‌های مهمی در شناخت فرایندهای تپه‌های ماسه‌ای حاصل شده است که دربرگیرنده مطالعه بادها و حرکت ماسه‌ها در تپه‌های مختلف است. البته، مطالعات میدانی مانند مطالعات ماسه‌زارهای منطقه صحرای افریقا به کمک فرنچ^۱ (۱۹۵۰ و ۱۹۶۰) در تکمیل شدن پژوهش‌های بگنولد انجام شد و پایه بسیاری از استدلال‌های بعدی قرار گرفت. از آن زمان به بعد مطالعات صحرایی کاهش یافت و تکیه اصلی بر فون سنجش از دور گذاشته شد. در سال‌های اخیر هم بهترین مطالعات تپه‌های ماسه‌ای در کشورهایی مانند استرالیا، جنوب افریقا، هند، و آمریکا انجام شده است و بسیاری از خلأهای موجود مربوط به خاورمیانه و آسیا است که تقریباً ناشناخته مانده و فقط بررسی‌های سنجش از دوری بر روی آن‌ها صورت گرفته است [۳]. در ایجاد فرسایش بادی و تخریب‌های حاصل از آن عوامل مختلفی، از قبیل شدت و مدت وزش باد، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، توپوگرافی منطقه، و وضعیت پوشش گیاهی، دخالت دارند. کلیه این عوامل در ارتباط با هم هستند و به اتفاق به افزایش یا کاهش شدت فرسایش بادی در یک منطقه منجر می‌شوند [۷]. منظور از تثبیت تپه‌های ماسه‌ای جلوگیری از حرکت ماسه‌هاست. بهترین روش برای تثبیت ماسه‌های روان ایجاد پوشش گیاهی روی آن‌هاست [۵]. یکی از نخستین ویژگی‌هایی که در اغلب مطالعات مربوط به مناطق خشک و بیابانی، از جمله بررسی ارگ‌ها، فرسایش بادی، روندیابی حرکت تپه‌های ماسه‌ای، و تثبیت ماسه‌های روان،

1. French

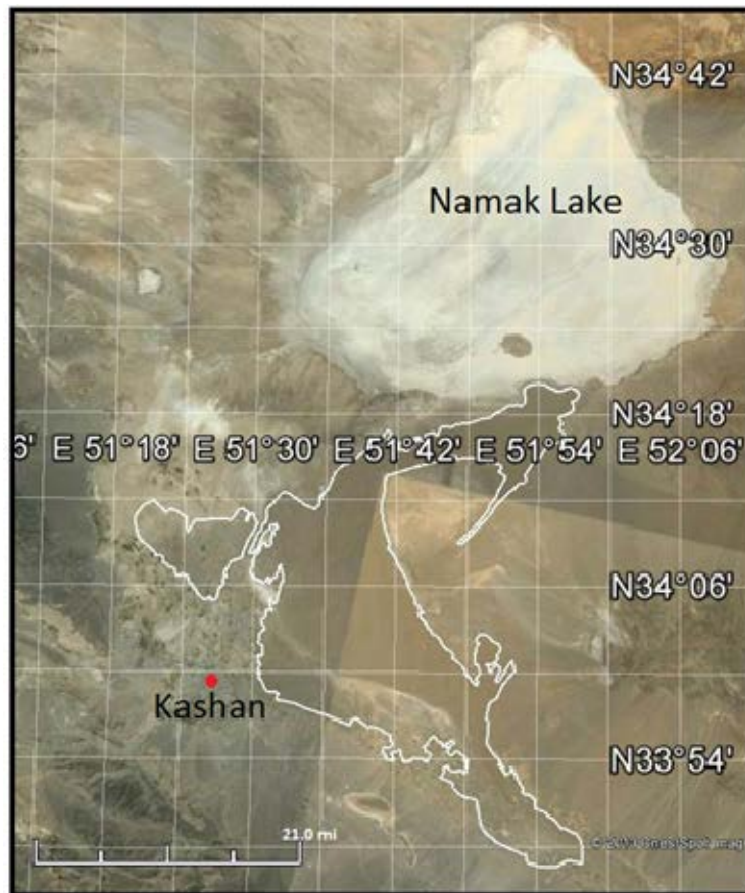
ماسه‌ای و نیز بخش‌های مختلف تپه‌های عرضی واقع در ارگ ریگ بلند کاشان است. همچنین سعی شد با مقایسه یافته‌ها با سایر پژوهش‌ها، رابطه بین درجه فعالیت و دانه‌بندی رسوب بررسی شود.

روش‌شناسی

معرفی منطقه مورد مطالعه

ارگ ریگ بلند کاشان یکی از مجموعه‌های پیچیده تپه‌های ماسه‌ای مهم ایران به‌شمار می‌آید. این مجموعه ماسه‌ای درست مجاور دریاچه نمک و داخل حوضه مسیله قرار دارد و دارای قوس‌های هلالی شکل است که تحدب آن به سمت غرب است. طول تحدب خارجی آن، با احتساب پیش‌تپه‌های ماسه‌ای شمال غربی، حدود ۱۱۵ کیلومتر و طول قوس داخلی آن حدود ۶۰ کیلومتر است و شهر کاشان در غرب آن واقع شده است. این رشته از امتداد قوس جنوبی به مجموعه ماسه‌ای ارگ اردستان واقع در شرق اردستان می‌پیوندد و تا شمال نائین به صورت یک رشته باریک به عرض متوسط حدود ۶ تا ۸ کیلومتر و طول بیش از ۲۴۰ کیلومتر امتداد می‌یابد، با این تفاوت که به سمت جنوب شرق و مشرق انسجام و پیوستگی خود را از دست می‌دهد. ارگ کاشان در مختصات $33^{\circ} 45'$ تا $34^{\circ} 15'$ عرض شمالی و $51^{\circ} 30'$ تا $51^{\circ} 45'$ طول شرقی قرار گرفته است [۱۵]. شکل ۱ محدوده منطقه مطالعاتی را روی گوگل ارث نشان می‌دهد.

بررسی و مطالعه می‌شود خصوصیات دانه‌بندی ذرات ماسه است، که به روش‌های گوناگون و برای مقاصد مختلفی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱]. نتایج حاصل از بررسی‌های صحرای نامیب و بررسی دانه‌بندی تپه‌های ماسه طولی نشان‌دهنده تفاوت بارز بین دانه‌بندی رسوبات روی تپه‌های مختلف، همچنین قسمت‌های مختلف یک تپه است [۸] به طوری که نوع حرکت جهش یا ریزش مسئول ایجاد این تفاوت ذکر شده است. البته، لازم به ذکر است که تاکنون طبقه‌بندی فراگیری برای وضعیت دانه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای همچنین قسمت‌های مختلف یک تپه در سطح جهانی صورت نگرفته است [۸،۴] و این خود نشانه پیچیدگی و نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتر در مقیاس منطقه‌ای است. با توجه به بارخان‌ها بیشترین فراوانی تپه‌های ماسه‌ای را در ارگ‌های ایران دارند [۲] و در اثر توسعه و تکامل آن‌ها انواع دیگری از تپه‌ها ایجاد می‌شوند. بخش عمده ارگ کاشان نیز در اثر تجمع و تکامل تپه‌های بارخانی توسعه یافته است. آنچه مهم است برای کنترل هرچه کارآتر این تپه دانستن ویژگی‌های مرفومتری و دانه‌بندی رسوبات آن‌ها در اولویت است. بافت رسوب نماینده مقدار انرژی موجود در محیط و سرعت آستانه فرسایش بادی است. پژوهش جاری به منظور بررسی و مقایسه دانه‌بندی رسوبات بادی در اشکال مختلف تپه‌های

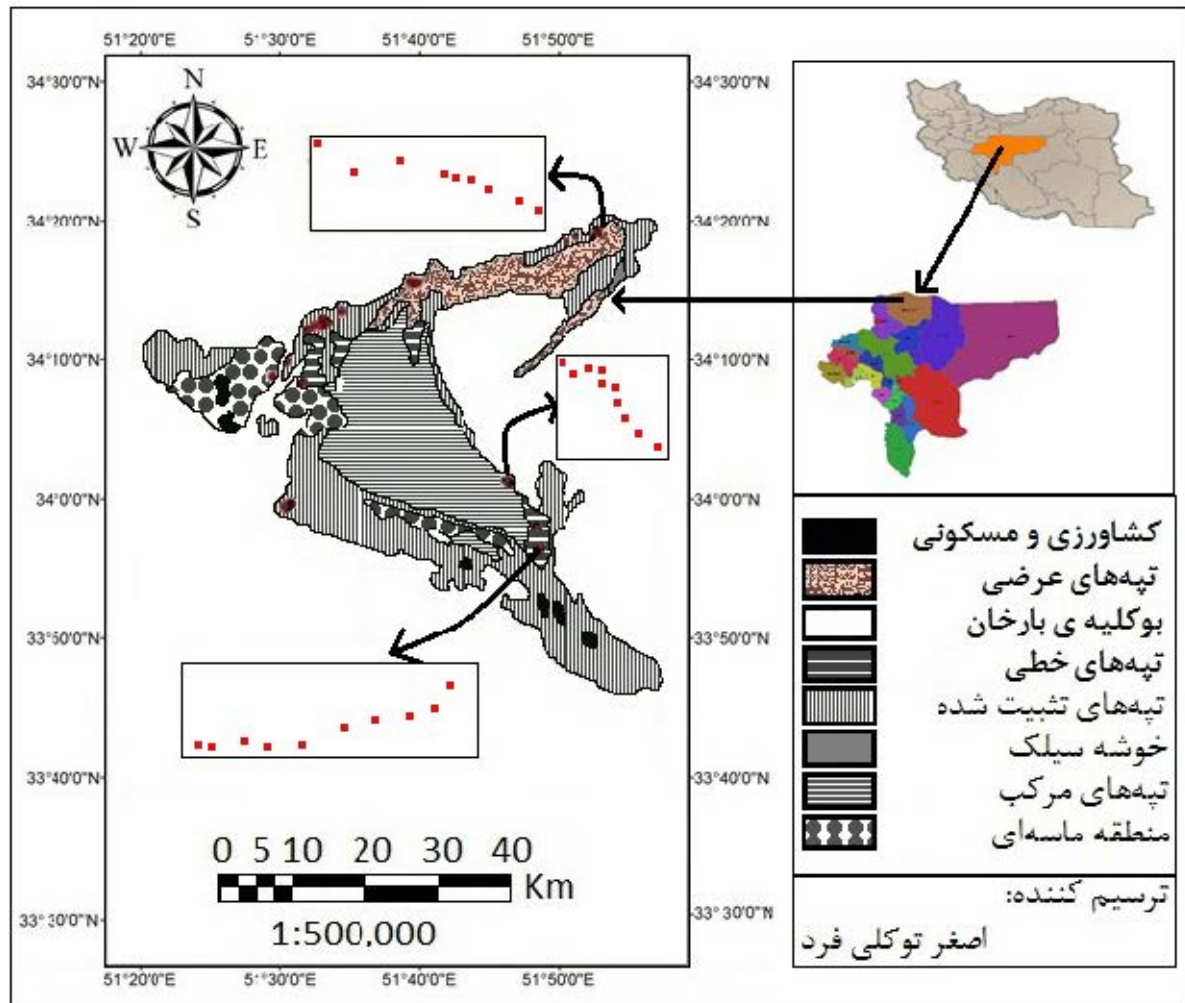


شکل ۱. ارگ ریگ بلند کاشان

نمونه رسوب از پایین دامنه، وسط دامنه، و بالای دامنه و در دامنه پشت به باد ۱ نمونه رسوب از کمی پایین تر از قله برداشت شد و به هر یک از نمونه‌ها کُد مجزایی داده شد. به عبارت دیگر، در هر تپه عرضی، ۴ نمونه رسوب تهیه شد. در سایر تپه‌های ماسه‌ای، اعم از فعال و غیرفعال، فقط ۱ نمونه رسوب برداشت شد. سپس، به منظور بررسی شاخص‌های دانه‌بندی (گرانولومتری)، نخست نمونه‌های برداشت‌شده از صحرا در سینی ریخته شد تا از بقایای گیاهی و هر ذره اضافی پاک شوند. سپس، دانه‌بندی نمونه‌ها بر اساس روش الک خشک انجام گرفت [۱۰]. بدین منظور، با استفاده از الک‌های ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۲۵، ۶۳، ۵۳ و کمتر از ۵۳ میکرون، از هر نمونه ۱۰۰ گرم به مدت ده دقیقه

روش تحقیق

در این تحقیق، نخست با استفاده از عکس‌های هوایی و نیز با استفاده از نرم‌افزار Google Earth انواع تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه مطالعاتی شناسایی شد. آنگاه منطقه مورد مطالعه به واحدهای همگن تفکیک شد. سپس، به منظور مقایسه دانه‌بندی و سایر پارامترهای آماری در تپه‌های ماسه‌ای مختلف، از رسوبات موجود در هر یک از انواع تپه‌های ماسه‌ای نمونه‌برداری شد. بدین منظور، در تپه‌های مختلف، بین ۱ تا ۳ عدد ترانسکت فرضی ایجاد شد و در هر ترانسکت فرضی حدود ۱۰ نمونه رسوب به فواصل تقریباً صد متر برداشت شد. روش نمونه‌برداری در هر یک از تپه‌های ماسه‌ای به این صورت بود که نخست در تپه‌های عرضی، در دامنه رو به باد، ۳



شکل ۲. نقشه مورفولوژی ارگ ریگ بلند کاشان و نقاط برداشت نمونه‌های رسوب

(نسبت همگنی) تعیین گردید [۱۲]. سپس، با استفاده از چارچوب طرح‌های آزمایش (Univariate General Linear Method) و با استفاده از آزمون توکی، معنی‌دار بودن اختلاف بین متغیرهای مورد نظر در اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای و نیز بخش‌های مختلف تپه‌های عرضی در سطح ۹۵ درصد بررسی شد.

در پایان، به منظور مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات Bubner و همکاران [۴] نمودارهای توزیع فراوانی اندازه ذرات در انواع مختلف تپه‌های

الک شد و محتوی رسوب باقی‌مانده بر روی هر الک به دقت وزن گردید. به منظور راحت‌تر شدن تعیین پارامترهای آماری مربوط به دانه‌بندی رسوبات، ترتیب الک‌ها طوری انتخاب شد که قطر سوراخ‌های هر الک تقریباً نصف قطر سوراخ‌های الک قبلی باشد [۸]. تعیین شاخص‌های دانه‌بندی به روش فولک^۱ (۱۹۷۴) توسط نرم‌افزار Gradistat انجام شد و پارامترهای آماری، از قبیل قطر میانگین^۲، جورشدگی^۳، کج‌شدگی^۴، کشیدگی^۵، d_{10} و d_{90}

1. fulk
2. mean diameter
3. sorting
4. skewness

عرضی در بخش شمال شرق (نزدیک دریاچه نمک) قرار گرفته‌اند.

بنابراین، به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تپه‌های ماسه‌ای موجود در شمال، مرکز، و جنوب ارگ به ترتیب عبارت‌اند از: تپه‌های عرضی، تپه‌های مرکب، و تپه‌های خطی. در بخش کوچکی در جنوب ارگ نیز (اطراف ابوزیدآباد)، بوکلیه بارخان مشاهده شد که در حال گسترش و تشکیل تپه‌های بارخانی است.

در ادامه، به نتایج بررسی‌های آماری و منحنی‌های دانه‌بندی اشاره خواهد شد. بررسی‌های نمودارهای توزیع فراوانی نسبی و تجمعی نمونه‌های رسوب تپه‌های ماسه‌ای (شکل‌های ۳ و ۴) نشان‌دهنده تفاوت بین تپه‌های مختلف است. در واقع، نسبت ذرات مختلف درشت‌دانه و همچنین سیلت و رس متفاوت است. برای نمونه در تپه‌های تثبیت‌شده مقدار ذرات ریزدانه بیشتر شده است.

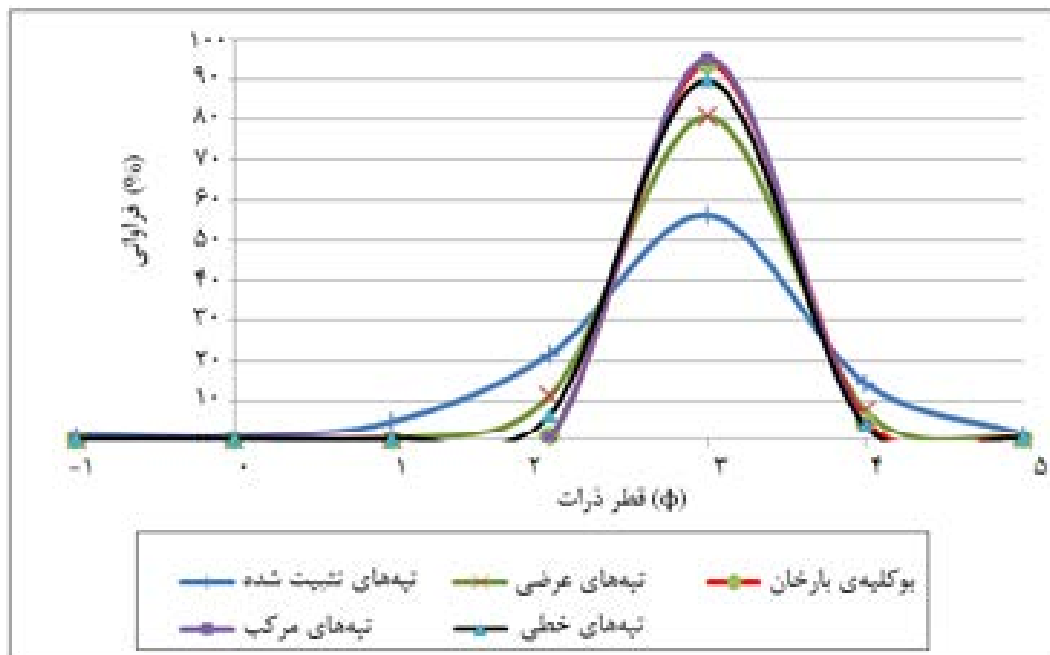
ماسه‌ای با در نظر گرفتن پارامترهای قطر ذرات بر حسب میلی‌متر و نیز نسبت فراوانی به قطر ذرات بر حسب $(\frac{\%}{\text{mm}})$ ترسیم گردید و نتایج دو تحقیق مقایسه شد.

نتایج

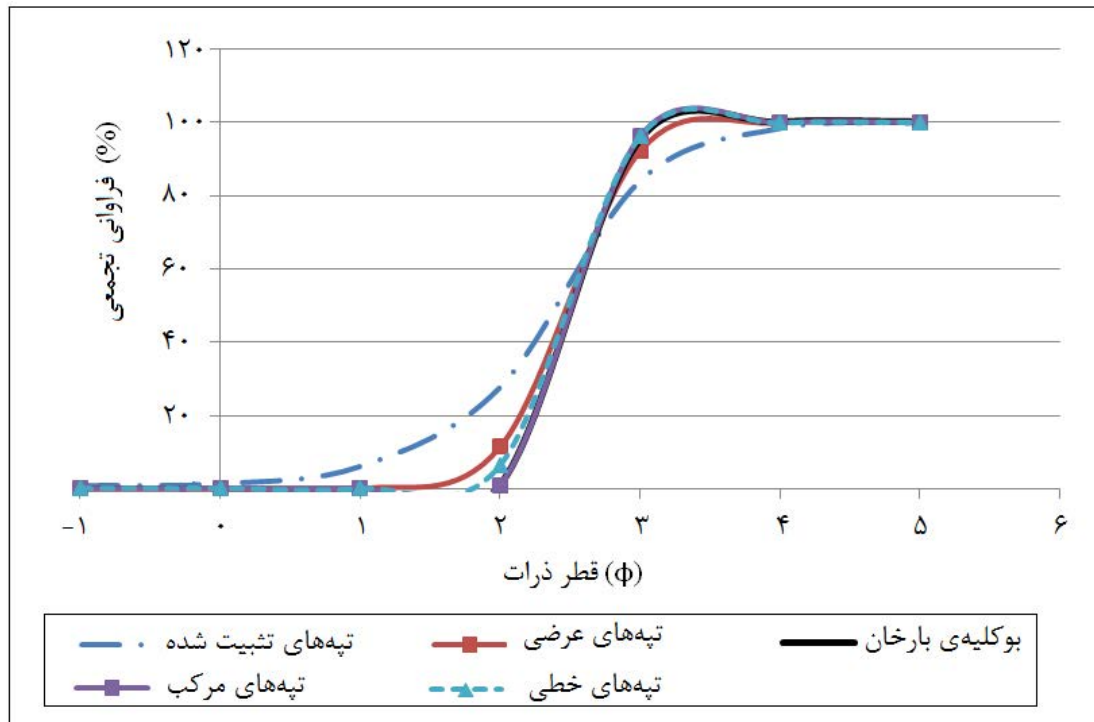
شکل ۲ نقشه مورفولوژی ارگ و نیز ترانسکت‌های ایجادشده به منظور نمونه‌برداری رسوبات بادی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۲، انواع تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه مورد مطالعه عبارت‌اند از: تپه‌های تثبیت‌شده، تپه‌های عرضی، تپه‌های مرکب، تپه‌های طولی، خوشه سیلک، و بوکلیه بارخان.

پهنه‌های ماسه‌ای و اراضی کشاورزی و مسکونی دیگر عوارضی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. بازدیدهای صحرایی و استفاده از پایگاه Google Earth نشان داد که تپه‌های تثبیت‌شده در حاشیه ارگ، تپه‌های خطی در جنوب ارگ، و تپه‌های



شکل ۳. نمودار توزیع فراوانی نسبی ذرات رسوب در تپه‌های ماسه‌ای مختلف



شکل ۴. نمودار تجمعی قطر ذرات در تپه‌های ماسه‌ای مختلف

نتایج مربوط به دانه‌بندی تپه‌های عرضی نیز نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین متغیرهای دانه‌بندی ذرات ماسه در قسمت‌های پایین، میانی، و بالای تپه‌های عرضی وجود نداشته است. همچنین، مشخص شد که قطر میانگین و d_{90} در دامنه پشت به باد با بخش پایینی دامنه رو به باد اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد داشت، ولی با بخش میانی و بالایی دامنه رو به باد اختلاف معنی‌داری نداشت. در پایان مشخص شد که متغیرهای d_{90} ، جورشدگی، کشیدگی، و کج‌شدگی در دامنه رو به باد و دامنه پشت به باد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. جدول‌های ۳ و ۴ نتایج آنالیز آزمون توکی برای متغیرهای قطر میانگین و d_{90} در قسمت‌های مختلف تپه‌های عرضی را نشان می‌دهند

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در بعضی از متغیرهای آماری، دانه‌بندی تپه‌های تثبیت‌شده متفاوت با سایر تپه‌های ماسه‌ای فعال است. به عبارت دیگر، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که متغیرهای قطر میانگین، جورشدگی، d_{10} و d_{90} بین تپه‌های تثبیت‌شده و تپه‌های ماسه‌ای فعال در سطح ۹۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند، ولی در بین تپه‌های فعال هیچ اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول‌های ۱ و ۲).

همچنین، مشخص شد که متغیر کشیدگی یا پخش‌شدگی در تپه‌های غیرفعال با تپه‌های طولی، مرکب، و بوکلیه بارخان و نیز متغیر کج‌شدگی یا چولگی فقط بین تپه‌های بوکلیه بارخان و تثبیت‌شده در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌دار داشتند. آنالیز

جدول ۱. نتایج آزمون توکی برای متغیر قطر میانگین در تپه‌های ماسه‌ای مختلف

| تپه ماسه‌ای (I) | تپه‌های ماسه‌ای (J) | اختلاف میانگین (I-J) | خطای استاندارد | سطح معنی داری | فاصله اطمینان ۹۵٪ | |
|--------------------|------------------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------|
| | | | | | حد پایینی | حد بالایی |
| تثبیت شده | عرضی | ۲۴,۸۷۴۶* | ۴,۷۷۰۳۶ | ۰ | ۱۱,۶۷۰۲ | ۳۸,۰۷۸۹ |
| | طولی | ۳۰,۰۲۴۸* | ۷,۴۹۹۰۹ | ۰,۰۰۱ | ۹,۲۶۷۳ | ۵۰,۷۸۲۳ |
| | مرکب | ۳۲,۳۸۸۵* | ۸,۴۲۹۴۴ | ۰,۰۰۲ | ۹,۰۵۵۸ | ۵۵,۷۲۱۱ |
| عرضی | بوکلیه بارخان | ۳۳,۱۵۷۷* | ۷,۰۸۲۱۴ | ۰ | ۱۳,۵۵۴۳ | ۵۲,۷۶۱۱ |
| | تثبیت شده | -۲۴,۸۷۴۶* | ۴,۷۷۰۳۶ | ۰ | -۳۸,۰۷۸۹ | -۱۱,۶۷۰۲ |
| | طولی | ۵,۱۵۰۳ | ۶,۷۴۹۴۳ | ۰,۹۴۱ | -۱۳,۵۳۲۲ | ۲۳,۸۲۲۷ |
| طولی | مرکب | ۷,۵۱۳۹ | ۷,۷۷۰۰۶ | ۰,۸۶۹ | -۱۳,۹۹۳۶ | ۲۹,۰۲۱۴ |
| | بوکلیه بارخان | ۸,۲۸۳۱ | ۶,۲۸۲۹۳ | ۰,۶۸ | -۹,۱۰۸ | ۲۵,۶۷۴۳ |
| | تثبیت شده | -۳۰,۰۲۴۸* | ۷,۴۹۹۰۹ | ۰,۰۰۱ | -۵۰,۷۸۲۳ | -۹,۲۶۷۳ |
| مرکب | عرضی | -۵,۱۵۰۳ | ۶,۷۴۹۴۳ | ۰,۹۴۱ | -۲۳,۸۳۲۷ | ۱۳,۵۳۲۲ |
| | طولی | ۲,۳۶۳۶ | ۹,۶۸۷۸۲ | ۰,۹۹۹ | -۲۴,۴۵۲۳ | ۲۹,۱۷۹۵ |
| | بوکلیه بارخان | ۳,۱۳۲۹ | ۸,۵۴۱۳۸ | ۰,۹۹۶ | -۲۰,۵۰۹۷ | ۲۶,۷۷۵۴ |
| بوکلیه | تثبیت شده | -۳۲,۳۸۸۵* | ۸,۴۲۹۴۴ | ۰,۰۰۲ | -۵۵,۷۲۱۱ | -۹,۰۵۵۸ |
| | عرضی | -۷,۵۱۳۹ | ۷,۷۷۰۰۶ | ۰,۸۶۹ | -۲۹,۰۲۱۴ | ۱۳,۹۹۳۶ |
| | طولی | -۲,۳۶۳۶ | ۹,۶۸۷۸۲ | ۰,۹۹۹ | -۲۹,۱۷۹۵ | ۲۴,۴۵۲۳ |
| بوکلیه | بوکلیه بارخان | ۰,۷۶۹۲ | ۹,۳۶۸۷۹ | ۱ | -۲۵,۱۶۳۶ | ۲۶,۷۰۲۱ |
| | تثبیت شده | -۳۳,۱۵۷۷* | ۷,۰۸۲۱۴ | ۰ | -۵۲,۷۶۱۱ | -۱۳,۵۵۴۳ |
| | عرضی | -۸,۲۸۳۱ | ۶,۲۸۲۹۳ | ۰,۶۸ | -۲۵,۶۷۴۳ | ۹,۱۰۸ |
| بوکلیه | طولی | -۳,۱۳۲۹ | ۸,۵۴۱۳۸ | ۰,۹۹۶ | -۲۶,۷۷۵۴ | ۲۰,۵۰۹۷ |
| | مرکب | -۰,۷۶۹۲ | ۹,۳۶۸۷۹ | ۱ | -۲۶,۷۰۲۱ | ۲۵,۱۶۳۶ |

نکته: علامت ستاره بالای اعداد به معنای معنی دار بودن اختلاف میانگین در سطح ۹۵ درصد است.

جدول ۲. نتایج آزمون توکی برای متغیر جورشدگی در تپه‌های ماسه‌ای مختلف

| تپه‌های ماسه‌ای (I) | تپه‌های ماسه‌ای (J) | اختلاف میانگین (I-J) | خطای استاندارد | سطح معنی‌داری | فاصله اطمینان ۹۵٪ | |
|---------------------|---------------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------|
| | | | | | حد پایینی | حد بالایی |
| تثبیت شده | عرضی | ۰,۴۲۰۶* | ۰,۰۳۶۷۳ | ۰ | ۰,۳۱۹ | ۰,۵۲۲۳ |
| | طولی | ۰,۵۴۰۲* | ۰,۰۵۷۷۳ | ۰ | ۰,۳۸۰۴ | ۰,۷ |
| | مرکب | ۰,۵۵۷۴* | ۰,۰۶۴۹ | ۰ | ۰,۳۷۷۸ | ۰,۷۳۷ |
| | بوکلیه بارخان | ۰,۵۴۹۲* | ۰,۰۵۴۵۲ | ۰ | ۰,۳۹۸۳ | ۰,۷۰۰۲ |
| عرضی | تثبیت شده | -۰,۴۲۰۶* | ۰,۰۳۶۷۳ | ۰ | -۰,۵۲۲۳ | -۰,۳۱۹ |
| | طولی | ۰,۱۱۹۶ | ۰,۰۵۱۹۶ | ۰,۱۵۱ | -۰,۰۲۴۲ | ۰,۲۶۳۴ |
| | مرکب | ۰,۱۳۶۸ | ۰,۰۵۹۸۲ | ۰,۱۵۶ | -۰,۰۲۸۸ | ۰,۳۰۲۳ |
| | بوکلیه بارخان | ۰,۱۲۸۶ | ۰,۰۴۸۳۷ | ۰,۰۶۶ | -۰,۰۰۵۳ | ۰,۲۶۴۵ |
| طولی | تثبیت شده | -۰,۵۴۰۲* | ۰,۰۵۷۷۳ | ۰ | -۰,۷ | -۰,۳۸۰۴ |
| | عرضی | -۰,۱۱۹۶ | ۰,۰۵۱۹۶ | ۰,۱۵۱ | -۰,۲۶۳۴ | ۰,۰۲۴۲ |
| | مرکب | ۰,۰۱۷۲ | ۰,۰۷۴۵۸ | ۰,۹۹۹ | -۰,۱۸۹۳ | ۰,۲۲۳۶ |
| | بوکلیه بارخان | ۰,۰۰۹ | ۰,۰۶۵۷۶ | ۱ | -۰,۱۷۳ | ۰,۱۹۱ |
| مرکب | تثبیت شده | -۰,۵۵۷۴* | ۰,۰۶۴۹ | ۰ | -۰,۷۳۷ | -۰,۳۷۷۸ |
| | عرضی | -۰,۱۳۶۸ | ۰,۰۵۹۸۲ | ۰,۱۵۶ | -۰,۳۰۲۳ | ۰,۰۲۸۸ |
| | طولی | -۰,۰۱۷۲ | ۰,۰۷۴۵۸ | ۰,۹۹۹ | -۰,۲۲۳۶ | ۰,۱۸۹۳ |
| | بوکلیه بارخان | -۰,۰۰۸۲ | ۰,۰۷۲۱۳ | ۱ | -۰,۲۰۷۸ | ۰,۱۹۱۵ |
| بوکلیه | تثبیت شده | -۰,۵۴۹۲* | ۰,۰۵۴۵۲ | ۰ | -۰,۷۰۰۲ | -۰,۳۹۸۳ |
| | عرضی | -۰,۱۲۸۶ | ۰,۰۴۸۳۷ | ۰,۰۶۶ | -۰,۲۶۴۵ | ۰,۰۰۵۳ |
| | طولی | -۰,۰۰۹ | ۰,۰۶۵۷۶ | ۱ | -۰,۱۹۱ | ۰,۱۷۳ |
| | مرکب | ۰,۰۰۸۲ | ۰,۰۷۲۱۳ | ۱ | -۰,۱۹۱۵ | ۰,۲۰۷۸ |

جدول ۳. نتایج آزمون توکی برای متغیر قطر میانگین در تپه‌های عرضی

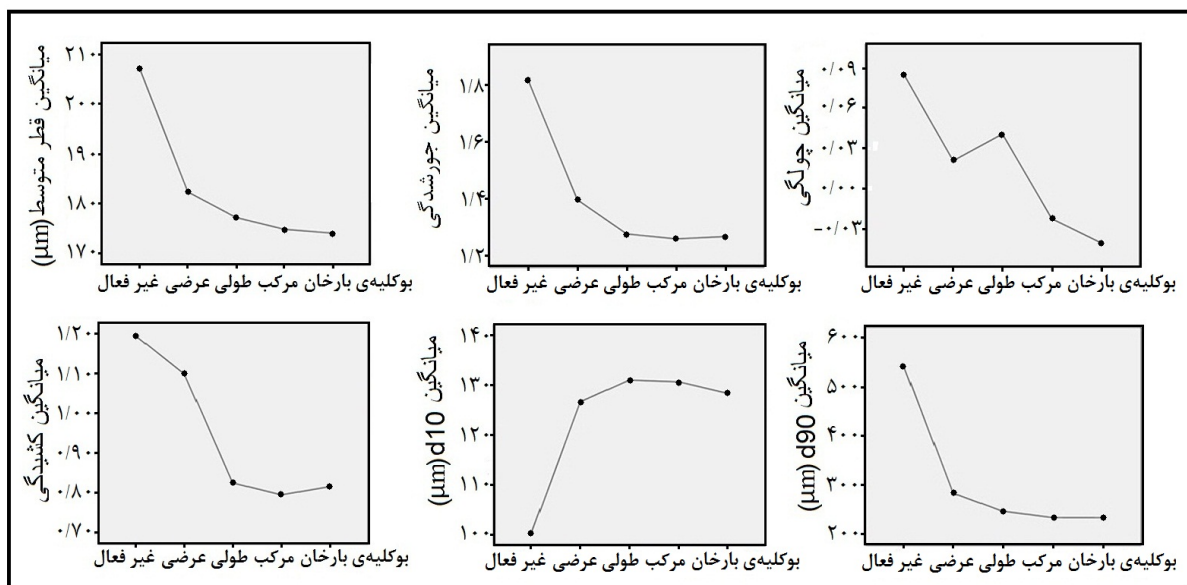
| تپه‌های عرضی (I) | تپه‌های ماسه‌ای (J) | اختلاف میانگین (I-J) | خطای استاندارد | سطح معنی‌داری | فاصله اطمینان ۹۵٪ | |
|------------------|---------------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------|
| | | | | | حد پایینی | حد بالایی |
| پشت به باد | پایین | -۱۱,۷۲۷۸* | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۰۵۴ | -۲۳,۲۵۴۳ | -۰,۲۰۱۲ |
| | وسط | -۴,۰۲۲۲ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۷۹۵ | -۱۵,۵۴۸۸ | ۷,۵۰۴۳ |
| | بالا | -۶,۵۲۷۸ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۴۴۸ | -۱۸,۰۵۴۳ | ۴,۹۹۸۸ |
| پایین | پشت به باد | ۱۱,۷۲۷۸* | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۰۴۵ | ۰,۲۰۱۲ | ۲۳,۲۵۴۳ |
| | وسط | ۷,۷۰۵۶ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۳۰۱ | -۳,۸۲۱ | ۱۹,۲۳۲۱ |
| | بالا | ۵,۲ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۶۳۶ | -۶,۳۲۶۵ | ۱۶,۷۲۶۵ |
| وسط | پشت به باد | ۴,۰۲۲۲ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۷۹۵ | -۷,۵۰۴۳ | ۱۵,۵۴۸۸ |
| | پایین | -۷,۷۰۵۶ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۳۰۱ | -۱۹,۲۳۲۱ | ۳,۸۲۱ |
| | بالا | -۲,۵۰۵۶ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۹۴ | -۱۴,۰۳۲۱ | ۹,۰۲۱ |
| بالا | پشت به باد | ۶,۵۲۷۸ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۴۴۸ | -۴,۹۹۸۸ | ۱۸,۰۵۴۳ |
| | پایین | -۵,۲ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۶۳۶ | -۱۶,۷۲۶۵ | ۶,۳۲۶۵ |
| | وسط | ۲,۵۰۵۶ | ۴,۳۷۶۵۳ | ۰,۹۴ | -۹,۰۲۱ | ۱۴,۰۳۲۱ |

جدول ۴. نتایج آزمون توکی برای متغیر d_{90} در تپه‌های عرضی

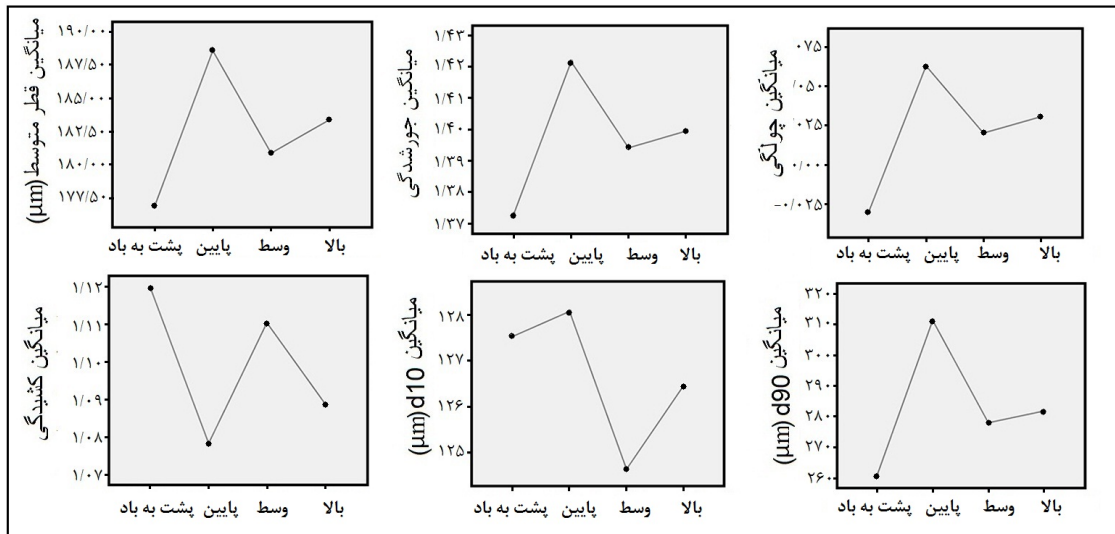
| تپه‌های عرضی (I) | تپه‌های ماسه‌ای (J) | اختلاف میانگین (I-J) | خطای استاندارد | سطح معنی داری | فاصله اطمینان ۹۵٪ | |
|------------------|---------------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------|
| | | | | | حد پایینی | حد بالایی |
| پشت به باد | پایین | -۵۰,۵۱۱۱* | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۰۳۲ | -۹۷,۸۹۷۸ | -۳,۱۲۴۴ |
| | وسط | -۱۷,۱۳۸۹ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۷۷۷ | -۶۴,۵۲۵۶ | ۳۰,۲۴۷۸ |
| | بالا | -۲۰,۹۶۶۷ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۶۵۱ | -۶۸,۳۵۳۴ | ۲۶,۴۲ |
| پایین | پشت به باد | ۵۰,۵۱۱۱* | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۰۳۲ | ۳,۱۲۴۴ | ۹۷,۸۹۷۸ |
| | وسط | ۳۳,۳۷۲۲ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۲۵۷ | -۱۴,۰۱۴۵ | ۹۷,۷۵۸۹ |
| | بالا | ۲۹,۵۴۴۴ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۳۶۲ | -۱۷,۸۴۲۳ | ۷۶,۹۳۱۲ |
| وسط | پشت به باد | ۱۷,۱۳۸۹ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۷۷۷ | -۳۰,۲۴۷۸ | ۶۴,۵۲۵۶ |
| | پایین | -۳۳,۳۷۲۲ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۲۵۷ | -۸۰,۷۵۸۹ | ۱۴,۰۱۴۵ |
| | بالا | -۸۲۷۸۳ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۹۹۷ | -۵۱,۲۱۵۴ | ۴۳,۵۵۸۹ |
| بالا | پشت به باد | ۲۰,۹۶۶۷ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۶۵۱ | -۲۶,۴۲ | ۶۸,۳۵۳۴ |
| | پایین | -۲۹,۵۴۴۴ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۳۶۲ | -۷۶,۹۳۱۲ | ۱۷,۸۴۲۳ |
| | وسط | -۸۲۷۸ | ۱۷,۹۹۲۳۳ | ۰,۹۹۷ | -۴۳,۵۵۸۹ | ۵۱,۵۱۴۵ |

نمودارهایی به صورت شکل ۵ ترسیم گردید. این نمودارها به خوبی نشان‌دهنده تفاوت تپه‌های ماسه‌ای مختلف از لحاظ متغیرهای مورد مطالعه است.

به منظور مقایسه بهتر تپه‌های ماسه‌ای مختلف و بررسی تفاوت متغیرهای مورد بررسی در آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، میانگین هر یک از متغیرها برای انواع مختلف اشکال ماسه‌ای تعیین شد و



شکل ۵. مقایسه میانگین متغیرهای مورد مطالعه در انواع تپه‌های ماسه‌ای



شکل ۶. میانگین متغیرهای مربوط به دانه‌بندی در قسمت‌های مختلف تپه‌های عرضی

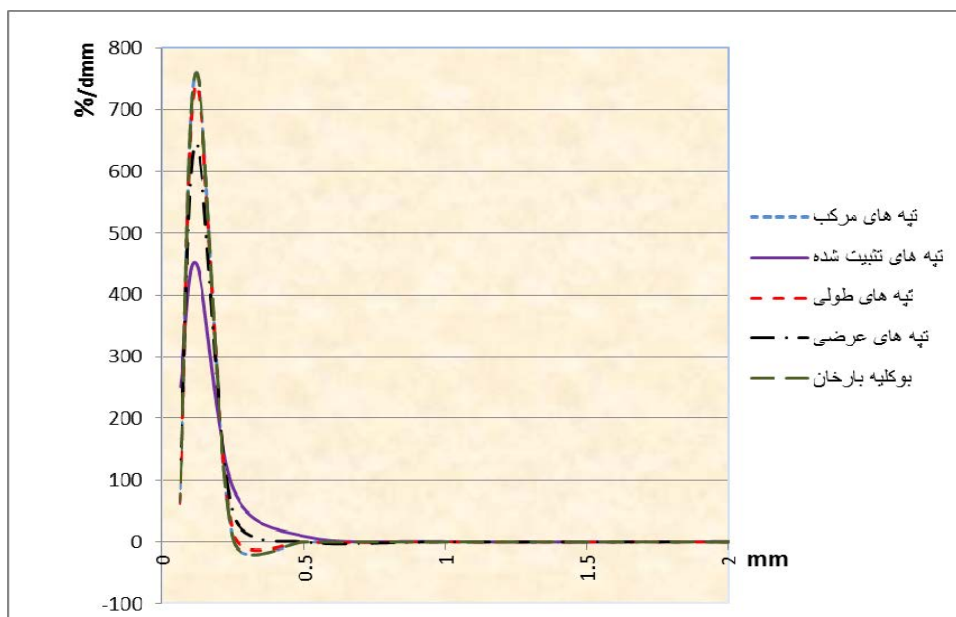
بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که متغیرهای قطر میانگین، جورشدهگی، d_{10} و d_{90} بین تپه‌های تثبیت‌شده و تپه‌های ماسه‌ای فعال در سطح ۹۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند. به عبارت دیگر، رسوبات تپه‌های ماسه‌ای فعال قطر میانگین کمتر و جورشدهگی بیشتری دارند. این امر نشان‌دهنده نظم و یکنواختی بیشتر رسوبات تپه‌های ماسه‌ای فعال است. با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین جورشدهگی و تحرک تپه وجود دارد، نتیجه گرفته می‌شود که ایجاد پوشش گیاهی در تپه‌های ماسه‌ای به‌خوبی مانع فعالیت آن‌ها شده است. در واقع، با تثبیت تپه‌های ماسه‌ای، ماسه‌های ریزدانه‌تر توسط باد حمل می‌شوند و ذرات درشت‌تر باقی می‌مانند. همچنین، به دلیل وجود پوشش گیاهی، ذرات سیلت و رس به میزان کمتری توسط باد جابه‌جا می‌شوند. بنابراین، در تپه‌های تثبیت‌شده فراوانی ذرات درشت‌دانه و همچنین ذرات سیلت و رس بسیار بیشتر است، که نشان‌دهنده جورشدهگی کمتر این رسوبات است. این موضوع کاملاً در آزمایش‌های دانه‌بندی نمونه‌های رسوب

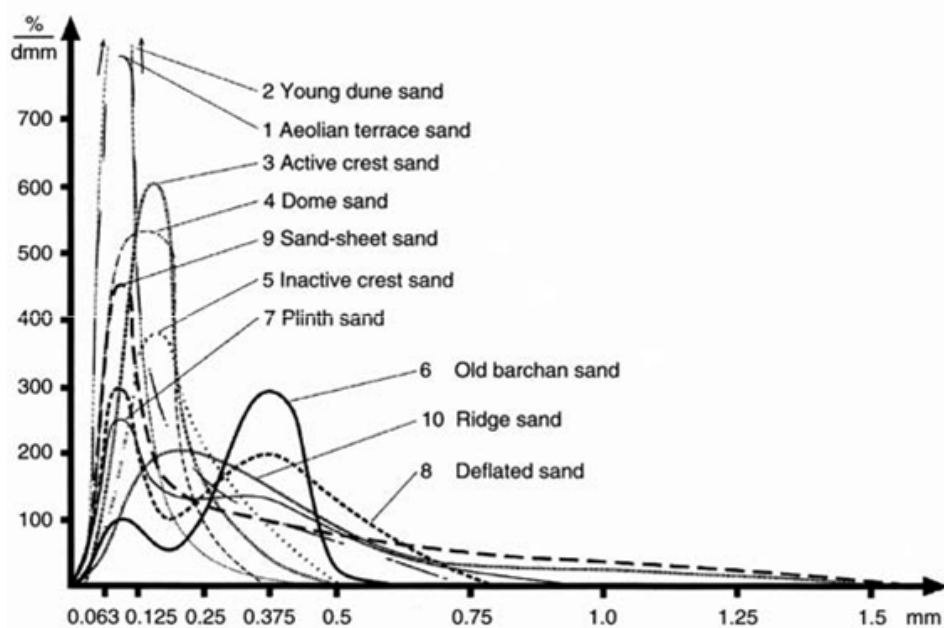
همچنین، به منظور مقایسه بهتر هر یک از متغیرهای مورد بررسی در تپه‌های عرضی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، نمودارهایی ترسیم شد. این نمودارها میانگین متغیرهای مورد مطالعه در قسمت‌های پایین، وسط، و بالای دامنه رو به باد و همچنین دامنه پشت به باد را نشان می‌دهد (شکل ۶). با توجه به شکل ۵، نتیجه گرفته می‌شود که تپه‌های تثبیت‌شده نسبت به تپه‌های تثبیت‌نشده دارای قطر میانگین بیشتر و جورشدهگی کمتر هستند. همچنین، با توجه به شکل ۶، نتیجه گرفته می‌شود که در تپه‌های عرضی، رسوبات بادی در دامنه پشت به باد و نیز پایین دامنه رو به باد نسبت به سایر مناطق به ترتیب ریزدانه‌تر و درشت‌دانه‌تر هستند. به طور کلی، از لحاظ قطر متوسط، رسوبات بادی در تپه‌های عرضی از ریزدانه به درشت‌دانه عبارت‌اند از: دامنه پشت به باد، وسط دامنه رو به باد، بالای دامنه رو به باد، و پایین دامنه رو به باد. همچنین، نتیجه گرفته می‌شود که ذرات ماسه در تپه‌های عرضی دارای جورشدهگی بد بوده و از لحاظ چولگی یا کج‌شدگی به صورت متقارن و از لحاظ کشیدگی متوسط‌اند.

که در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، برای مقایسه با یافته‌های دیگر نقاط دنیا نمودار استاندارد ارائه شده توسط [۴] در شکل ۸ ارائه شده است.

تأیید و مشاهده شد؛ نمونه‌های رسوب تپه‌های ماسه‌ای تثبیت شده، نسبت به تپه‌های ماسه‌ای فعال، ذرات درشت‌دانه و همچنین سیلت و رس بسیار بیشتری داشتند. به منظور تأیید این موضوع و در راستای کامل شدن بررسی نموداری رابطه بین قطر ذرات و نسبت فراوانی به قطر ذرات ترسیم شد



شکل ۷. نمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات در رابطه با نسبت $(\frac{\%}{\text{mm}})$ در انواع مختلف تپه‌های ماسه‌ای



شکل ۸. نمودار استاندارد برای جدا کردن تپه‌های مختلف حاصل از پژوهش‌های (BESLER 2008) در ارگ‌های قاره آفریقا [۴]

می‌کنند. در این شرایط ذرات درشت‌تر راحت‌تر ریزش می‌کنند و ذرات ریزتر به‌جای می‌مانند. بنابراین، قطر متوسط ذرات در این دامنه کمتر خواهد شد و جورشدگی بهتری خواهد داشت. لانکستر (۱۹۸۱) مشابه این مورد را در تپه‌های خطی صحرای نامیب گزارش کرده است و بیشترین قطر ذرات به همراه جورشدگی متوسط و چولگی مثبت را در پایین دامنه‌ها گزارش کرده است [۸].

با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸، مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به تپه‌های تثبیت‌شده در شکل ۷ با نمودار مربوط به تپه‌های تثبیت‌شده در شکل ۸ همخوانی دارد. همچنین، ملاحظه می‌شود که نمودارهای مربوط به تپه‌های فعال شامل تپه‌های بوکلیه بارخان، تپه‌های طولی، تپه‌های عرضی، و تپه‌های مرکب، از نمودار مربوط به تپه‌های ماسه‌ای جوان (young sand dunes) پیروی می‌کنند. به احتمال زیاد، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سن تپه‌های ماسه‌ای فعال مذکور را می‌توان کمتر از ۱۰۰۰ سال تخمین زد. ولی وجود تپه‌هایی که با رژیم بادی فعلی در هماهنگی نیستند (مانند هرم‌ها و تپه‌های مرکب) متعلق به دوره‌های بسیار قدیمی‌تر است که شدت فرسایش بادی بیشتر بوده است (احتمال LGM^3).

آنچه مسلم است نوع رژیم بادی و مقدار دبی ماسه مهم‌ترین عامل در تکامل تپه‌های ماسه‌ای است [۳، ۴، ۸]. همچنین، با توجه به اینکه در قسمت‌هایی از ارگ تپه‌هایی مشاهده شد (مانند هرم‌ها در قسمت حاشیه شرقی ارگ) که به دلیل کوچک‌بودن بر روی نقشه مورفولوژی ارگ آورده نشده است. همچنین وجود تپه‌های مرکب بارخانی (آکله) نیاز است تا برای بازشناخت شرایط تشکیل آن‌ها و احتمال فعال‌شدن مجدد آن‌ها، به دلیل تغییرات اقلیمی آینده، پژوهش‌های بیشتری، به‌ویژه در بخش سن‌سنجی تپه‌های ماسه‌ای انجام گیرد.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، مشاهده می‌شود که درصد فراوانی ذرات ($d_{90} = 545 \mu$) در تپه‌های تثبیت‌شده و غیرفعال دارای تفاوت بسیار معنی‌داری (شکستگی ناگهانی منحنی) نسبت به تپه‌های ماسه‌ای فعال است. این امر نشان می‌دهد که فراوانی ذرات درشت‌دانه بیشتر است. علت این مسئله تثبیت و استقرار پوشش گیاهی در روی این تپه‌هاست؛ به طوری که پوشش گیاهی موجب کاهش سرعت باد روی تپه شده و توان حمل باد برای ذرات با قطر کوچک‌تر در حد ماسه فراهم شده است. بنابراین، از فراوانی ذرات با قطر متوسط کاسته شده است و، به تبع آن، موجب تغییر در بافت رسوبات حمل‌شده و ریخته‌شده در شیب دامنه پشت به باد خواهد شد. از طرف دیگر، به دلیل فرایندهای پس از تثبیت و بهبود ساختمان خاک [۱۳]، شرایط برای تشکیل ذرات ریزدانه‌تر در حد سیلت و رس بیشتر شده است؛ به طوری که ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون در تپه‌های غیرفعال در حدود ۴ برابر (۱۴ درصد در برابر ۴ درصد) شده است. در مطالعه‌ای دیگر [۵]، مقدار فراوانی ذرات سیلت و رس به همراه مواد آلی در ارگ کاشان گزارش شد [۵].

شکل ۶ به‌خوبی تفاوت قطر ذرات در تپه‌های ماسه‌ای فعال و غیرفعال را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که متغیرهای d_{10} و d_{90} نیز شاخص‌های مناسبی هستند برای بیان اختلاف در ویژگی‌های تپه‌های ماسه‌ای فعال و غیرفعال.

مطالعه دانه‌بندی رسوبات در قسمت‌های مختلف تپه‌های عرضی نشان داد که دانه‌بندی رسوب در دو طرف تپه تغییر می‌کند و این معلول تأثیر متفاوت باد در دو طرف دامنه است. در این تحقیق، کمترین قطر در قسمت بالای دامنه پشت به باد حاصل شد. این مسئله به دلیل آن است که باد، پس از رسیدن به قله، ذرات رسوب را به‌جای می‌گذارد و ذرات در اثر نیروی وزن و فرایند ریزش^۲ به سمت پایین حرکت

1. slip face
2. sand avalanche

References

- [1] Ahmadi, H. and Mohammadkhan, SH. (2006). Comparing the characteristics of grain size in internal and coastal Ergs of Iran. *Desert journal*, 11(1), 211-224.
- [2] Ahmadi, H. (2008). *Applied Geomorphology*, Vol. 2, Desert-Wind Erosion, 2^{ed} Edition, University of Tehran press, 706p.
- [3] Ahmadi Birgani, H. (2008). *Simulation of sand dune movement using empirical and numerical methods (Case study: Erg of Rig Boland Kashan)*. MSc. thesis. University of Tehran, 91p.
- [4] Bubenzer, O. and Besler, H. (2010). Sands as Archives of Environmental Change: Examples from Egypt, Sudan and Namibia. In: MÖHLIG, W.j.G., Bubenzer, O., Menz, G. (Eds.), *Towards Interdisciplinarity. Experiences of the Long-term ACACIA Project. Topics in Interdisciplinary African Studies*. 15, 23-48; Cologne.
- [5] Ehghaghi, A. (2007). *Developing of soils characteristics in stabilized and un-stabilized flowing sands in Rig Boland Kashan*. MSc. thesis. University of Tehran. 105p.
- [6] Fryberger, S., Ahlbrandt, T. and Andrews, S. (1979). Origin, sedimentary features, and significance of low-angle eolian "sand sheet" deposits, Great sand dunes national monument and vicinity, Colorado. *Journal of sedimentary petrology*, 49(3), 733-46.
- [7] Hoseini, M., Ekhtesasi, M.R., Shahriari, A. and Shafiei, H. (2010). Study of current and potential desertification status with emphasis on wind erosion criterion using MICD method (Case study: Niatak region of Sistan). *Journal of range and watershed management (Iranian journal of Natural Resources)*, 63(2), 165-181.
- [8] Lancaster, N. (1981). Grain size characteristics of Namib Desert linear dunes. *Sedimentology*, 28, 115-122.
- [9] Maghsudi, M., Yamani, M., Mashhadi, N., Taghizade, M. and Zahabnazouri, S. (2010). Identification of sand sources of Nogh Erg by using of wind analysis and sand grain morphometry. *Geography and environmental planning journal*, 43(3), 1-16.
- [10] Mashhadi, N. and Ahmadi, H. (2010). Sand sources determination based on granulometry of surface soils or sediment (sediment generation potential). *Iranian journal of range and desert research*, 17(4), 499-517.
- [11] Motamed, A. (2000). *Geomorphology*, Vol. 3, 3^{ed} Edition, Samt Organization press, 456p.
- [12] Musavi Herami, R. (1997). *Sedimentology*, 1^{ed} Edition, Astan Ghods Razavi press, 480p.
- [13] Refahi, H. (1999). *Wind erosion and its control*, 3^{ed} Edition, University of Tehran press, 551p.
- [14] Webb, N.P., McGowan, H.A., Phinn, S.R. and McTainsh, G.H. (2006). AUSLEM (Australian Land Erodibility Model): A tool for identifying wind erosion hazard in Australia. *Geomorphology*, 78, 179-200.
- [15] Yamani, M. (2000). Correlation of sand particle diameter and the frequency threshold wind velocity in Band-e-rig of Kashan. *Geographical research journal*, 38, 115-132.