نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢

Vol. 17, No. 61, Summer 2023

بررسی الگوهای نقطه‌ای مکانی فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد

نرگس کریمی‌نژاد[1]، حمیدرضا پورقاسمی[2] و محسن حسینعلی‌زاده[3]

تاریخ دریافت: ١٤٠٠/٠٨/١٦ تاریخ پذیرش: ١٤٠١/٠١/٢٧

چکیده

فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای پیچیدگی‌هایی دارند که بهترین راه برای بررسی همه‌جانبه آن‌ها، استفاده از روش‌های نوین مطالعاتی است. هدف از این پژوهش، تجزیه‌وتحلیل مکانی گسترش فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای مبتنی بر آماره‌های مکانی و مطالعات میدانی است. در این تحقیق، پس از پیمایش میدانی و نقشه‌برداری هوایی توسط پهپاد فتوگرامتری، مدل رقومی ارتفاع تهیه شد. سپس الگوی پراکنش مکانی و روابط متقابل سه رخساره بررسی و تأثیر عامل محیطی شیب در تمامی تحلیل‌های مکانی، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد الگوی پراکنش مکانی براساس تابع همبستگی جفتی ($g(r)$) برای هر دو فرسایش آبکندی و تونلی خوشه‌ای و برای حرکات توده‌ای تا فاصله ١٤٠ متر، پراکنده است. آماره‌های اختصاری دو متغیره ($g_{12}(r)$) نشان داد ارتباط متقابل مثبت و معنی‌داری بین فرسایش‌های آبکندی و تونلی وجود دارد. ارتباط متقابل هر یک از فرسایش‌های آبکندی و تونلی با حرکات توده‌ای در فاصله‌های کم، مثبت بود. افزایش شیب به‌عنوان یک ویژگی کمّی بر پراکنش و توزیع مکانی حرکات توده‌ای اثر زیاد و بر پراکنش مکانی فرسایش تونلی و آبکندی اثر کم داشت. لذا، استفاده از آماره‌های کمّی، می‌تواند منجر به شناسایی بهتر فرآیندهای موثر بر آنها شده و در نهایت سرعت خطرات طبیعی را به‌صورت موثرتری پیش‌بینی کند.

کلیدواژه‌ها: *آماره‌های اختصاری، پهپاد، حرکات توده‌ای، فرسایش آبکندی، فرسایش تونلی، نهشته‌های لسی*

مقدمه

مطالعه‌ی الگوی مکانی و ارتباط متقابل بین رخساره‌های فرسایشی به‌خصوص در نهشته‌های لسی که دارای حساسیت بالا نسبت به فرسایش خاک هستند، همواره ضروری و اجتناب‌ناپذیر است [٢٥، ٣٢]. درک توزیع مکانی عوارض و رخساره‌های سطح زمین (فرسایش‌های تونلی[4]، آبکندی[5] و حرکات توده‌ای[6]) در نهشته‌های لسی استان گلستان و نحوه شکل‌گیری آن‌ها نیاز به بررسی فرآیندهایی با دیدگاه همه‌جانبه در ارتباط با ژئومورفولوژی کمّی یک چشم‌انداز دارد [١١، ٢٤]؛ زیرا عوامل پیچیده‌ای مانند عوامل داخلی سطح زمین[7] و عوامل بیرونی[8] سطح زمین به صورت فرآیندهای پلی‌ژن[9] در ارتباط متقابل و پیچیده با یکدیگر هستند [٦]. الگوهای مکانی، ابزاری مناسب برای مدیریت بهینه در بسیاری از عرصه‌های خشک و نیمه‌خشک و معیار مهمی در شناخت تغییرات و پایش آن به‌شمار می‌آید [٧]. محل قرارگیری عوارض نقطه‌ای در یک منطقه را می‌توان با تعیین مختصات آن‌ها نسبت به یکدیگر به‌صورت یک سری نقاط نشان داد. بنابراین، مجموعه‌ای که شامل این نقاط (مکان قرارگیری رخساره‌های ژئومورفولوژیکی) باشند را الگوی مکانی[10] می‌نامند. از طرف دیگر در آمار مکانی، تحلیل داده‌هایی مورد نظر است که دارای همبستگی بوده و این همبستگی ناشی از موقعیت و مکان قرار گرفتن آن‌ها در فضای مورد مطالعه است [١٤]. از مزایای آماره‌های اختصاری، تحلیل الگوهای مکانی و روابط متقابل بین پدیده‌های نقطه‌ای (حضور رخساره‌ها در یک چشم‌انداز)، به‌آسانی قابل‌درک بودن و انعطاف‌پذیر بودن در استفاده از داده‌های کمکی دیگر، عدم نیاز به تطابق با هیچ‌گونه توزیعی است [٥، ٢٧، ٣٦].

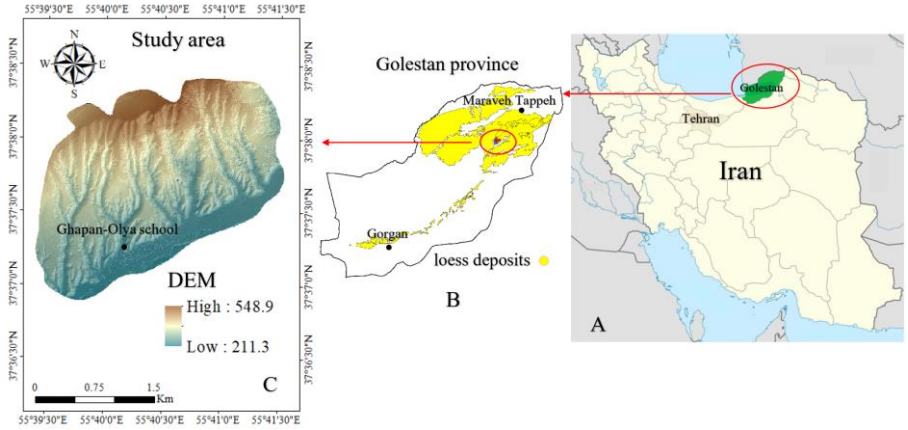
مدل‌سازی مکانی توأم تهدیدهای فرسایش‌های آبکندی و حرکات توده‌ای بر آثار فرهنگی و باستانی، توسط لومباردو و همکاران [٢، ١٩، ٣٠] در کشور رومانی مورد استفاده قرار گرفته است. آنها اهمیت

١- پسادکتری، بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران
٢- پروفسور، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران و نویسنده مسئول: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir
٣- دانشیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

4. Piping erosion
5. Gully erosion
6. Mass movement
7. Endogenetic
8. Exogenetic
9. Polygenetic Processes
10. Spatial Pattern

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده‌ی مطالعاتی در ایران (الف)، استان گلستان (ب)، و محدوده مطالعاتی (ج)

Fig 1. The location map of the study region in Iran (a), Golestan province (b), and study area (c)

رخداد این فرسایش‌ها در آثار باستانی را موضوعی چندتخصصی بیان کرده و ارتباط دادن این موارد با جامع‌شناسی را کاری مشکل دانسته‌اند. از طرفی فعالیت فرسایش آبکندی در مقایسه با حرکات توده‌ای شدیدتر بوده که به پایش زمانی نیاز دارد. علاوه بر آن، کوکمیلکس و ساکس [۲۶] به مطالعه توأم ۲۳۱ حرکت توده‌ای متنوع در مراحل مختلف توسعه و ۲۵۹ آبکند در دره گواجا[1] در کشور لتونی پرداختند. آنها بعد از تهیه نقشه شاخص‌های حساسیت‌پذیری فرسایش‌های مورد مطالعه، نتایج را با وقایع زمینی بررسی کردند و بر دقت شاخص‌های مکانی حرکات توده‌ای صحه گذاشتند. از طرفی از طریق آزمون‌های آماری بر کپه ای‌تر بودن حرکات توده‌ای نسبت به آبکندها اشاره کردند. از طرف دیگر پورقاسمی و همکاران [۳۹] بر پیچیده بودن کمّی‌سازی اندرکنش وقایع طبیعی و ارزیابی ریسک خطرهای متعدد اشاره کرده‌اند. حسینعلی‌زاده و همکاران [۲۰] نیز اشاره داشتند که تراکم تونلی‌ها و آبکندی در کاربری مرتعی بیش‌تر است.

آن‌چه قرار است در این تحقیق مدنظر قرار گیرد، تعیین الگوی مکانی و ارتباطات متقابل بین فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای در کاربری مرتعی است که با توجه به مطالعات پیشین، این کاربری محیط مناسبی برای شکل‌گیری رخساره‌های مورد نظر بوده و تراکم تونلی‌ها و آبکندی‌ها در کاربری مرتع بیش‌تر است. بر این اساس در این تحقیق با توجه به گسترش شدید فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای در اراضی لسی شمال شرق استان گلستان، بررسی ارتباط متقابل و پراکنش مکانی آن‌ها با استفاده از روش‌های نوین تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا از طریق تصاویر هوایی پهپاد صورت گرفته‌است [۲۳]. تصاویر حاصل از پهپاد فتوگرامتری، تحلیل دقیق مکانی این رخساره‌ها را میسّر کرده و با استفاده از آن امکان تعیین الگوهای مکانی و ارتباط متقابل بین این رخساره‌ها با یکدیگر را می‌توان فراهم کرد. در نهایت منجر به اتخاذ تصمیم بهتر به‌منظور ارائه راه‌کارهای مناسب حفاظت آب‌وخاک خواهد شد [۱۹، ۲۰].

1. Gauja

مواد و روش‌ها

تعیین منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی (حوزه آبخیز قپان‌علیا)، از سرشاخه‌های گرگان‌رود و در اراضی لسی واقع در شرق استان گلستان به‌وسعت تقریبی ۵۰۰ هکتار انتخاب شد. ارتفاع بیشینه و کمینه محدوده‌ی مطالعاتی به‌ترتیب ۵۴۹ و ۲۱۱ متر بالاتر از سطح دریا است. اقلیم محدوده مطالعاتی با استفاده از روش دومارتن، نیمه‌خشک و متوسط بارندگی سالانه ۲۶۰ میلی‌متر است [۲۲]. موقعیت محدوده مطالعاتی در ایران (الف) و استان گلستان (ب) در شکل ۱ آورده شده است. هم‌چنین نمونه‌هایی از فرسایش‌های آبکندی، تونلی و حرکات توده‌ای در شکل ۲ نشان داده شده است.

بازدید و پیمایش میدانی فرسایش و تهیه‌ی تصویر با پهپاد

مدل رقومی ارتفاع منطقه از تصاویر و ابر نقاط ایجادشده توسط پهپاد در پیکسل‌هایی به ابعاد ۱×۱ متر تهیه شد. برداشت تصاویر در وسعت منطقه (۵۰۰ هکتار) با ارتفاع پرواز ۲۰۰ متر از سطح زمین و با سرعت پرواز ۱۰ متر بر ثانیه و هم‌چنین هم‌پوشانی مسیرهای پرواز ۷۵ درصد صورت گرفت. مسیر پرواز توسط نرم‌افزار پیکس‌فوردی[2] مشخص و پرنده به‌صورت خودکار طبق مسیرهای هوایی تعریف شده، پرواز نمود. پیش از انجام عملیات عکس‌برداری هوایی، نشانه‌های غیرماندگار نقاط کنترل زمینی طراحی و موقعیت تقریبی آن‌ها مشخص شد. شبکه دی‌جی‌پی‌اس[3] حداقل با یک نقطه مرجع (سازمان نقشه‌برداری یا سامانه شمیم) تعیین موقعیت شد. هم‌چنین، پارامترهای مربوط به عکس‌برداری شامل سرعت شاتر، ایزو، فوکوس و دریچه دیافراگم به‌درستی تنظیم شد تا تصاویری با کیفیت و روشنایی مناسب به‌دست آید و در مراحل پردازش نیز به محصولات با کیفیتی دست یافت.

لازم به ذکر است در این تحقیق از پهپاد بال ثابت[4] استفاده شد. از

2. Pix4d
3. DGPS
4. Fixed-Wing

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

شکل ۲- نمونه‌ای از فرسایش‌های تونلی (الف)، آبکندی (ب) و (ج) حرکات توده‌ای در محدوده مطالعاتی

Fig 2. An example of piping erosion (a), gully erosion (b), and (c) mass movements in the study area

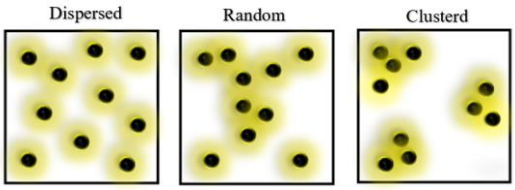
جمله مزایای این پهپاد می‌توان به استفاده از فناوری پی‌تی‌کا[1] برای ثبت مختصات مراکز تصویر با دقت بسیار بالا در حین پرواز، حذف نقاط کنترل زمینی، مدت زمان پرواز بیش‌تر پرنده‌های بال ثابت نسبت به مولتی روتورها و استفاده از ای‌ام‌یو[2] دقیق‌تر و در نتیجه ثبت دقیق زوایای پرنده حین پرواز اشاره کرد [۳۸] (شکل ۳).

شکل ۳- نمایی از پهپاد بال ثابت به کاررفته برای تصویربرداری در تیرماه ۱۳۹۹

Fig 3. The view of a fixed wing UAVs used for aerial drone surveys in July 2019

آنالیزهای آماری با استفاده از آماره‌های اختصاری

به‌طورکلی سه نوع الگوی مکانی اصلی در طبیعت وجود دارد (شکل ٤) که عبارت‌اند از: ۱- تصادفی ۲- پراکنده ۳- خوشه‌ای (کپه‌ای) [۳۲].



شکل ٤- نمای کلی انواع الگوهای مکانی [۲۰]

Fig 4. The overview of different types of spatial patterns [20]

آماره‌های اختصاری که براساس آماربرداری همه نقاط (تونلی، آبکندی و حرکات‌توده‌ای) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، به دو دسته توابع تک‌متغیره[3] (تابع همبستگی جفتی یا $g(r)$) و توابع دومتغیره[4] (تابع $g_{12}(r)$) تقسیم می‌شوند [۱۷] که در زیر به شرح هر یک از توابع به کار برده شده پرداخته می‌شود:

آماره‌های اختصاری تک‌متغیره

تابع تک‌متغیره همبستگی جفتی ($g(r)$) به‌منظور تعیین الگوی مکانی رخساره‌های فرسایشی تونلی و آبکندی مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۱). تابع تک‌متغیره $g(r)$ بیان‌گر تراکم نقاط بر روی دایره‌ای با شعاع r و مرکز تصادفی است (شکل ۵) [۱۷، ۲۱]. در این روش، فواصل بین تمام جفت نقاط موجود در سطح مورد بررسی، در نظر گرفته می‌شود. این تابع برای یک الگوی نقطه‌ای مشخص به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌گردد [٤۲].

$$K(r) = \frac{a}{n(n-1)} \sum_i \sum_j I(e_{ij}) \qquad (۱)$$

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dK(r)}{dr} \qquad (۲)$$

در رابطه ۱، r مقدار فاصله از نقطه تصادفی، a مساحت منطقه مورد نظر، n تعداد کل تونلی یا آبکندی، I تعداد تونلی یا آبکندی در فاصله r و e_{ij} روش تصحیح اثر حاشیه‌ای است. در یک الگوی تصادفی، مقدار تابع K برابر با πr^2 است. در رابطه 2، $dK(r)$ مشتق تابع k رایپلی و dr شعاع است. مقدار این تابع در یک الگوی مکانی تصادفی برابر یک بوده و بیش‌تر بودن این تابع از یک، بیان‌گر الگو مکانی خوشه‌ای و کم‌تر بودن آن نشان‌دهنده الگوی مکانی پراکنده است.

آماره‌های اختصاری دومتغیره

به‌منظور بررسی اثر متقابل و مطالعه اجتماع‌پذیری نقاط حاصل از وقوع پدیده‌ها (جفت رخساره‌ها در این مطالعه مانند تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای، آبکندی و حرکات توده‌ای) از تابع دومتغیره همبستگی جفتی $g_{12}(r)$ استفاده شد [۲۰]. تابع $g_{12}(r)$ فواصل بین دو

1. PTK, Real-Time Kinematic
2. IMU, Inertial Measurement Unit
3. Univariate Functions
4. Bivariate Funnctions

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

رخساره مختلف با ابعاد متفاوت را در یک نقشه توزیع مکانی در نظر می‌گیرد و براساس آن به تعیین ارتباط متقابل (مثبت، خنثی، منفی) بین آن‌ها می‌پردازد (رابطه ۳) [۵، ۳۷].

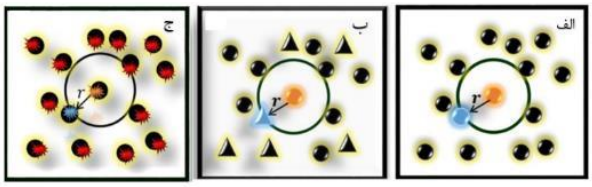
$$g_{12}(r)=\frac{1}{2\pi r}\frac{dK(r)}{dr} \qquad (۳)$$

بیش‌تر بودن مقدار این تابع از یک، بیان‌گر روابط متقابل مثبت و کم‌تر بودن آن نشان‌دهنده روابط متقابل منفی است (شکل ۵).

علاوه بر تحلیل الگوی نقطه‌ای فرسایش‌های موردمطالعه با استفاده از آماره‌های اختصاری تک‌متغیره ($g(r)$) و دومتغیره ($g_{12}(r)$)، تابع همبستگی نشان‌دار ($mcf(r)$) به‌منظور تعیین اثر یک ویژگی کمّی (شیب در این تحقیق) بر روی پراکنش مکانی هر یک از رخساره‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵). به بیان دیگر، بررسی تاثیرات پارامترهای کمی مانند شیب بر الگوی پراکنش عوارض نقطه‌ای با استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار امکان‌پذیر است. برای محاسبه تابع همبستگی نشان‌دار، از فرمول زیر استفاده می‌شود [۳۹].

$$K_{mm}(r)=\frac{E_{ij}[m_i,m_j]}{E[m,m']} \qquad (٤)$$

در رابطه ۳، $\mathbf{E}$ امید ریاضی است و m و m' نشان‌های تصادفی هستند که می‌تواند بر شکل‌گیری و گسترش مکانی رخساره‌ها تأثیر بگذارد.



شکل ۵- نمای کلی تابع تک‌متغیره g(r) (الف)، دومتغیره $g_{12}(r)$ (ب) و تابع همبستگی نشان‌دار $K_{mm}(r)$ [۳۹]

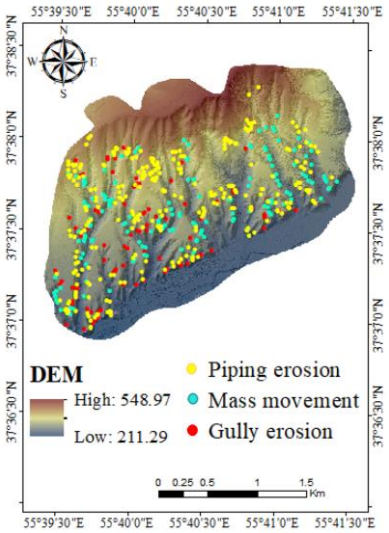
Fig 5. The overview of univariate function g(r) (a), bivariate $g_{12}(r)$ (b), and mark correlation function (Kmm(r)) [39]

روش آماری مناسب برای بررسی معنی‌داری این توابع تک‌متغیره و دومتغیره، آزمون مونت کارلو [1] است [۳۶]. آزمون مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند [۹]. در محاسبه توابع تک‌متغیره و دومتغیره، حدود بالا و پایین برای آزمون مونت کارلو مقدار عددی ۵ در نظر گرفته شد (۱۹۹ تکرار و در سطح ۰/۰۵)، که این حدود می‌تواند معنی‌دار بودن یا غیر معنی‌دار بودن توزیع توابع را نشان دهد [٤٦]. در صورتی‌که خط تابع خارج از محدوده مونت باشد، نتایج در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است و در صورتی‌که خط تابع در داخل محدوده مونت کارلو قرار داشته باشد، بیان‌گر غیرمعنی‌داری تابع در محدوده مورد نظر و نبود اختلاف با حالت تصادفی است [۳٦]. در نمودار ارائه شده برای هر یک از توابع به کاررفته، خط مشکی بیان‌گر تغییرات مشاهده‌شده در الگوی پراکنش مکانی در توابع تک‌متغیره و یا تغییرات مشاهده‌شده در ارتباط متقابل مکانی در توابع دومتغیره، خطوط خاکستری محدوده شبیه‌سازی‌شده و خط‌چین نارنجی نشان‌دهنده حالت پیش‌فرض است. لازم به توضیح است که در این تحقیق، به منظور آماده‌سازی داده‌ها و مدل‌سازی الگوهای نقطه‌ای هر یک از رخساره‌ها (آبکندی، تونلی و حرکات توده‌ای)، از محیط نرم‌افزار پروگرمیتا [2] استفاده شد.

نتایج

مشخصات کلی فرسایش‌های آبکندی، تونلی و حرکات توده‌ای

پس از پیمایش میدانی در محدوده مطالعاتی و تصویربرداری توسط پهپاد، تعداد ۲۸۱ فرسایش تونلی، ۹۰ فرسایش آبکندی و ۱۵۲ حرکات توده‌ای بر روی نقشه تهیه‌شده از مدل رقومی ارتفاع سال ۱۳۹۹ مشخص شد. و موقعیت مکانی نقاط هر رخساره براساس بازدیدهای میدانی مورد بازبینی و ارزیابی دقیق‌تر قرار گرفت (شکل ٦).



شکل ٦- موقعیت مکانی رخساره‌های فرسایشی از تصویر پهپاد بال ثابت تهیه شده در سال ۱۳۹۹

Fig 6. The location of soil landforms obtained from a fixed wing UAV image in 2019

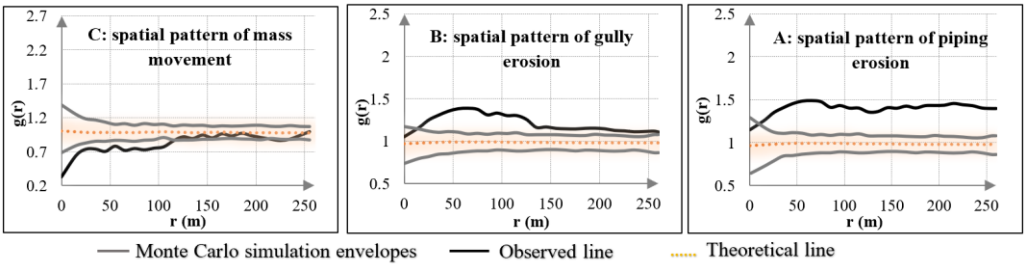
الگوی مکانی فرسایش‌های تونلی،آبکندی و حرکات توده‌ای

نمودار تابع g(r) به منظور بررسی رخساره‌ی فرسایشی تونلی نشان داد الگوی مکانی تونلی‌ها در همه مقیاس‌های فاصله‌ای مورد بررسی، تجمعی یا خوشه‌ای بوده است (شکل ۷ الف). با توجه به خارج بودن خط تابع از محدوده مونت‌کارلو، می‌توان نتیجه گرفت که تجمع نقاط تونلی‌ها در کنار یکدیگر به‌لحاظ آماری و در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. مشابه نتایج حاصل از این تابع در مورد

1. Monte Carlo

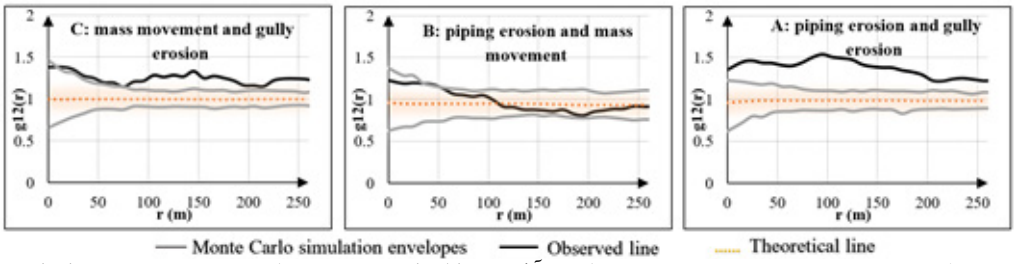
2. Programita

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]



شکل ۷- نمودار الگوی مکانی رخساره‌های فرسایشی تونلی (الف)، آبکندی (ب) و حرکات توده‌ای (ج) با استفاده از تابع تک‌متغیره همبستگی جفتی

Fig 7. Spatial pattern diagram of piping erosion (a), gully erosion (b), and mass movements (c) using univariate pair correlation function



شکل ۸- نمودار ارتباط متقابل بین رخساره‌های فرسایشی تونلی و آبکندی (الف)، فرسایش تونلی و حرکات توده‌ای (ب)، حرکات توده‌ای و فرسایش آبکندی (ج) با استفاده از تابع دو متغیره همبستگی جفتی

Fig 8. Spatial interaction diagram of piping erosion and gully erosion (a), piping erosion and mass movements (b), and mass movements and gully erosion (c) using bivariate pair correlation function

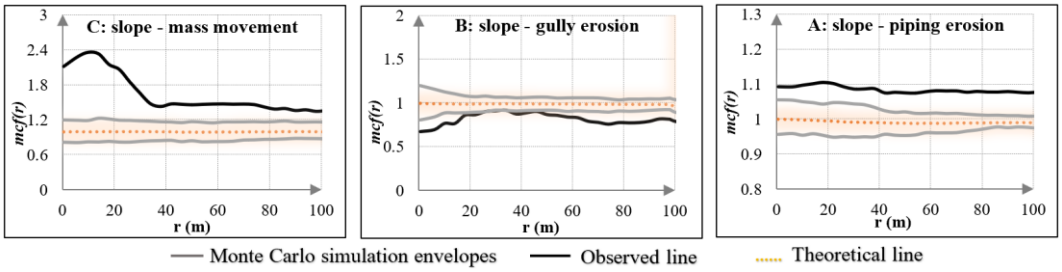
فرسایش تونلی، نمودار تابع g(r) در بررسی الگوی مکانی نقاط آبکندی‌ها نشان داد که مقدار تابع در فاصله‌های بین ۲۵۰-۰ متر، دارای الگوی مکانی کپه‌ای یا خوشه‌ای بوده است. علاوه بر این، معنی‌داری این توزیع در سطح ۰/۰۵ در فاصله‌های ذکر شده، به‌دلیل قرار گرفتن مقدار تابع بیرون از حدود مونت‌کارلو، تائید شده است (شکل ۷ ب). به بیان دیگر، نتایج حاصل از به‌کارگیری تابع g(r) در بررسی الگوی پراکنش مکانی آبکندها در محدوده مورد بررسی بیانگر پراکنش بیشتر آن‌ها در کنار یکدیگر و اثر تسهیل‌گری آن‌ها بر ایجاد و گسترش یکدیگر در تمام مقیاس‌های فاصله‌ای مورد بررسی بوده است. نتایج تحلیل تابع g(r) نشان داد که الگوی مکانی حرکات توده‌ای در محدوده مطالعاتی در فاصله‌های کم‌تر از ۱۳۰ متر پراکنده بوده است. هم‌چنین مقدار این تابع در فواصل مکانی بین ۱۳۰-۱ متر خارج از محدوده مونت‌کارلو قرار گرفته است. این مهم بیان‌گر این است که توزیع مکانی حرکات توده‌ای در مقیاس فاصله‌ای مذکور به‌لحاظ آماری معنی‌دار است (شکل ۷ ج). در نمودار تابع g(r)، توزیع مکانی حرکات توده‌ای در فاصله‌های ۱ متر تا ۲۵۰ متر نشان داد که الگوی مکانی آن‌ها پراکنده بوده و این پراکنش در چشم‌انداز موردمطالعه به‌لحاظ آماری و در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است.

تحلیل مکانی روابط متقابل بین فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای

بررسی ارتباط متقابل بین فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای در محدوده مطالعاتی با آماره‌های اختصاری دومتغیره، تابع همبستگی جفتی $g_{12}(r)$ در نمودار تابع $g_{12}(r)$ نشان داد روابط متقابل بین تونلی‌ها و آبکندی‌ها در همه مقیاس‌های فاصله‌ای مورد بررسی مثبت و معنی‌دار بوده است (شکل ۸ الف). بدین معنی که پراکنش و حضور یکی از این دو فرسایش می‌تواند باعث پراکنش بیش‌تر دیگری شود. به‌عبارت دیگر این نوع فرسایش‌ها در یک خانواده قرار گرفته و زنجیره چندخطره[1] محسوب می‌شوند و از توسعه انواع فرسایش تونلی (ریزشی[2]، دیواره‌های شیب‌دار[3] و دیواره‌های افقی[4]) فرسایش‌های آبکندی (آبکند کور[5]، آبکند منقطع[6] و آبکند پیوسته[7]) حاصل می‌شود [۴۷]. به‌عبارتی توسعه یکی از این اشکال فرسایشی به‌عنوان اثر ماشه‌ای در رخداد و تشدید سایر اشکال به‌شمار می‌آید. با توجه به آن، تابع دومتغیره $g_{12}(r)$ نشان داد که فرسایش تونلی و حرکات توده‌ای در فاصله‌های مکانی بین ۱۰۰-۱ متر دارای رابطه متقابل مثبت هستند (شکل ۸ ب)؛ اما با توجه به قرارگیری خط تابع در محدوده مونت کارلو معنی‌داری آن در سطح ۵ درصد و به احتمال ۹۵ درصد تایید نشد. این عدم ارتباط معنی‌دار ناشی از ذات رخداد این دو نوع فرسایش است؛ زیرا فرسایش‌های تونلی، انحلالی است، اما حرکات توده‌ای، ثقلی هستند. با توجه به شکل (۸ ج) که مربوط

1. multi-hazard chain
2. piping collapse or collapsed pipe
3. Sinkhole
4. Tunnel
5. Blind gully-head
6. Discontinues gully
7. Continues gully

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]



شکل ۹- تابع همبستگی نشان‌دار برای تعیین اثر شیب بر پراکنش مکانی رخساره‌های فرسایشی تونلی (الف)، آبکندی (ب) و حرکات توده‌ای (ج)

Fig 9. Mark correlation function to determine the effect of slope on the spatial distribution of piping erosion (a), gully erosion (b), and mass movements (c)

به ارتباط متقابل مکانی بین حرکات توده‌ای و آبکندها با استفاده از تابع $g_{12}(r)$ است، خط تابع در کلیه مقیاس‌های فاصله‌ای مورد مطالعه (۲۵۰-۰ متر) در بیرون محدوده مونت کارلو قرار داشت، بنابراین حضور آبکندها و حرکات توده‌ای در کنار یکدیگر است که به‌لحاظ آماری معنی‌دار است.

تحلیل مکانی اثر نشان کمّی شیب بر فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای

اولین تابع حاصل از محاسبات ریاضی صورت گرفته با استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار بر روی تونل‌ها انجام شد و نتایج نشان داد که خط تابع (خط مشکی) در نمودار بیشتر از حالت پیش‌فرض (خط قرمز) است. بنابراین افزایش شیب می‌تواند به عنوان یک عامل موثر، الگوی مکانی تونل‌ها را خوشه‌ای‌تر کرده و تراکم آن‌ها را در محدوده مطالعاتی تغییر دهد (شکل ۹ الف). علاوه بر آن، نتایج حاصل از محاسبات ریاضی صورت گرفته بر روی فرسایش آبکندی با استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار نشان داد که تراکم آبکندها با افزایش شیب به شدت کاهش می‌یابد و اثر این عامل در مقایسه با تونل‌ها کم‌تر است (شکل ۹ ب). زیرا مطابق آنچه در تابع قبلی اتفاق افتاد، خط تابع (خط مشکی) در نمودار کم‌تر از حالت پیش‌فرض (خط قرمز) است و این بدین معناست که پراکنش مکانی آبکندها بیش‌تر در مکان‌های مسطح و دارای شیب بسیار کم است. در نهایت، تابع همبستگی نشان‌دار به‌کاررفته حاصل از محاسبات آماری صورت گرفته بر روی پراکنش مکانی حرکات توده‌ای نشان داد که حرکات توده‌ای با شدت بسیار زیاد تمایل به پراکنش بیش‌تر در مناطقی را دارند که شیب بیش‌تر است (شکل ۹ ج). زیرا رخداد این نوع از فرسایش تحت تاثیر نیروی ثقل (اختلاف ارتفاع و شیب) است و عوامل دیگر نظیر بارندگی زیاد، مانند اثر ماشه ای عمل می‌کند. از طرفی، فرسایش غالب نهشته‌های لسی آبکند و تونلی در شیب‌های کم است و حرکات توده‌ای رخ داده اکثراً از نوع لغزش‌های سطحی بوده و در دامنه‌های شیب‌دار واقع شده‌اند. بنابراین بستر رخداد آنها در نهشته‌های منفصل موجود در دامنه‌ها است که توسط بارندگی‌های متوالی تشدید می‌شود. همچنین مقدار عددی به‌دست‌آمده از این تابع بیش‌تر از مقدار عددی آن برای فرسایش تونلی است و معنی‌داری آن به احتمال ۹۵ درصد به سبب بیرون بودن خط تابع از محدوده مونت‌کارلو به اثبات رسیده است. بنابراین افزایش شیب می‌تواند به ترتیب منجر به شکل‌گیری حرکات توده‌ای، تونل‌ها و سپس آبکندها شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل از به‌کارگیری آماره‌های اختصاری تک‌متغیره به‌منظور درک بهتر الگوی پراکنش مکانی فرسایش‌های تونلی و آبکندی می‌توان اظهار داشت که الگوی پراکنش فرسایش‌های تونلی و آبکندی با تابع تک‌متغیره مورد بررسی $g(r)$ خوشه‌ای است. این پراکنش در ارتباط با حرکات توده‌ای متفاوت است. فرسایش‌های تونلی و آبکندی در نهشته‌های لسی محدوده مطالعاتی تحت تأثیر عوامل مختلف، الگوی پراکنش یکسانی دارند که دلیل آن بیش‌تر مرتبط با روابط مثبت فرآیندی برخی از عوامل محیطی است که در مکان‌های مشخص از محدوده در حال اثرگذاری است. به‌عبارتی، عوامل کنترل کننده رخداد و یا توسعه این رخساره‌های فرسایشی تقریباً یکسان است. نتایج این مطالعه در راستای تحقیقات انجام شده توسط حسینعلی‌زاده و همکاران [۱۹] و پورقاسمی و همکاران [۳۹] است. علت آن را می‌توان در عوامل تاثیرگذار بر شکل‌گیری این رخساره مورد بررسی قرار داد. از جمله این عوامل می‌توان به بارندگی‌های متوالی در محدوده مطالعاتی اشاره کرد که عموماً در بستر نهشته‌های منفصل موجود در دامنه‌ها اثرگذار است.

آماره‌های اختصاری تک‌متغیره، الگوهای مکانی را با توجه به فرمول محاسباتی مشخصی که دارند، شناسایی می‌کنند. حساس‌ترین آماره اختصاری به‌کاررفته نسبت به تغییرات مکانی، تابع $g(r)$ است که شناسایی الگوی مکانی عوارض نقطه‌ای را با نمایش نحوه تغییرات تراکم ممکن می‌نماید [۲۱]. هرچند طولانی‌بودن فرآیند محاسبه تابع از ویژگی‌های منفی آن است، این تابع، کپه‌ای بودن و پراکندگی نقاط را در یک الگوی نقطه‌ای بر اساس تراکم و مقیاس مکانی با دقت بیش‌تری نسبت به سایر توابع نشان می‌دهد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد [۱، ۱۰، ۲۹]. در این پژوهش نیز مانند پژوهش انجام شده توسط چورچی و همکاران [۵]، دو ویژگی مهم تابع همبستگی جفتی $g(r)$ یعنی ماهیت غیرتجمعی و حساسیت نسبت به تغییرات الگوی مکانی در فاصله‌های مختلف و نمایش دقیق آن مورد تأکید قرار گرفته است. این دو ویژگی مهم، تابع $g(r)$ را نسبت به سایر تابع‌ها پرکاربردتر کرده است [۵، ۲۱]. نمایش بهتر تغییرات الگوی مکانی بر اساس فاصله در درون دایره‌هایی با شعاع مشخص و یکنواختی بیش‌تر نمودار از ویژگی‌هایی است که مختص این تابع

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

است [۲۰، ۲۱، ۳۵]. بنابراین استفاده از این تابع می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با سیستم‌های پیچیده در اختیار ما قرار دهد؛ زیرا به‌سادگی می‌تواند روابط پیچیده بین فرآیندهای نقطه‌ای را به صورت قابل فهم مدل‌سازی کرده و در اختیار محقق قرار دهد.

علاوه بر آن، ارتباط متقابل مثبت (بالا بودن خط تابع نسبت به حالت پیش‌فرض) بین فرسایش تونلی و حرکات توده‌ای تا فاصله ۱۰۰ متر بیان‌گر این است که تجمع آبکندی‌ها در جایی که حرکات توده‌ای حضور بیش‌تری دارند، بیش‌تر است که این رابطه نیز بیان‌گر فرآیندی بودن ارتباط بین این دو نوع فرسایش است [۲۳]. براساس مفاهیم حاصل از خروجی‌های مدل‌های آماری بکاررفته در این تحقیق و تجربیات تیم تحقیقاتی در بازدیدهای میدانی، جریان‌های سطحی با نفوذ در اراضی شیب‌دار (بدلیل حضور پوشش گیاهی، حفرات ایجاد شده توسط موجودات زنده و انحنای مقعر سطح)، منجر به گسترش جریان‌های زیرسطحی شده است. در ادامه با انحلال خاک زیرسطحی (عمدتاً ناشی از درصد بالای سیلت)، فرورفتگی‌هایی در خاک (معمولاً در افق B و C) ایجاد شده و با ریزش سقف، فروچاله‌ها ایجاد می‌شوند. با گسترش فروچاله‌ها به سمت آبراهه‌های موجود در بالای شیب، تونل‌های خطی ایجاد شده در زیرسطح رشد کرده و با ریزش دوباره سقف، آبکندی‌ها شروع به گسترش می‌کند. لازم به ذکر است این استدلال‌ها براساس مشاهدات میدانی و آنالیزهای آماری بر روی تصاویر پهپاد تهیه شده از محدوده مطالعاتی در اراضی لسی شمال شرق استان گلستان ارائه شده است و نیاز به بررسی بیشتر در سایر مناطق دارد. نتایج این پژوهش با تحقیق انجام‌شده توسط حسینعلی‌زاده و همکاران [۲۰] مبنی بر اهمیت توابع دومتغیره به منظور تعیین ارتباط فضایی و فرآیندی فرسایش‌های تونلی و آبکندی، مشابهت دارد. از نتایج حاصل شده استنباط می‌شود با شروع فرسایش تونلی و تأثیر عوامل مؤثر بر گسترش آن، بر تعداد تونل‌ها در اطراف یکدیگر افزوده شده و در نهایت با تخریب چندین تونلی کوچک، تونلی بزرگ‌تری تشکیل می‌شود؛ و با ادامه تأثیر عوامل مؤثر بر آن و پیشروی به‌سمت بالای شیب، رخساره فرسایشی آبکندی شکل می‌گیرد [۱۳]. به‌عبارتی از دیدگاه سلسله مراتبی، تونل‌ها مقدم بر آبکندی‌ها بوده و زودتر از آن‌ها تشکیل می‌شوند [۳]. براساس دیدگاه بسیاری از محققان [۱۳، ۴۴، ۴۸]، فرآیند تشکیل و گسترش بسیاری از آبکندی‌ها و به‌دنبال آن آبکندها در اثر تونلی‌هایی است که به‌صورت زیرسطحی رشد کرده و به‌دنبال آن باعث ریزش حجم عظیمی از خاک می‌شوند. برناتک و ورنسکا [۳] اظهار داشتند که بیش‌تر تونل‌ها در قسمت‌های پایینی دامنه تشکیل شده و به‌سمت بالادست دامنه گسترش پیدا می‌کنند. بنابراین، براساس نتایجی که تا این مرحله از تحقیق پیش‌رو از آماره‌های اختصاری به‌دست آمده و براساس رویکرد فرسایشی و ژئومورفولوژیکی به‌منظور بیان ارتباط مکانی بین فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای می‌توان اظهار داشت که در شرایط پایدار محیطی، تونل‌ها به صورت پراکنده با تعداد و تراکم کم، حضور دارند [۴، ۱۷، ۲۷، ۴۱]. با تأثیر عوامل محیطی، الگوی مکانی تونل‌ها، خوشه‌ای شده و تراکم آن‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه آبکندها از اتصال زیرسطحی تونل‌ها و ریزش یک‌باره سقف آن‌ها ایجاد شده و در شرایط ناپایدار محیطی توسعه می‌یابند. این روند خوشه‌ای شدن الگوی پراکنش تونل‌ها، تبدیل آن‌ها به آبکندی و سپس تشکیل آبکند، با کاهش پتانسیل محیطی از دیدگاه حفاظت آب و خاک همراه است.

علاوه بر آن، پراکنش حرکات توده‌ای و تونل‌ها تحت تأثیر شیب می‌توانند تغییراتی را متفاوت با آن‌چه برای پراکنش آبکندها اتفاق افتاده است، نشان دهد. بنابراین، تأثیر شاخص افزایش شیب در وقوع اکثر حرکات توده‌ای نسبت به سایر رخساره‌ها بسیار مشخص است. زیرا شیب‌های بیش‌تر می‌تواند باعث کاهش مقاومت دامنه‌ها گردیده و در ابتدا باعث اتفاق افتادن حرکات توده‌ای گشته و پس از آن با زیرشویی خاک موجود در پای دامنه‌ها به‌وسیله جریان‌های پرسرعت سیلابی، رواناب‌های سطحی و یا جریان‌های رودخانه‌ای، عامل ایجاد فرسایش آبکندی شوند [۱۲]. هر چند که یک عامل مانند شیب به‌تنهایی نمی‌تواند منجر به شکل‌گیری و گسترش رخساره‌هایی مانند آبکندی‌ها و حرکات توده‌ای و فرسایش تونلی شود و در واقع شکل‌گیری این رخساره‌ها تحت تاثیر فرآیندهای بسیار پیچیده درونی و بیرونی زمین است که در صورت عدم مدیریت به‌هنگام، باعث ایجاد خطرات طبیعی[1] و بلایای طبیعی[2] خواهند شد. اگرچه یک عکس‌العمل فوری (درمان) برای کنترل بلایای طبیعی نمی‌تواند صورت گیرد (با توجه به این‌که در هر مسئله‌ای پیش‌گیری بهتر از درمان است)، اما با شناخت وضعیت گسترش این نوع فرسایش‌ها با برنامه‌ریزی درست در زمینه حفاظت تا حدودی می‌توان از شدت یافتن و توسعه آن‌ها پیش‌گیری کرد. علاوه بر آن، با بررسی رخساره‌ها و فرآیندهای موثر بر شکل‌گیری و گسترش آن‌ها در مقیاس مکانی و زمانی مختلف، زیرساخت مناسبی برای ارزیابی کمّی دقیق‌تر و برنامه‌ریزی اقدامات سازه‌ای برای وزارتخانه‌ها و دستگاه‌های اجرایی مختلف فراهم می‌شود. این مهم می‌تواند نقش مؤثری در اجرای مدیریت پایدارتر و با عوارض زیست محیطی کم‌تر داشته باشد.

بطورکلی نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد هر یک از رخساره‌ها (تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای) در محدوده مطالعاتی دارای الگوی نقطه‌ای مکانی مشخصی هستند که می‌تواند تحت تأثیر عوامل کنترل‌کننده محیطی تغییر کند. ارتباط متقابل (مثبت، خنثی، تصادفی) بین هر جفت از رخساره‌ها (تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای) در محدوده مطالعاتی نیز نشان داد این رخساره‌های فرسایشی در حال گسترش و تبدیل به یکدیگر هستند. با توجه به نتایج می‌توان اذعان داشت که وجود استعداد تبدیل مساحت بسیار زیادی از اراضی استان گلستان به فرسایش خاک نگران‌کننده و نیازمند برنامه‌ریزی جامع‌تر برای

1. Natural Hazard
2. Natural Disaster

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

کاهش زیان‌های ناشی از این پدیده طبیعی- انسانی است.

علاوه بر آن، استفاده از فناوری سنجش از دور پهپاد برای پایش زمانی-مکانی رخساره‌های فرسایشی شایع تاکنون در تحقیقات ملی به‌ندرت انجام شده‌است. پیشنهاد می‌شود واقعیت رفتارهای رخساره‌های فرسایشی و تلفات خاک براساس داده‌های دقیق بیش‌تر مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا شناسایی رفتار زمانی- مکانی رخساره‌ها در مدیریت اراضی و کاهش خسارات (ریسک محور) بسیار حائز اهمیت است. بنابراین با توجه به این نکته که پیش‌بینی و کاهش سرعت خطرات طبیعی از نوع مدیریت منطقه تبعیت می‌کند، تحقیقات آتی نیازمند رویکرد همه‌جانبه با درنظرگیری پایداری بوم سازگان است. در نهایت، هم‌چنان بر اصل پیچیدگی مکانیسم فرسایش‌های تونلی، آبکندی و حرکات توده‌ای با توجه به ماهیت پیچیده سیستم‌های ژئومورفیک و عوامل مؤثر با منشاء متفاوت تأکید می‌شود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF)، طرح مصوب شماره ۹۹۰۱۱۹۹۱ به انجام رسیده است که بدین وسیله خود را قدردان یاری بی‌دریغشان می‌دانیم.

منابع

1. Amanzadeh, B. Sagheb-Talebi, K. Foumani, B. S. Fadaie, F. Camarero, J. and Linares, C. 2013. Spatial distribution and volume of dead wood in unmanaged Caspian Beech (Fagus orientalis) forests from Northern Iran. Forests. 4(1): 751-765.

2. Bernatek-Jakiel, A. Kacprzak, A. and Stolarczyk, M. 2016. Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts. Eastern Carpathians). Catena 141(1): 117-129.

3. Bernatek-Jakiel, A. and Wrońska-Wałach, D. 2018. Impact of piping on gully development in mid-altitude mountains under a temperate climate: A dendrogeomorphological approach. Catena. 165: 320-332.

4. Burns, S. L. Goya, J. F. Arturi, M. F. Yapura, P. F. and Perez, C. A. 2013. Stand dynamics, spatial pattern and site quality in Austrocedrus chilensis forests in Patagonia, Argentina. Forest Systems. 22(1): 170-178.

5. Churchill, D. Larson, A. Dahlgreen, M. Franklin, J. Hessburg, P. and Luts, J. 2013. Restoring forest resilience: from reference spatial patterns to silvicultural prescriptions and monitoring. Forest Ecology and Management 291(2): 442-457.

6. Cipriotti, P. A. Aguiar, M. R. Wiegand, T. and Paruelo, J. M. 2014. A complex network of interactions controls coexistence and relative abundances in Patagonian grass-shrub steppes. Journal of Ecology, 102(1): 776–788.

7. Dale, M. R. T. and Powell, R. D. 2001 A new method for characterizing point patterns in plant ecology. Journal Vegetation Science, 12: 597-608.

8. Diggle, P. 2003. Statistical analysis of spatial point patterns. Oxford University Press Inc. New York, 8.

9. Doucet, A. De Freitas, N. and Gordon, N. 2001. An introduction to sequential Monte Carlo methods. In Sequential Monte Carlo methods in practice (pp. 3-14). Springer, New York, NY.

10. Erfanifard, Y. and Mahdian, F. 2012. Comparative investigation on the methods of true spatial pattern analysis of trees in forests, Case study: Wild Pistachio Research Forest, Fars Province, Iran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research. 20(1): 62-73.

11. Faiznia, S. Heshmati, M. Ahmadi, H. and Qudusi, c. 2007. Study of gully erosion of Marni Aghajari Formation in Qasr Shirin area. Journal of Research and Construction in Natural Resources. 74: 32-40. (In Persion)

12. Farifteh, J. and Soeters, R. 1999. Factors underlying piping in the Basilicata region, southern Italy. Geomorphology. 26: 239–251.

13. Faulkner, H. 2013 Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. Catena. 106: 42-53.

14. Garcia, P. M. Xanat. A. N. Josealbert. C. M. and Martin alfonso, M. B. 2011. Spatial patterns of soil degradation in Mexico. African Journal of Agricultural Research. 5(1): 1109-1113.

15. Gatrell, A. C. Bailey, T. C. Diggle, P. J. and Rowlingson, B. S. 1996. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. Transactions of the Institute of British Geographers, 21(1): 256-274.

16. Genet, A. Grabarnik, P. Sekretenko, O. and Pothier, D. 2014. Incorporating the mechanisms underlying inter-tree competition into a random point process model to improve spatial tree pattern analysis in forestry. Ecological Modelling. 288: 143-154.

17. Getzin, S. Wiegand, K. Schumacher, J. and Gougeon, F. A. 2008. Scale-dependent competition at the stand level assessed from crown areas. Forest Ecology and Management. 255: 2478-2485.

18. Getzin, S. Worbes, M. Wiegand, T. and Wiegand, K. 2011. Size dominance regulates tree spacing more than competition within height classes in tropical Cameroon. Journal of Tropical Ecology. 27: 93102.

19. Hosseinalizadeh, M. Kariminejad, N. Campetella, G. Jalalifard, A. and Alinejad, M. 2018a Spatial point pattern analysis

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

of piping erosion in loess-derived soils in Golestan Province, Iran. Geoderma. 328: 20-29.

20. Hosseinalizadeh, M. Kariminejad, N. and Alinejad, M. 2018b. An application of different summary statistics for modelling piping collapses and gully headcuts to evaluate their geomorphological interactions in Golestan Province, Iran. Catena. 171: 613–621.

21. Illian, J. Penttinen, A. Stoyan, H. Stoyan, D. 2008 Statistical analysis and modeling of spatial point patterns. John Wiley & Sons Inc. 534 p.

22. Jafari Shalamzari, M. Zhang, W. 2018. Assessing water scarcity using the Water Poverty Index (WPI) in Golestan province of Iran. Water 10: 1–22.

23. Kariminejad, N. Hosseinalizadeh, M. Pourghasemi, H.R. and Tiefenbacher, J.P. 2021. Change detection in piping, gully head forms, and mechanisms. CATENA, 206, p.105550.

24. Kariminejad, N. Hosseinalizadeh, M. Pourghasemi, H.R. 2019. A review of spatial monitoring of piping erosion using UAVs in loess driven soils of Golestan province. Journal of Watershed Management Research. 34(3): 19-39. (In Persion)

25. Khormali, F. Ghergherechi, S. Kehl, M. and Ayoubi, S. 2012. Soil formation in loess-derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. Geoderma. 179: 113-122.

26. Kukemilks, K. and Saks, T. 2013. Landslides and gully slope erosion on the banks of the Gauja River between the towns of Sigulda and Ligatne. Estonian Journal of Earth Sciences, 62(4): 231-245.

27. Lan, G. Zhu, H. Cao, M. Hu, Y. Wang, H. Deng, X. Zhou, S. Cui, J. Huang, J. He, Y. Liu, L. Xu, H. and Song, J. 2009. Spatial dispersion patterns of trees in a tropical rainforest in Xishuangbanna, southwest China. Journal of Ecological Research. 24: 1117–1124.

28. Law, R. Illian, J. Burslem, D.F.R.P. Gratzer, G. Gunatilleke, C.V.S. and Gunatilleke, I.A.U.N. 2009. Ecological information from spatial patterns of plants: insights from point process theory (ESSAY REVIEW). Journal of Ecology. 97: 616-628.

29. Lochmann, K. Anikeenko, A. Elsner, A. Medvedev, N. and Stoyan D. 2006. Statistical verification of crystallization in hard sphere packings under densification. The European Physical Journal. 53: 67–76.

30. Lombardo, L. Tanyas, H. and Nicu, I.C., 2020. Spatial modeling of multi-hazard threat to cultural heritage sites. Engineering Geology. 277, p.105776.

31. Lucà, F. Conforti, M. and Robustelli, G. 2011. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. Geomorphology, 134(3-4): 297-308.

32. Ludwing, J. A. and Reynolds, J. F. 1988. Statistical ecology. A primer on methods and computing John Wiley and Sons, New York, 201p.

33. Maleki, S. Khormali, F. Bodaghabadi, M. B. Mohammadi, J. Hoffmeister, D. and Kehl, M. 2018. Role of geomorphic surface on the above-ground biomass and soil organic carbon storage in a semi-arid region of Iranian loess plateau. Quaternary International.

34. Martinez, W. L. and Martinez, A. R. 2002. Computational statistics handbook with MATLAB. Chapman & Hall. Forest Science. 39(4): 756-775.

35. Mundo, I. A. Wiegand, T. Kanagaraj, R. and Kitzberger, T. 2013. Environmental drivers and spatial dependency in wildfire ignition patterns of northwestern Patagonia. Journal of Environmental Management. 123: 77-87.

36. Muvengwi, J. Mbiba, M. Chikumbindi, J. Ndagurwa, H.G. and Mureva, A. 2018. Population structure and spatial point-pattern analysis of a mono stand of Acacia polyacantha along a catena in a savanna ecosystem. Forest Ecology and Management. 409: 499-508.

37. Pommerening, A. and Stoyan, D. 2008 Edgecorrection needs in estimating indices of spatial forest structure. Canadian Journal of Forest Research. 36: 1723-1739.

38. https://www-sciencedirect-com.libezproxy.iyte.edu.tr/science/article/pii/S0013795220307894.

39. Pourghasemi, H.R. Kariminejad, N. Amiri, M. edalat, M. Zarafshar, M. Blaschke, T. and Cerda, M. 2019. Assessing and mapping multihazard risk susceptibility using a machine learning technique. Scientific Reports.

40. Rieke-Zapp, D. H. and Nichols, M. H. 2011 Headcut Retreat in a Semiarid Watershed in the Southwestern United States since 1935. Catena. 87(1): 1–10.

41. Sher, A. A. Wiegand, K. and Ward, D. 2010. Do Acacia and Tamarix trees compete for water in the Negev desert? Journal of Arid Environments. 74: 338–343.

42. Wiegand, T. and Moloney, K.A. 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. Oikos. 104: 209–229. doi:10.1111/j.0030-1299.2004.12497.x

43. Wiegand, T. He, F. and Hubbell, S. P. 2013. A systematic comparison of summary characteristics for quantifying point patterns in ecology. Ecography (Cop.). 36: 92–103. doi:10.1111/j.1600-0587.2012.07361.x

44. Wilson, G. V. Wells, R. R. Kuhnle, R. A. Fox, G. A. and Nieber, J. 2017. Sediment detachment and transport processes

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

associated with internal erosion of soil pipes. Earth Surface Processes and Landforms. 43: 45–63. doi: 10.1002/esp.4147

45. Wong, D. W. S. Lee, J. 2005. Statistical analysis of geographic information with Arcview GIS and ArcGIS. New York: Wiley.

46. Yuan, Z. Wei, B. Chen, Y. Jia, H. Wei, Q. and Ye, Y. 2018. How do similarities in spatial distributions and interspecific associations affect the coexistence of Quercus species in the Baotianman National Nature Reserve, Henan, China. Ecology and evolution. 8(5): 2580-2593.

47. Bernatek, A. 2015. The influence of piping on mid-mountain relief: a case study from the Polish Bieszczady Mts.(Eastern Carpathians). Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 10(1): 107-120.

48. Zhu, T.X. 2012. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. Geomorphology. 153: 144-155.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 17, No. 61, Summer 2023
سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢

A Study of Spatial Point Pattern of Piping Erosion, Gully Erosion and Mass Movement Using Unmanned Aerial Vehicles

N. Kariminejad[1], H.R. Pourghasemi[2] and M. Hosseinalizadeh[3]

Received: 11-07-2021 Accepted: 04-16-2022

Abstract

Piping erosion, gully erosion, and mass movement have complexity that the best way to comprehensively identify them is to use new statistical tools. The purpose of this study is spatial analysis of soil landforms based on spatial statistics and field studies. In this research, a digital elevation model was prepared. Then, the spatial pattern and interaction of the three soil landforms were investigated and the spatial effect of slope degree was analyzed on the spatial distributions of them. The results showed the pair correlation function (g(r)) was clustered for both piping erosion and gully erosion. However, it was dispersed for mass movements up to spatial distance of 140 m. The bivariate statistic (g12(r)) showed there is a significantly positive correlation between gully erosion and piping erosion. The correlation between mass movements with each of gullies and piping erosions were positive at the near distances.

Keywords: Summary statistics, UAV, Mass movements, Gully ersion, Piping erosion, Loess deposits

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.1.5]

1. Postdoc, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.