

تحلیل توزیع مکانی و برهم کنش تپه‌های ماسه‌ای مطالعه موردی (منطقه کلاته مزینان)

محمدجواد یوسفی^۱، محسن حسینعلی‌زاده^{۲*}، علیرضا راشکی^۳، نرگس کریمی‌نژاد^۴، حمیدرضا عباسی^۵

علی محمدیان بهبهانی^۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

تحلیل پراکنش مکانی عوارض ماسه‌ای و روابط متقابل بین آن‌ها در مناطق بیابانی اطلاعات ارزشمندی در مورد برهم‌کنش آن‌ها و چگونگی تأثیرشان بر یکدیگر ارائه می‌کند. آگاهی از چگونگی وقوع این روابط می‌تواند برای مدیریت عرصه‌های بیابانی کشور مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این تحقیق، بررسی الگوی مکانی و روابط متقابل بین دو نوع تپه ماسه‌ای غالب با استفاده از توابع آماری تک‌متغیره و دو متغیره در ماسه‌زارهای منطقه کلاته مزینان شهرستان داورزن به منظور شناخت الگوی پراکنش و بررسی روابط متقابل بین بارخان‌ها و نبکاهاست. برای انجام این تحقیق ابتدا با استفاده از تصاویر اخذشده توسط پرنده هدایت‌پذیر از راه دور (پهپاد)، موقعیت دقیق هر نبکا (۱۰۱۳ پایه گیاهی) و بارخان (۹۰ عدد) ثبت شد. سپس با استفاده از آماره‌های اختصاری از جمله توابع تک و دو متغیره O -Ring و $g(r)$ ، الگوی پراکنش مکانی و رابطه متقابل بین دو عارضه بارخان و نبکا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تابع‌های به‌دست‌آمده نشان داد که الگوی پراکنش نبکاها تا فواصل حدود ۲۷۰ متری به صورت خوشه‌ای و پراکنش بارخان‌ها در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد دارای الگوی پراکنش مشخصی نبود. رابطه متقابل بین بارخان‌ها و نبکاها نیز تا فاصله ۵۰۰ متری به صورت منفی بود. نبکا به دلیل منابع ماسه کم در نزدیکی منشأ شکل می‌گیرد، سپس با افزایش ماسه، بارخان‌ها شکل می‌گیرند. بررسی الگوی مکانی و تعیین روابط بین انواع عارضه‌های ماسه‌ای با استفاده از توابع آماری می‌تواند به شناخت علل تشکیل مکانی عوارض ماسه‌ای کمک نماید که این امر به تدوین برنامه‌های احیایی و مدیریت اکولوژیک ماسه‌زارها در بیابان‌ها کمک نماید.

کلیدواژه‌ها: توابع تک‌متغیره، توابع دو متغیره، الگوی مکانی، بارخان، نبکا، خراسان رضوی.

۱. دانشجوی دکترای مدیریت و کنترل بیابان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار- دکترای آبخیزداری، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ mhalizadeh@gau.ac.ir

۳. دانشیار- دکترای مدیریت بیابان و فرسایش بادی، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه فردوسی مشهد

۴. استادیار- مدیریت مناطق بیابانی و ژئومورفولوژی، بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۵. استادیار- مدیریت مناطق بیابانی، بخش تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

۶. دانشیار- مدیریت مناطق بیابانی و فرسایش بادی، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

بیابان‌ها، پهناورترین بوم‌سازگان (اکوسیستم) در محیط طبیعی ایران و قلمرو طیف گسترده‌ای از فرایندهای شکل‌زا به حساب می‌آیند که طی دوره‌های کوتاه‌تر تحت تأثیر تغییرات گسترده اقلیمی و محیطی بوده است. فرسایش بادی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌زا و تأثیرگذار در مناطق بیابانی است (توکلی فرد و همکاران، ۲۰۱۵) که همراه با مخاطرات محیطی در این مناطق است (رفاهی، ۲۰۰۴). مساحت مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی در ایران بیش از ۳۰ میلیون هکتار تخمین زده شده است (عباسی، ۲۰۱۹). مساحت ریگزارهای ایران حدود ۴/۷ میلیون هکتار، معادل وسعت کشور برآورد شده است که بخش عمده‌ای از آن را ماسه‌زارهای فعال و نیمه‌فعال و غیرفعال تشکیل می‌دهند (عباسی و همکاران، ۲۰۱۹). حمل ماسه توسط فرایند باد تحت تأثیر روابط پیچیده غیرخطی صورت می‌گیرد و توسعه عوارض ماسه‌ای متأثر از پدیده خودتنظیمی حاکم بر ژئوسیستم چشم‌انداز بادی است (باس، ۲۰۰۷). از تراکم موضعی ماسه‌های بادی شکل‌های ویژه‌ای نظیر پیکان‌های ماسه‌ای، نبکا یا تل نباتی، بارخان یا پیکرا، سیف یا شمشیر (تپه‌های عرضی و طولی)، قورد یا هرم ماسه‌ای و ریپل مارک یا چین و شکن‌های بادی ایجاد می‌شود. در نهایت باد مجموعه شکل‌های ماسه‌ای را در محلی به دور هم متمرکز می‌سازد که به آن ریگ یا میدان ماسه‌ای اطلاق می‌گردد (محمودی، ۲۰۰۴). برای آشنایی و پی بردن به معضلات محیطی هر منطقه، به‌منظور برنامه‌ریزی اصولی برای رفع مشکلات حاکم بر وضع اقتصادی و اجتماعی مراکز سکونتگاهی، تولیدی و راه‌های ارتباطی، شناسایی دقیق عوامل محدودکننده، تجزیه و تحلیل علمی آن‌ها برای نیل به اهداف توسعه پایدار منطقه‌ای کمک شایانی به مراکز علمی و اجرایی می‌کند (موسوی، ۲۰۱۰).

در همین راستا پژوهش‌های متعددی صورت پذیرفته است: الموتیری^۲ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر پانکروماتیک ماهواره SPOT4 براساس فناوری تصحیح هندسی و همبستگی تصاویر اپتیکی دریافت‌شده در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹ به برآورد جابه‌جایی ریگ‌های روان در شمال شهر ریاض

عربستان پرداختند. آن‌ها با توجه به جهت جنوبی جابه‌جایی تپه‌ها نتیجه گرفتند که سمت باد غالب، شمالی است. بازیچتو^۳ و همکاران (۲۰۱۶) تأثیرات مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای بر شکل زیست‌بوم‌های ساحلی در سواحل مدیترانه را با استفاده از مشاهده^۴ هوابرد LidAR مطالعه کردند. آن‌ها ضمن پایش شاخص‌هایی مانند ارتفاع، شیب و فاصله از دریا برای تپه‌های ماسه‌ای اعلام داشتند این ابزار برای تجزیه و تحلیل و نظارت بر یکپارچگی زیست‌بوم‌های تپه‌های ساحلی پتانسیل بالایی دارند. گتزین و ویگند^۵ (۲۰۰۷) با بررسی تپه‌های ماسه‌ای و مغزه‌برداری از لایه‌های مختلف آن به بررسی شرایط و فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه MU Us در مرکز چین پرداختند و تأثیر مورفودینامیک تپه بر تثبیت ماسه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماهیت و میزان سوگیری‌ها در توزیع سن ماسه در طول زمان به شدت تحت تأثیر میزان تجمع ماسه است، که به‌نوبه خود به میزان جابه‌جایی ماسه، ظرفیت حمل و نقل و در دسترس بودن ماسه و در نهایت تغییرات آب‌وهوایی مربوط می‌شود. حسینعلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) به تعیین توزیع مکانی تپه‌های نبکا گونه *Halocnemum Strobilaceum* با بهره‌گیری از تابع g در دشت آق‌قلا در استان گلستان پرداختند. نتایج تابع مکانی همبستگی جفتی تک‌متغیره آن‌ها نشان داد که الگوی پراکنش گیاه *Halocnemum Strobilaceum* در فاصله‌های بین ۰ تا ۲۳ متر، پراکنده و نامنظم بوده و این بدین معناست که گیاهان برای شکل‌گیری دارای رقابت خاصی با یکدیگر نیستند. علاوه بر آن، الگوی مکانی نبکاها نیز در فاصله‌های بین ۰ تا ۲۳ متر به‌صورت پراکنده بود. همچنین نتایج تابع دو متغیره $g(r)$ در فاصله‌های بین صفر تا ۵۰ متر نشان داد که گیاه و نبکا ارتباط متقابل مثبتی با یکدیگر داشته و بر شکل‌گیری و پراکنش یکدیگر تأثیر مستقیم می‌گذاشتند. احمدآبادی و همکاران (۲۰۲۰) به برآورد جابه‌جایی مسطحاتی و ارتفاعی تپه‌های ماسه‌ای ریگ اردستان از طریق تداخل‌سنجی شاخص‌های طیفی و راداری پرداختند و نشان دادند که سمت حرکت کلی تپه‌های ماسه‌ای در بازه زمانی بررسی شده در راستای شمال شرقی به

3. Bazzichetto

4. Light Detection and Ranging

5. Getzin Wiegand

1. Baas

2. Al-Mutiry

همچنین برای تأیید نتایج کار خود چند تپه ماسه‌ای در هر منطقه را با تصاویر گوگل ارث بررسی کردند که تأییدکننده نتایج کار آن‌ها بود. کریمی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۰) به پایش مکانی فرسایش تونلی با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد در اراضی بادرفت استان گلستان در محدوده‌ای به وسعت ۲۷۰۰ هکتار پرداختند. آن‌ها موقعیت ۸۳۳ فرسایش تونلی را با پهپاد ثبت کردند و تأثیر پستی و بلندی، آب‌شناسی و عوامل زیستی را به فرسایش تونلی مورد بررسی قرار دادند.

ارزیابی خلاصه‌های آماری در طول دوره مطالعاتی منجر به تحلیل الگوهای مکانی-زمانی عوارض ماسه‌ای بر آن‌ها می‌شود. فرسایش بادی و اشکال ماسه‌ای نیز همانند بسیاری از پدیده‌های طبیعی، پیچیدگی‌هایی دارد که بهترین راه برای شناسایی و بررسی تأثیر جنبه‌های مختلف آن استفاده از روش‌های نوین مانند خلاصه‌های آماری است. اهمیت عوامل مؤثر در وقوع هر نوع از اشکال ماسه‌ای در تخریب اراضی کشاورزی، مرتعی، تأسیسات ساختمانی و از جهت دیگر نقش این نوع فرسایش در ایجاد رسوب ایجاب می‌کند که به بررسی عوامل مؤثر در رابطه با رخداد این نوع فرسایش پرداخته شود. علاوه بر این، تحلیل دقیق مکانی این رخساره‌ها و تعیین مناطق حساس‌تر به این نوع فرسایش‌ها به اتخاذ تصمیم بهتر جهت ارائه راهکارهای مناسب کمک خواهد کرد.

هدف پژوهش حاضر چارچوب‌سازی مفهومی الگوها و شناسایی روابط متقابل عوارض ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه است. استفاده از خلاصه‌های آماری به این صورت در مورد عوارض ماسه‌ای در داخل کشور فقط در مطالعات نیکا انجام شده و تاکنون بر روی سایر عوارض ماسه‌ای چنین مطالعه‌ای صورت نگرفته است. با بررسی زمانی الگوی پراکنش تپه‌های ماسه‌ای و نبکاها در منطقه مطالعاتی می‌توان تشخیص داد که در شرایط طبیعی دارای چه الگوی پراکنشی هستند و با پایش زمانی آن‌ها در صورت تغییر این الگوها پی به حضور عامل فشارآورنده به آن‌ها برده و این پایش دائمی باعث مدیریت بهتر این عوارض قبل از ایجاد عامل مخاطره‌آمیز شده و به‌نوعی می‌توان با استفاده از این روش به ارزیابی‌های دقیق‌تری نسبت به این عوارض دست یافت. با استفاده از این روش‌ها امکان پایش دقیق‌تر و بهتر از توزیع مکانی گونه‌ها و عوارض و

جنوب غربی است. درمانی و همکاران (۲۰۲۰) به منشأیابی و بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات گردوغبار در شهرستان سرخس پرداختند. این پژوهش بر روی ذرات ریزگرد با اندازه کمتر از ۱۰ میکرومتر در ارتفاع ۲ تا ۴ متری از سطح زمین انجام شد. با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی القایی، پراش پرتو ایکس، فلزات و کانی‌های حاضر در ذرات گردوغبار شناسایی و با به‌کارگیری میکروسکوپ الکترونی و آنالیز لیزری، شکل ذرات و اندازه آن‌ها تعیین شد.

پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور) لزوماً جایگزین هیچ‌یک از روش‌های متداول تولید داده‌های مکانی نیست، بلکه به‌واسطه ویژگی‌های خود می‌تواند بخش مهمی از حوزه تولید نقشه را به خود اختصاص دهد که قطعاً توسط روش‌های سنتی دیگر مقرون‌به‌صرفه نیست (شهرکی، ۲۰۱۷). ورود پهپادها به عرصه علوم ژئوماتیک باعث تحولی شگرف در این علوم بوده است، به‌گونه‌ای که در تمامی گرایش‌های ژئوماتیک اعم از نقشه‌برداری، فتوگرامتری، سنجش از دور، کاربردهای زیادی برای آن‌ها شناخته شده است (غلامرضا و صادقیان، ۲۰۱۶). پهپادها نسبت به ماهواره‌ها دارای مزیت‌های مختلفی از جمله کنترل ارتفاع پروازی، زاویه دید سنجنده و تنظیم میزان همپوشانی تصاویرند (کارگر و سهرابی، ۲۰۱۹). با در دسترس بودن طیف وسیعی از سنجنده‌ها، پهپادها به کاربران اجازه می‌دهند تا انواع متفاوتی از قدرت تفکیک مکانی‌های مورد نیاز را در اختیار داشته باشند؛ در نتیجه فرصت‌های جدیدی برای پژوهشگران علوم محیطی ایجاد می‌شود. در مورد کاربردهای تصاویر پهپاد در علوم محیطی پژوهش‌های متعددی انجام شده است: دلگادو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی به بررسی دینامیک تپه‌های ماسه‌ای با بهره‌گیری کاملاً خودکار استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری داده‌های ماهواره‌ای پرداختند. پژوهش آن‌ها یک روش خودکار برای تعیین کمیت پویایی تپه‌های ماسه‌ای بارخان ارائه داد. آن‌ها نرخ جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای را ۲ تا ۶ متر در سال در جهت شمال غربی به جنوب شرقی برای تپه‌های جنوبی و ۱۱ تا ۲۰ متر در سال در جهت شمال شرقی به جنوب غربی برای تپه‌های غربی اندازه‌گیری کردند. آن‌ها

ارتباطات آن‌ها با یکدیگر در یک سیستم بیولوژیکی و ژئومورفولوژیکی میسر می‌گردد. این اطلاعات برای حفظ تنوع زیستی، مدیریت منابع طبیعی منطقه و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با محیط‌زیست بسیار ارزشمند است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

این پژوهش در منطقه‌ای به مساحت حدود ۲۰۰ هکتار از عوارض ماسه‌ای جنوب منطقه کلاته مزینان واقع در غرب شهرستان سبزوار و جنوب شهرستان داورزن انجام شد (موقعیت منطقه مطالعاتی با تصاویر گوگل ارث در شکل ۱ مشخص شده است). منطقه مورد مطالعه (دارای مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 41' 1''$ تا $36^{\circ} 41' 44''$ شمالی و $15^{\circ} 46' 46''$ تا $16^{\circ} 47' 56''$ شرقی) دارای انواع مختلفی از اشکال ماسه‌ای از جمله نیکا و بارخان است. این منطقه دارای شیب کمتر از ۱ درصد و میانگین بارش سالانه کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر با متوسط دمای سالانه بیش از $17/5$ درجه سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق پتانسیل بیش از ۳۰۰۰ میلی‌متر در سال است که براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم فراخشک سرد است (براساس از گزارش مرکز تحقیقات خراسان رضوی).

عملیات میدانی

در زمان تصویربرداری هوایی از منطقه، از ۳۷ نقطه کنترل زمینی (GCP^۱) استفاده شد. پس از انجام تصویربرداری، پردازش‌های مورد نظر روی تصاویر با استفاده از نرم‌افزارهای Pix 4D یا Agisoft Photoscan انجام شد. برای تحلیل الگوی‌های مکانی عوارض مورد بررسی نیز پس از تعیین موقعیت دقیق عوارض، تعیین الگوی پراکنش عوارض انجام شد. برای تحقق این مهم، موقعیت دقیق عوارض تعیین شد. سپس با استفاده از تابع تک‌متغیره جفتی $(g(r))$ به بررسی الگوهای پراکنش عوارض مختلف و تأثیرات هر عارضه بر همان نوع عارضه پرداخته شد. با استفاده از تابع دومتغیره همبستگی جفتی $(g_2(r))$ اثرات متقابل بین عوارض گوناگون محدوده مطالعاتی و مطالعه اجتماع‌پذیری آن‌ها بررسی شد. در این پژوهش برای بررسی

الگوهای مکانی تک‌متغیره و دومتغیره از نرم‌افزار Programita که نرم‌افزار تخصصی بررسی الگوهای مکانی است استفاده شد (<https://programita.org>). از جمله دیگر نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش می‌توان به DJI 4D (برای انجام کالبره‌های پهپاد) و مجموعه PIX 4D (برای انجام عملیات پرواز و آنالیزهای بعد) اشاره کرد. در این پژوهش با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی مانند ارتفاع پرواز و مداومت پرواز، تهیه تصاویر با قدرت تفکیک ۳۰ سانتی‌متر و همپوشانی طولی و عرضی ۷۰٪ لحاظ شد. نوع تپه‌های ماسه‌ای مشاهده‌شده در بازدید میدانی، تصاویر اخذشده با پهپاد و تصاویر گوگل ارث شامل نیکا، بارخان، بوکلیه بارخانی، بارخان‌نئید و تپه‌های یال‌اسبی بود که با توجه به کم بودن برخی از اشکال ماسه‌ای برای سهولت و افزایش صحت ارزیابی به‌طور کلی به دو دسته بارخان و نیکا تقسیم‌بندی شدند. با توجه به اینکه در زمان بازدید میدانی مشاهده شد هر گیاه هرچند کوچک باعث ترسیب مقداری رسوب و ایجاد نیکا شده است، در ارتوفتوی حاصل از تصاویر پرواز هر گیاه مشاهده‌شده در تصاویر به‌عنوان نیکا در نظر گرفته شد. با استفاده از ارتوفتوی تهیه‌شده، موقعیت مکانی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه تعیین شد. ابتدا با بازدید میدانی به ارزیابی کلی از منطقه پرداخته شد و سپس به انجام تصویربرداری هوایی با پهپاد برای کسب اطلاعات از موقعیت مکانی عوارض پرداخته شد. پس از آنالیز اولیه تصاویر تهیه‌شده، اقدام به تهیه ارتوفتو گردید و سپس نقشه نقطه‌ای حضور تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه مورد مطالعه در محیط ArcGIS 10.2 براساس مختصات UTM تهیه شد. همچنین با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۲ برای بررسی نرمال بودن داده‌های آماربرداری‌شده (موقعیت دقیق نیکاها و بارخان‌ها) استفاده شد. در پایان پردازش اطلاعات و تحلیل‌های مکانی از طریق نرم‌افزار Programita و توابع همبستگی جفتی تک و دومتغیره و همچنین توابع O-ring انجام شد. این نرم‌افزار یک بازه شیب‌سازی^۳ از طریق آزمون مونت کارلو^۴ با ۱۹۹ تکرار، به احتمال ۹۵٪ و در سطح ۵٪

2. Kolmogorov-Smirnov statistic

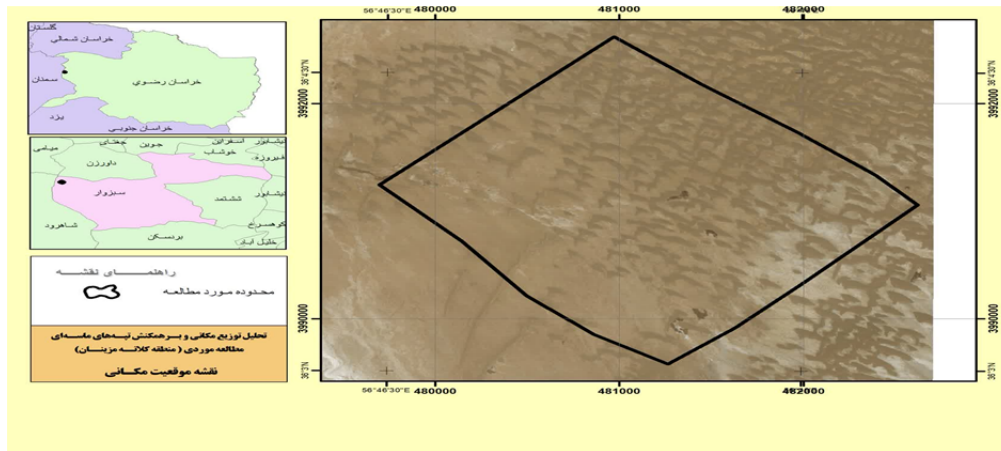
3. Simulation envelopes

4. Monte Carlo simulation

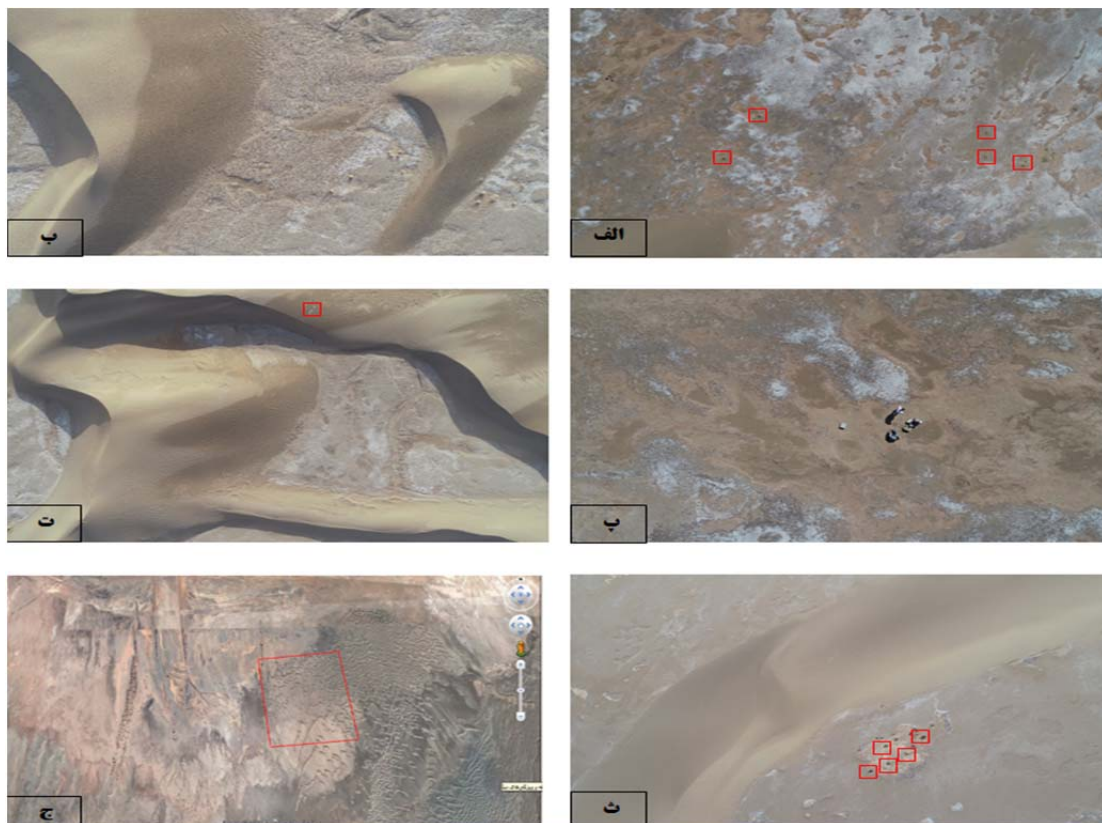
1. Ground Sample Distance

نقشه موقعیت مکانی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین در شکل (۴) مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

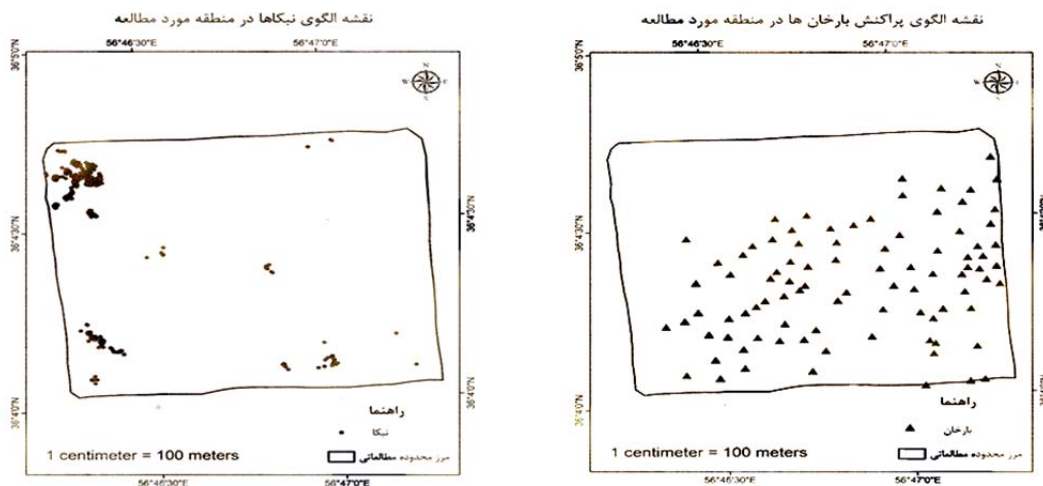
برای توزیع تصادفی عارضه‌های ژئومورفولوژیکی نبکا و بارخان مورد مطالعه استفاده می‌شود و نتایج هر یک از آماره‌های اختصاری در بازه مذکور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل (۳)



شکل (۱): موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه در ماسه‌زارهای کلاته مزینان، استان خراسان رضوی
 Figure (1): Location of the study area in Kalateh Mezinan sand dunes, Razavi Khorasan Province



شکل (۲): نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد در منطقه مورد مطالعه، (الف) نبکاهای منطقه مورد مطالعه، (ب) بوکلیه بارخانی، (پ) تصویر هوایی از استقرار تیم پژوهشی، (ت) یک نمونه از نقاط کنترل نصب شده، (ث) نبکاهای و بارخان در منطقه مورد مطالعه، (ج) کل منطقه مورد مطالعه در تصاویر گوگل ارث، (ح) ارتوفوتوی حاصل شده از تصاویر پهپاد، (خ) یک نمونه از نقاط کنترل نصب شده
 Figure (2): A sample of the images taken by the UAV in the study area, (a) Nebkas of the study area, (b) Buklieh Barkhani, (c) aerial image of the research team's establishment, (t) an example of installed control points, (d) Nebkas and Barkhan in the study area, (c) the entire study area in Google Earth images, (h) orthophoto obtained from UAV images, (x) an example of installed control points



شکل (۳): نقشه موقعیت مکانی تپه‌های ماسه‌ای و بارخان‌ها در محدوده مورد مطالعه (ماسه‌زار کلاته مزینان)
 Figure (3): Map of the location of sand dunes and barkhans in the study area (Kalate Mazinan sand dunes)



شکل (۴): نمودار جریان‌ی مراحل اجرایی تحقیق حاضر
 Figure (4): Flow chart of the implementation stages of the research

مقادیر کمتر از ۱ به الگوی مکانی پراکنده و بیشتر از ۱ به الگوی کپه‌ای اشاره دارد.

تابع O-ring

یکی از جدیدترین روش‌ها برای بررسی الگوی مکانی و کنش متقابل عارضه‌های ژئومورفولوژیکی استفاده از تابع O-ring است.

اساس $O(r)$ براساس تعداد متوسط نقاط (در این تحقیق نیکا یا بارخان) قرارگرفته بر روی حلقه‌ها با شعاع r از نقاط مرکزی است (ایلیان^۳ و همکاران، ۲۰۰۸).

آماره‌های اختصاری^۱

آماره‌های اختصاری به بیان شرح مختصر الگوهای پراکنش می‌پردازند (ویگند^۲ و همکاران، ۲۰۱۳).

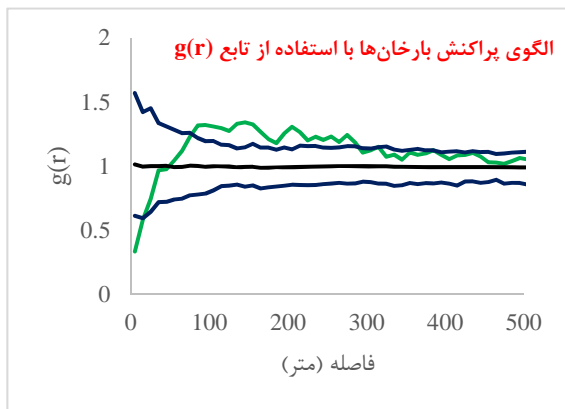
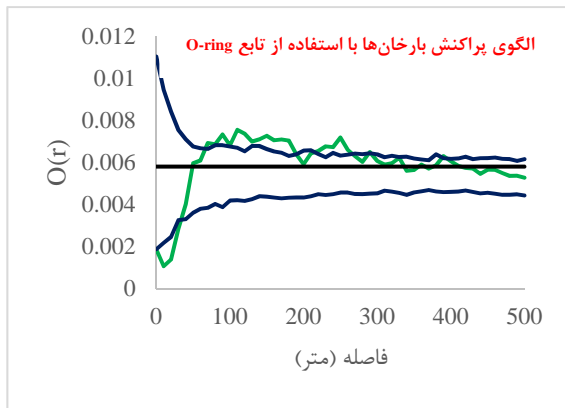
تابع همبستگی جفتی $(g(r))$

از تابع $g(r)$ برای تعیین الگوی پراکنش مکانی عارضه‌های ژئومورفولوژیکی مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شد. در حالت الگوی کاملاً تصادفی مقدار تابع برابر یک ($g(r) = 1$) و

3. Illian

1. Summary statistics
 2. Wiegand

پراکنش به صورت کپه‌ای و در صورت قرار گرفتن در زیر این محدوده، الگوی پراکنش به صورت پراکنده است. نتایج استفاده از تابع تک‌متغیره $g(r)$ نشان داد که الگوی مکانی بارخان‌ها در سطح ۵٪ و با احتمال ۹۵٪ تا فاصله حدود ۵۰ متری به صورت پراکنده است و در فواصل ۸۰ تا ۳۰۰ متری تپه‌های ماسه‌ای دارای الگوی خوشه‌ای و پس از آن مجدداً دارای الگوی تصادفی هستند. همچنین نتایج بررسی الگوی مکانی بارخان‌ها با استفاده از تابع تک‌متغیره O-ring نشان داد که در فواصل ۰ تا ۵۰ متری الگوی پراکنش به صورت پراکنده و پس از آن الگوی پراکنش به صورت خوشه‌ای است (شکل ۵).



شکل (۵): تغییرات توزیع مکانی بارخان‌ها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از توابع تک‌متغیره $g(r)$ و $O(r)$ (خط سبز نشانگر تغییرات توزیع گونه، خطوط سرمه‌ای محدوده توزیع تصادفی از طریق آزمون مونت کارلو و خط نارنجی رنگ بیانگر مقدار پیش فرض در تابع‌های $g(r)$ و $O(r)$ است).

Figure (5): The changes in the spatial distribution of Barkhans in the study area using the univariate functions $g(r)$ and $O(r)$ (the green line indicates changes in species distribution, the gray lines represent the range of random distribution by Monte Carlo test, and the orange line indicates the default value in g functions)

تابع دومتغیره همبستگی جفتی ($g12(r)$)

$g12(r)$ یک تابع همبستگی مکانی است که تغییرات تراکم تپه‌های ماسه‌ای را در مقیاس‌های مختلف تجزیه و تحلیل می‌کند. این تابع به بررسی اثرات متقابل بین گروه‌های مختلف تپه‌های ماسه‌ای و مطالعه اجتماع‌پذیری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی، تابع دومتغیره همبستگی جفتی ($g12(r)$) از جمله توابع همبستگی مکانی است که به منظور بررسی اثرات متقابل بین رخساره‌ها و مطالعه اجتماع‌پذیری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (حسینعلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار این تابع در یک الگوی مکانی تصادفی برابر یک بوده و بیشتر بودن این تابع از یک، بیانگر روابط متقابل مثبت و کمتر بودن آن نشان‌دهنده روابط متقابل منفی است.

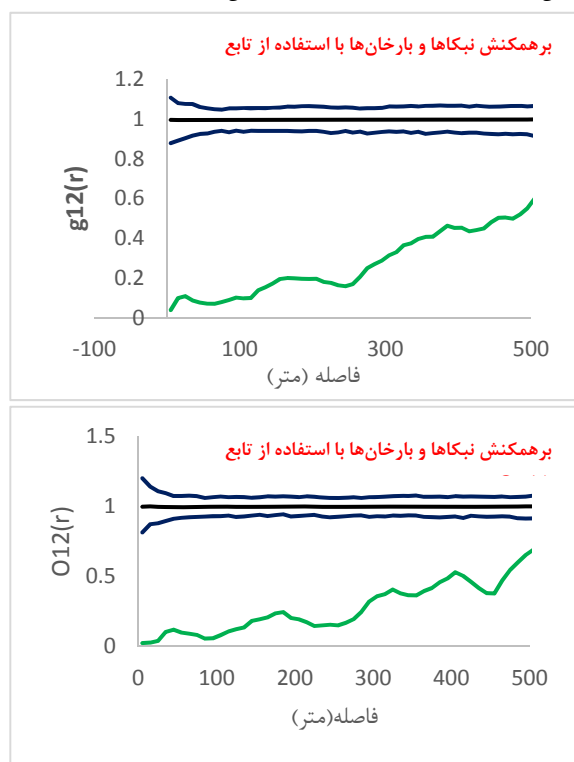
تابع O-ring دومتغیره

$O(r)$ به دو شکل تک‌متغیره و دومتغیره است. تک‌متغیره در شرایطی است که نقاط موجود در نقشه مکانی، مکان نقطه یا اثر متقابل بین آن‌ها را فقط در یک گروه نمایش می‌دهد و فاقد هرگونه اطلاعات دیگر است. در مقابل ممکن است نقاط موجود در نقشه مکانی، اثر متقابل بین دو گروه بر مبنای فاصله یا فواصل بین یک گروه با ابعاد مختلف را نشان دهد که در این حالت دومتغیره است (ویگند و مالانی، ۲۰۰۴).

نتایج

بررسی دقیق ارتوفتوی تهیه‌شده از تصاویر پهپاد نشان داد که در محدوده مورد مطالعه ۱۰۱۳ پایه گیاهی و ۹۰ تپه ماسه‌ای با شکل‌های مختلف گیاهی وجود دارد. همچنین آزمون نیکویی برازش کولموگروف-اسمیرنوف در سطح ۰/۰۵ نشان داد که الگوی مکانی گونه‌های مورد مطالعه در منطقه مربوط، از توزیع پواسون همگن پیروی می‌کند. نمودار الگوی پراکنش تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تابع O-ring مقدار تابع $g(r)$ به منظور تعیین الگوی مکانی تپه‌های ماسه‌ای به کار رفت. براساس خروجی نرم‌افزار در بررسی‌های تک‌متغیره اگر خط روند داخل محدوده مونت کارلو قرار داشت، نشان‌دهنده عدم معنی‌داری است و اگر خط روند بالای این محدوده بود، الگوی

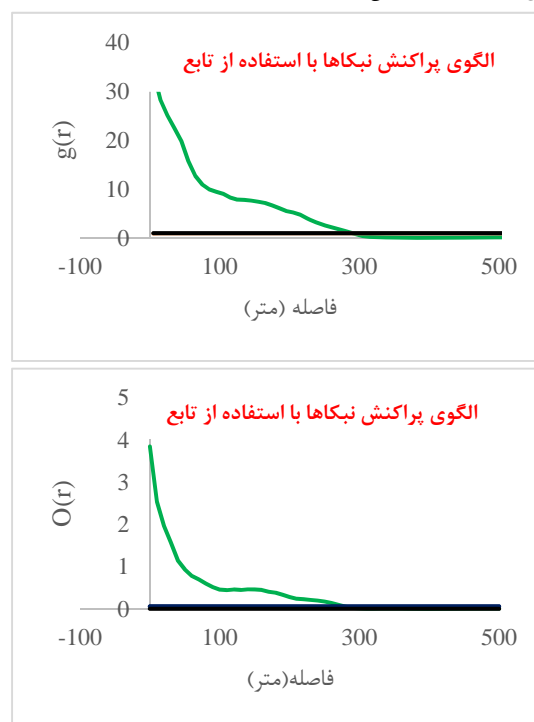
یک برای این تابع، نشان‌دهنده اثر منفی این دو عارضه بر یکدیگر است. نتایج تابع دو متغیره $g_{12}(r)$ نشان‌دهنده آن است که این دو عارضه تا فواصل حدود ۵۰۰ متر ارتباط متقابل منفی با یکدیگر دارند که این امر با توجه به نقشه پراکنش دو عارضه مطابقت دارد. تابع دو متغیره $O_{12}(r)$ نیز در تأیید تابع دو متغیره $g_{12}(r)$ به کار رفت و نتایج مشابهی را مطابق با آنچه در نتایج تابع $g_{12}(r)$ به دست آمد نشان داد (شکل ۷). خروجی این تابع نیز تأیید دیگری بر روابط متقابل منفی بارخان‌ها و نبکا بر شکل‌گیری و استقرار یکدیگر تا فواصل ۵۰۰ متری بود.



شکل ۷: برهم‌کنش دو عارضه تپه‌های ماسه‌ای و نبکاها در منطقه مطالعاتی با استفاده از شکل دو متغیره توابع $g_{12}(r)$ و $O_{12}(r)$ (خط سبز نشانگر تغییرات توزیع گونه، خطوط سرمه‌ای محدوده توزیع تصادفی از طریق آزمون مونت کارلو و خط نارنجی مقدار پیش فرض در تابع‌های $g_{12}(r)$ و $O_{12}(r)$ است.)

Figure (7): The interaction between the two conditions of sand dunes and Nebkhas in the study area using the form of the second variation of the functions $g_{12}(r)$ and $O_{12}(r)$ (the green line indicates changes in species distribution, the gray lines indicate the range of random distribution through the Monte Carlo test, and the orange line indicates the default value in the functions $g_{12}(r)$ and $O_{12}(r)$.)

در فاصله‌های بیشتر از ۳۰۰ متر نیز الگوی معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۶). نتایج تابع $O(r)$ نیز به‌منظور تعیین الگوی مکانی نبکاها به کار رفت و نتایج آن همسو با نتایج تابع $g(r)$ بود. این تابع نشان داد که در فاصله‌های صفر تا ۲۷۰ متر الگوی مکانی نبکاها به صورت خوشه‌ای یا کپه‌ای است. همچنین معنی‌داری این توزیع در همین محدوده در سطح اطمینان ۰/۰۵ مورد تأیید قرار گرفت. نتایج نشان داد در فاصله‌های بیشتر از ۲۷۰ متر هیچ الگوی مشخصی به صورت معنی‌دار نیست (شکل ۶).



شکل ۶: تغییرات توزیع مکانی نبکاها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از توابع تک‌متغیره $g(r)$ و O-ring (خط سبز نشانگر تغییرات توزیع گونه، خطوط سرمه‌ای محدوده توزیع تصادفی از طریق آزمون مونت کارلو و خط نارنجی رنگ بیانگر مقدار پیش‌فرض در تابع‌های $g(r)$ و $O(r)$ است.)

Figure (6): Changes in the spatial distribution of Nebkhas in the study area using the univariate $g(r)$ and O-ring functions (the green line indicates changes in the species distribution, the gray lines represent the range of random distribution through the Monte Carlo test, and the orange line indicates the default value in the $g(r)$ functions)

تابع $g_{12}(r)$ از جمله توابع دو متغیره است که به‌منظور بررسی اثرات متقابل بین بارخان‌ها و نبکاها در منطقه مورد استفاده قرار گرفت. اگر مقدار این تابع از مقدار عددی ۱ کمتر شود، چنین استنباط می‌شود که بارخان‌ها و نبکاها دارای روابط متقابل منفی بوده و بر گسترش یکدیگر اثر منفی دارند. مقادیر کمتر از عدد

شکل‌گیری و گسترش نبکا به رشد گیاه میزبان آن بستگی دارد، الگوی مکانی نبکا در ارتباط مستقیم با الگوی پراکنش گیاهان منطقه است. آن‌ها همچنین استنباط نمودند که نبکاهای تشکیل شده در فواصل نزدیک بر روی یکدیگر تأثیرگذارند. نتایج تحقیق کریمی و همکاران (۲۰۱۲) که در بررسی کارایی تابع O-ring در تعیین الگوی مکانی و کنش متقابل بین گونه‌ها در مقیاس کوچک در جنگل‌های باینگان کرمانشاه بود، مؤید تشریح مناسب الگوی مکانی و کنش متقابل به وسیله تابع O-ring در توده مورد بررسی است که می‌تواند به عنوان یک کلید راهنما در شناخت و تصمیم‌گیری برنامه‌های مدیریتی مفید در دیگر رویشگاه‌ها باشد. همچنین مالتز^۱ و همکاران (۲۰۰۷) و پامرینگ و استایان^۲ (۲۰۰۸) نیز در تحقیقات خود نقش الگوی مکانی گونه‌های گیاهی برای طراحی طرح‌های مدیریتی مناسب، تشریح پایداری بوم‌سازگان و اقدامات احیایی را به عنوان ابزاری مهم در برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و حفاظتی دانستند. نتایج این پژوهش نشان داد که دو عارضه مورد مطالعه با یکدیگر برهم‌کنش منفی دارند. تابع همبستگی جفتی تک‌متغیره نشان داد الگوی پراکنش نبکاها تا فاصله حدود ۲۷۰ متر دارای اثر معنی‌داری بوده و در این فاصله، الگوی پراکنش نبکاها به صورت کپه‌ای است و فواصل بیش از ۲۷۰ متر نیز دارای اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵٪ نبودند. الگوی مکانی بارخان‌ها در سطح ۵٪ و با احتمال ۹۵٪ تا فاصله حدود ۵۰ متری به صورت پراکنده بود و در فواصل ۸۰ تا ۳۰۰ متری تپه‌های ماسه‌ای دارای الگوی خوشه‌ای و پس از آن مجدداً دارای الگوی تصادفی بود که علت احتمالی آن را می‌توان به عدم امکان مطالعه در ابعاد بزرگ‌تر در این پژوهش نسبت داد. شایان ذکر است که انجام این پژوهش در چنین منطقه مطالعاتی که شرایط اقلیمی و ژئومورفولوژی سخت و همچنین راه‌های دسترسی بسیار سختی (عدم امکان ورود وسیله نقلیه به منطقه) است بدون استفاده از تصاویر گرفته‌شده توسط پهپاد بسیار سخت و حتی همراه با خطای بسیار است. با توجه به نتایجی که در خصوص تحلیل مکانی دو عارضه مذکور به دست آمد، می‌توان چنین استنباط کرد که در این منطقه الگوی مکانی نبکاها



شکل (۸): نمونه‌ای از پوشش گیاهی در ارتوفتو و بازدید میدانی منطقه مورد مطالعه
Figure (8): An example of vegetation in orthophoto and field visit of the studied area

بحث و نتیجه‌گیری

یکی از اهداف مهم ژئومورفولوژی مکانی، به دست آوردن فرایندها و راهبردهایی است که پراکنش مکانی عوارض را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر این عارضه‌ها نیازهای محیطی یکسانی داشته باشند و یا برای استقرار و رشد، نیاز به حمایت عارضه‌های حامی داشته باشند، می‌توانند در همسایگی یکدیگر زندگی کنند. الگوی مکانی هر متغیر تصادفی از جمله انواع تپه‌های ماسه‌ای را می‌توان با استفاده از فرایندهای نقطه‌ای تحلیل کرد و با استفاده از فرایندهای بوم‌شناختی نهفته در پراکنش مکانی آن‌ها را شناسایی نمود. نبکاها اغلب به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک پراکنده می‌شوند و نقش مهمی در تثبیت محیط‌زیست در این مناطق دارند. علی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی الگوی پراکنش نبکا در دشت صوفیکم استان گلستان بیان داشتند که الگوی پراکنش نبکاهای منطقه تحت تأثیر عوامل مختلف به صورت کپه‌ای بوده که نشانگر عدم پخش یکسان منابع غذایی، رطوبتی و سایر عوامل تأثیرگذار در طبیعت است و گیاهان نیز برای دستیابی به این منابع از الگوی منظمی پیروی نمی‌کنند. با توجه به اینکه

1. Maltez

2. Pommerening & Stoyan

(نگوین^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). ابراهیمی میمند و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند طول نیکا به منزله یک ویژگی کمی بیانگر ارتباط متقابل منفی با پراکنش نیکاهاست و می‌تواند در نحوه استقرار و همبستگی مکانی نیکاهای تأثیر بگذارد؛ بدین صورت که هرچه طول نیکاهای کمتر باشد، پراکنش کپه‌ای‌تر است و نیکاهای کوچک‌تر بیشتر بر یکدیگر اثر می‌گذارند. شاخص‌های عرض، ارتفاع و حجم نیکاهای نیز تأثیر زیادی در الگوی پراکنش آن‌ها نداشته است. برهم‌کنش دو گونه مذکور در این پژوهش از دو جنبه متفاوت ارزیابی شد: اول با استفاده از آماره‌های اختصاری تک‌متغیره به الگوی مکانی پرداخته شد و با توابع دو متغیره $g(r)$ و O-ring کنش متقابل دو گونه *Halocnemum Strobilaceum* و *salsola crassa* در منطقه مورد مطالعه تحت بررسی قرار گرفت. نتایج به‌وضوح بیانگر نقش حفاظتی و حمایتی گونه *Halocnemum Strobilaceum* برای گونه *salsola crassa* بوده و این دو گونه نقش مهمی در حفاظت خاک و جلوگیری از فرسایش بادی و آبی و همچنین ایجاد ریزاقلیم در منطقه مورد مطالعه داشته است. الگوی مکانی عوارض در طبیعت مشخصه مهمی در درک پویایی اکوسیستم است که در استقرار، رویش، رقابت، تجدید حیات، مرگ‌ومیر، استفاده از منابع توسط اشغال‌کنندگان عرصه، و سرانجام در توسعه و شرایط مکانی عوارض نقطه‌ای، اطلاعات مفیدی درباره شرایط محیطی حاکم به دست می‌دهد. بنابراین لازم است تا با گسترش مطالعه حاضر در شرایط مختلف توپوگرافی و زیست‌بوم در دیگر رویشگاه‌های گیاهی، روند اصلی تغییرات الگوی مکانی و برهم‌کنش گونه‌های گیاهی مشخص شود. آگاهی از نوع ارتباط بوم‌شناختی عوارض ماسه‌ای و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر با استفاده از توابع آماری تک‌متغیره و دو متغیره، کمک قابل توجهی به مدیریت بهتر بیابان‌های کشور می‌کند.

کپه‌ای و الگوی مکانی تپه‌های ماسه‌ای نامشخص است و این دو عارضه در کنار یکدیگر اثر منفی بر ایجاد و رشد یکدیگر دارند. این موضوع را می‌توان به دلیل نیازهای یکسان دو عارضه برای استقرار (فراهمی ماسه) و یا به دلیل وجود برخی شرایط محیطی مناسب به‌صورت موزاییکی دانست (میزان بالاتر رطوبت خاک در مناطقی که گیاه برای ایجاد نیکا حضور داشت نسبت به مناطق با رطوبت بسیار پایین که امکان استقرار گیاه وجود نداشته و به علت حضور میزان زیاد ماسه روان عوارض ماسه‌ای به‌جز نیکا تشکیل می‌گردند). از طرفی، الگوی پراکنش نیکاهای به‌صورت کپه‌ای بود که با توجه به روابط برهم‌کنشی منفی با دیگر تپه‌های ماسه‌ای می‌توان چنین استنباط کرد که در منطقه مورد مطالعه به علت شرایط مناسب برای ایجاد تپه‌های ماسه، انواع تپه‌های ماسه‌ای تشکیل شده‌اند و با توجه به اینکه مساعد بودن شرایط ادافیکی و هیدرولوژیکی مستلزم تشکیل نیکاهاست، در هر منطقه هرچند کوچک که شرایط ادافیکی و هیدرولوژیکی مساعد بود، گیاهان استقرار پیدا کرده و به این علت که نواحی بسیار کوچک (لکه) دارای این شرایط مناسب‌اند، رشد گیاهان و متعاقب آن ایجاد نیکاهای به‌صورت کپه‌ای یا تجمعی است. همچنین استفاده مفید و کاربردی از تصاویر اخذشده توسط پهپاد در این مطالعه برای پایش دقیق و به‌روز عرصه‌های ماسه‌ای منجر به ایجاد انگیزه برای استفاده بیشتر از این پرنده جهت بررسی و پایش مناطق بیابانی و صعب‌العبور گردید. براساس بررسی‌های صورت‌پذیرفته به نظر می‌رسد تاکنون در داخل کشور یا سایر نقاط جهان بررسی الگوی مکانی عوارض ماسه‌ای به‌جز نیکا انجام نگرفته است و لذا نتایج این بخش از مطالعه دارای نمونه مشابهی نیست. بخشی خانیکی و محمدی (۲۰۱۲) با مطالعه ویژگی‌های اکولوژی برخی از گونه‌های سالسولا در استان گلستان به این نتیجه رسیدند که گونه *salsola crassa spp. Turcomanica* با گونه *Halocnemum Strobilaceum* به‌صورت اجتماع دیده می‌شوند. یکی از دلایل تجمع گونه‌ها در کنار یکدیگر وجود شرایط مطلوب و مساعد برای رشد گیاهان در بخش‌های مختلف (حمایت توسط یک گونه) است که گیاه با قرار گرفتن در این بخش‌ها تشکیل الگوی مکانی کپه‌ای را می‌دهند

منابع

- Abbasi, H. R., Opp, C., Groll, M., Rohipour, H., & Gohardoust, A. (2019). Assessment of the distribution and activity of dunes in Iran based on mobility indices and ground data. *Aeolian Research*, 41, 100539.
- AhmadAbadi, A., Karam, A., Safari, A., & Yazdan Panah, M. (2020). Estimate of Flatness movement and Elevation movement of aeolians in Ardestan erg by Radar Interferometry and Spectral Indicators. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(4), 1-17.
- Alinejad, M., HosseinAlizadeh, M., Ownegh, M., & Mohammadian Behbahani, A. (2018). Investigating the spatial distribution pattern of Nebka (case study: Sufikm plain, Golestan province). *Natural Geography Research*, 50(4), 697-712.
- Al-Mutiry, M., Hermas, E. A., Al-Ghamdi, K. A., & Al-Awaji, H. (2016). Estimation of dune migration rates north Riyadh City, KSA, using SPOT 4 panchromatic images. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 258-269.
- Baas, A. C. (2007). Complex systems in aeolian geomorphology. *Geomorphology*, 91(3-4), 311-331.
- Bakhshi Khaniki, Gh., & Mohammadi, B. (2012). Ecological study of some species of Salsula genus (Cenopodiaceae) in Golestan province. *New Journal of Cell-Molecular Biotechnology*, 2(6), 45-52.
- Bazzichetto, M., Malavasi, M., Acosta, A. T. R., & Carranza, M. L. (2016). How does dunmorphology shape coastal EC habitats occurrence? A remote sensing approach using airborne LiDAR on the Mediterranean coast. *Ecological Indicators*, 71, 618-626.
- Darmani, M., Ara, H., Rashki, A.R., & Mafi, A. (2020). The origin of dust particles by examining their chemical and collection characteristics in Sarkhes city. *Geography and environmental hazards*, 9, 21-37.
- Delgado Blasco, J. M., Chini, M., Verstraeten, G., & Hanssen, R. F. (2020). Sand dune dynamics exploiting a fully automatic method using satellite SAR data. *Remote Sensing*, 12(23), 3993.
- Ebrahimi Maimand, S., Zand-mghadam, H., Khanehbad, M., Mahboubi, A., & Hosseinyar, GH. (2020). Analysis of sedimentary texture and effects of vegetation in the Nebkha dunes of Shahdad, eastern Kerman: Application in the formation mechanism. *Scientific Quarterly of Earth Sciences*, 29(115), 27-38.
- Getzin, S., & Wiegand, K. (2007). Asymmetric tree growth at the stand level: random crown patterns and response to slope. *Forest Ecology and Management*, 242(23), 165-174.
- Gholamreza A. & Sadeghian S. (2016). Investigating the role of precision agriculture UAV with remote sensing approach. *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Landscape*. Turkey, Istanbul University.
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H., & Stoyan, D. (2008). *Statistical analysis and modelling of spatial point patterns*. John Wiley & Sons.
- Hosseinalizadeh, M., Alinejad, M., Kariminejad, N., & Mohammadian Behbahani, A. (2019). Determining the spatial distribution of Halocnemum Strobilaceum species in Nebka Hill using G function in Agh Qala plain of Golestan province. *Desert Management*, 6(12), 19-32.
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Campetella, G., Jalalifard, A., & Alinejad, M. (2018). Spatial point pattern analysis of piping erosion in loess-derived soils in Golestan Province, Iran. *Geoderma*, 328, 20-29.
- Pommerening, A., & Stoyan, D. (2008). Reconstructing spatial tree point patterns from nearest neighbour summary statistics measured in small subwindows. *Canadian journal of forest research*, 38(5), 1110-1122.
- Kargar, M. R. & Sohrabi, H. (2019). Using canopy height model derived from UAV images for tree height estimation in Sisangan forest, 109-116.
- Karimi, M., Pourmjidian, M.R., Jalilvand, H., & Safari, A. (2012). Preliminary study for application of O-ring function in determination of small-scale spatial pattern and interaction species (Case study: Bayangan forests, Kermanshah), 608-621.
- Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., & Pourqasmi, H.R. (2020). Spatial monitoring of tunnel erosion using UAV aerial images in windy areas of Golestan province. *Watershed Research*, 33(3), 53-69.
- Mahmoudi, F. (2004). *Dynamic Geomorphology*. Payam Noor University Press.
- Maltez-Mouro, S., Garcia, L. V., Maranon, T., & Freitas, H. (2007). Recruitment patterns in a Mediterranean oak forest: a case study showing the importance of the spatial component. *Forest Science*, 53(6), 645-652.
- Mousavi, H., Moairi, M., & Wali, A. (2010). Integration of mathematical and statistical modeling of roughness in Barkhan, case study: Rig Chah Jam. *Natural Geography Research*, 73(1), 83-96.
- Nguyen, D., Rieu, I., Mariani, C., & van Dam, N. M. (2016). How plants handle multiple stresses: hormonal interactions underlying responses to abiotic stress and insect herbivory. *Plant Molecular Biology*, 91, 727-740.
- Tavakoli Fard, A., Ghasemieh, H., Nazari Samani, A., & Mashhadhi, N. (2015). Analysis of the activity level of the sand dunes of Rig Kashan

- using the Lancaster index. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 3(5), 37-48.
25. Refahi, H. (2004). *Wind erosion and its control*. Tehran University Publications.
26. Shahraki, A. (2017). *Production of digital surface model (DSM) with high resolution and accuracy using UAV photos*, Master's thesis in civil engineering. Eqbal Lahori Institute of Higher Education.
27. Wiegand, T., & Moloney, K. A. (2004). Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 104(2), 209-229.
28. Wiegand, T., He, F., & Hubbell, S. P. (2013). A systematic comparison of summary characteristics for quantifying point patterns in ecology. *Ecography*, 36(1), 92-103.

Investigating the Spatial Distribution and Interaction of Sand Dunes: A Case Study of Kalateh Mazinan Region

Mohammad Javad Yousefi,¹ Mohsen Hosseinalizadeh,*² Alireza Rashki,³ Narges Kariminejad,⁴
Hamidreza Abbasi,⁵ Ali Mohammadian Behbahani⁶

Received: 13/02/2024

Accepted: 08/09/2024

Extended Abstract

Introduction: Recognized as the hosts of a wide variety of formative processes, deserts represent vital ecosystems within Iran's natural landscape. On the other hand, wind erosion exerts particularly significant influence on such arid regions, playing a key role in shaping the environment while posing serious environmental risks. Moreover, wind-driven movement of active and semi-active sand dunes decreases the comfort levels for local inhabitants, putting agricultural lands, settlements, and transportation routes at risks. Consequently, studying the dynamic behavior and variability of wind-driven sediments, especially in arid and desert regions, is of great importance. While UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) may not fully replace traditional methods of spatial data collection, their unique capabilities allow them to be integral to the map-making process, offering more economical alternatives. Analyzing statistical summaries within the study timeframe facilitates an understanding of the spatial and temporal patterns of the sand dunes. As with many natural phenomena, wind erosion and sand dune dynamics can be complex and elusive; therefore, the investigation of their various impacts requires the application of contemporary methods such as statistical analysis. In this regard, this study mainly sought to develop a conceptual framework that outlines the patterns of sand features in the study area and elaborates on their interrelationships.

Materials and methods: This study was conducted in an area covering approximately 200 hectares of sand dunes in the southern region of Mezinan Kalate, located in western Sabzevar city. The area features various sand formations, including Nebkha and Barkhan. To analyze the spatial patterns of the complications observed, the exact locations of such complications were identified, followed by an assessment of their distribution patterns. The paired univariate function ($g(r)$) was then employed to investigate the distribution patterns of different complications and their impacts on similar types. Additionally, the bivariate pairwise correlation function ($g_{12}(r)$) was utilized to explore the interactions among various complications in the study area. Initially, a general assessment of the region was conducted through a field visit, followed by aerial photography using a drone to collect the required data regarding the complications from the study area. After analyzing the images, an orthophoto was generated. Then, a point map was created for spatial locations via ArcGIS 10.2, detailing the distribution of sand dunes and vegetation within the study area. Furthermore, the Kolmogorov-Smirnov test was applied to evaluate the normality of the statistical data. Finally, data processing and spatial analysis were carried out using the Programita software, which involved univariate and bivariate correlation functions, along with O-ring functions. The software employed a Monte Carlo simulation with 199 repetitions, achieving a 95% confidence level and a 5% significance level for the random distribution of the two species investigated.

1. PhD student of desert management and control, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

2. Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources; Email: mhalizadeh@gau.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Arid Zone and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

4. Assistant professor. Department of Natural Resources and Environmental Engineering. Faculty of Agriculture. Shiraz University

5. Assistant professor. Research Institute of Forests and Ralands. Agricultural Education and Extension Research Organization

6. Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Results: The diagram illustrating the distribution pattern of sand dunes employs the O-ring function, utilizing the $g(r)$ function values to analyze the spatial arrangement of the dunes. Findings from the application of this univariate function indicated that Barkhans did not display a significant spatial pattern. The finding is supported by the $O(r)$ function, reaffirming that the spatial arrangement of Barkhans lacks any significance. The results of the $g(r)$ function in examining the spatial pattern of Nebkhas via univariate functions revealed that within distances ranging from zero to 270 meters, the spatial pattern of the species was characterized by cumulative or clustered shape, and that no significant pattern was detected beyond 270 meters. Similarly, the results of $O(r)$ function suggested that the spatial arrangement of Nebkhas formed clusters within the 0 to 270 meters range, with no significant pattern being observed beyond 250 meters. Additionally, the results obtained from the bivariate function $g_{12}(r)$ showed a negative correlation between these two elements up to about 500 meters, demonstrating their opposing influences on each other's formation and distribution. This finding is consistent with the distribution map of the two elements. The bivariate function $O_{12}(r)$ was also used to validate the results found in $g_{12}(r)$, yielding consistent outcomes with those derived from the pairwise correlation analysis.

Discussion and Conclusion: The findings obtained from the spatial analysis of sand dunes and Nebkha indicated that the distribution of sand dunes in this area was intricate, while the arrangement of Nebkhas remained inconsistent. Together, these factors adversely impacted the formation and development of both phenomena. This situation may arise from the phenomena's similar requirements for the establishment, specifically the availability of sand. It may also be driven by the presence of certain favorable environmental conditions.

Keywords: Univariate Functions, Bivariate Functions, Spatial Pattern, Sand Dune Interaction, Spatial Functions, Nebkha.