



Analyzing the role of geometric characteristics of active and inactive surfaces of alluvial fans in the evolution of the gully erosion pattern(case study: the southern slopes of Aladag)

Amin Barabarian¹, Neda Mohseni²

1. Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: amin.barabarian@gmail.com

2. (Corresponding Author)Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: nedamohseni@um.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

1 May 2025

Received in revised form:

27 June 2025

Accepted:

1 September 2025

pp.105-127

Keywords:

Alluvial fan,
Gully pattern,
Length-width ratio,
Geometry,
Surface roughness.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the underlying mechanisms and driving factors that govern gully erosion dynamics across different alluvial fan surfaces. The geometric characteristics of 60 alluvial fans were quantified. After evaluating the specific gully networks characterizing each fan, we established the linkages among fan evolution, their geometry, and the resulting gully erosion. Gully formation on active surfaces occurred at a rate 2.5 times greater than on their inactive counterparts. Such a pronounced discrepancy likely stems from the heightened exposure of active environments to episodic flooding, combined with their comparatively restricted spatial extent. On these active segments, a statistically significant increase in mean gully length highlights elevated stream energy and the relentless nature of ongoing erosional processes. Conversely, inactive surfaces exhibited a substantial expansion in mean gully width. Over time, bank degradation, lateral erosion, and partial sedimentary infilling drive this localized widening. Consistent with these morphological shifts, the gully length-to-width ratio remained substantially higher across active fans. Isolated from active flooding regimes, the heavily weathered deposits typical of inactive surfaces foster the pedogenesis of finer-grained, mature soils. These conditions pave the way for both the lateral and vertical expansion of the gullies. As alluvial fans progress through successive evolutionary stages, the accompanying geometric transformations fundamentally shift the relative influence of topographic variables on gully development across different fan generations.

Cite this article: barabarian,A., mohseni,N. (2025). Analyzing the role of geometric characteristics of active and inactive surfaces of alluvial fans in the evolution of the gully erosion pattern(case study: the southern slopes of Aladag). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3). 105-127.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.528739.1563](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.528739.1563)

Extended Abstract

Introduction

Alluvial fans are landforms in many arid and semi-arid regions. Age differences of alluvial fans are due to tectonic and climatic processes. Tectonic, climate, channel incision, and avulsion can abruptly change the surface of an alluvial fan and, subsequently lead to the formation of a new fan. With time, alluvial fans exhibit significant differences in terms of weathering, the rate of headward erosion, the drainage pattern, and flooding and depositional processes. At first, young or active fans with distributary drainage pattern develop at the mountain front. If a faulted structure develops, its continuous propagation toward the river stimulates its deflection. The deflection of river and its migration can stimulate the abandonment of the oldest fan and the formation of a new fan along the deflected river. As a result, this oldest fan become flood-free, enabling headward erosion along gullies or tributary channels. Long-term exposure to physiochemical weathering can lead to the degradation of old surfaces.

Detachment and transportation of soil particles by overland flow are the most important causes of land degradation in water erosion-prone environments. Soil degradation induced by gully erosion represents a worldwide problem in the many arid and semi-arid countries, such as Iran. Soil degradation induced by water erosion is the most critical challenge faced by many of the world's dryland regions. Iran is recognized as the second in the world in terms of soil erosion where approximately 2.5 billion tons of fertile lands are lost per year. Gully erosion can stimulate multiple environmental hazards, such as desertification, increasing sediment load in rivers and reservoirs, flood, and soil productivity loss. This study assessed: (1) the relationship between the evolution of alluvial fan surfaces and their geometric variability; (2) the relationship between the geometric evolution of different surfaces and changes in the gully erosion pattern.

Methodology

The present study was implemented on

southern slopes of the Aladag Mountains. The maximum and minimum altitude is 297 and 885 meters above sea level. Based on the Demarton climate index, the climate of the study area is classified as semi-arid. The climatic characteristics of the region include an average annual precipitation of 249.6 mm and an average annual temperature of 13.11 degrees Celsius. Drainage pattern, surface roughness and morphology were recorded to distinguish active fan surfaces from inactive fan surfaces. In this study, the ALOS DSM global digital surface model (DSM) from AW3D30 was used to extract geometric indices. This dataset is a digital surface model (DSM) with global coverage and a horizontal resolution of about 30 meters, which is developed based on 3D topographic data of the world with higher resolution (5 meters). In order to calculate the vegetation indices, data from the MSI sensor of the Sentinel-2 satellite at the L2A processing level were used. The L2A surface data, after applying atmospheric corrections, provide the reflectance of the land surface, and its synchronized dataset adjusts for radiometric changes resulting from processing line updates and ensures the temporal consistency of the data for time series analyses. Also, to extract the land use and land cover map, the World Cover product was used. This product is a global land cover map for the year 2021 with a spatial resolution of 10 meters, which is produced based on data from the Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites.

In this study, 11 geometric indices were used to investigate the characteristics of active and inactive alluvial fans. In order to quantitatively assess and analyze the characteristics of gully erosion, data from the Multispectral Imager (MSI) of the Sentinel-2 satellite were used. In order to accurately identify and separate pixels related to gully from other land uses and surface phenomena, a supervised machine learning method with the Support Vector Machine (SVM) algorithm was used. In the next step, the distribution of gully and key indices related to their dimensions and dispersion were calculated. These indicators include the percentage of gully (ratio of

gully area to total area), gully density (total length of gully per unit area or number of gully per unit area), average gully length, average gully width, and gully length to width ratio, which were extracted directly from the gully map resulting from SVM classification and Sentinel-2 data.

Results and discussion

According to the statistical results, gully formation was 2.5 times higher in active surfaces than in inactive surfaces. These differences could be due to the exposure of active surfaces to recent flooding processes and their smaller area compared to inactive surfaces. The significant increase in the average gully length in active surfaces indicates higher flow energy and continued erosion processes. The significant increase in the average gully width in inactive surfaces is due to the processes of gully wall destruction, lateral erosion, and relative filling over time. Length-width ratio was significantly higher in active alluvial fans than in inactive surfaces. The greater dispersion of runoff and the distribution of coarser and more permeable sediments facilitate the conditions for the longitudinal expansion of gully on active surfaces. On the contrary, the presence of highly weathered sediments and the time that has elapsed since the last flooding in inactive surfaces stimulated the lateral development of gully. A positive correlation between gully width and flow strength indicates the dominance of lateral erosion and gullies in the inactive surfaces compared to active alluvial fans. In active surfaces, the initial energy of the flow, the development of the drainage network, and the elevation conditions are the most important factors affecting the gully erosion pattern. In inactive alluvial fans, an increase in the topographic moisture index, an increase in surface roughness, and the stabilized state of the surfaces are more important in the gully erosion pattern. This comparative analysis shows that although some topographic factors in both alluvial fan generations affect the development of the gully, the evolutionary stages of the alluvial fan, by affecting their geometry, could lead to differences in the relative

importance of geometric factors and their role in the gully erosion pattern.

Conclusion

In this study, the geometric characteristics of different alluvial fan surfaces were first evaluated. Then, the morphometric characteristics of the alluvial fans were measured and quantified to determine the pattern of gully erosion in different generations of alluvial fans. Finally, the relationship between the evolution of alluvial fan surfaces, variability in their surface geometry, and the dynamic of gully erosion pattern was investigated. Based on the results, alluvial morphometric indices show significant differences between active and inactive alluvial fans. Active surfaces with higher drainage density, longer gullies, and higher length-to-width ratio indicate younger and more erosionally dynamic systems. In contrast, inactive surfaces with wider and deeper gullies can be an indication of the evolution of gully pattern in the absence of intense erosional activity. These findings emphasize the importance of gully-alluvial fan morphometric analysis as a tool for better understanding the evolutionary state of alluvial fans and its effects on soil erosion. Alteration of hydrological connectivity between alluvial fan and contributing catchment is recognized as a principle method to control gully erosion. Considering the main controlling factors, some solutions are suggested for gully erosion control. Reducing hydrological connectivity in contributing catchment and shifting hydrology pathway on alluvial fan, such as restoring vegetation and building check dam at the bottom of gullies in catchment. Further, constructing intercepting ditches and gutters around farmland and construction area can change the hydrological path. The cost of revegetation is relatively low, but the effect is limited in extreme rainfall. So, it should be used in combination with other methods.

Funding

This work was funded by Ferdowsi University of Mashhad (Grant Num: 3-64196).

Authors' Contribution

Amin Barabarian: Writing–original draft, Formal analysis; Neda Mohseni: Writing–original draft- review & editing, Investigation, Supervision, Visualization, Formal analysis.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

تحلیل نقش ژئومتری سطوح فعال و غیر فعال مخروط افکنه‌های دامنه‌های جنوبی آلاداغ در تحول الگوی فرسایش گالی

امین برابریان^۱، ندا محسنی^۲

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: nedamohseni@um.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: nedamohseni@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۰۸

صص. ۱۲۷-۱۰۵

واژگان کلیدی:

مخروط افکنه، الگوی فرسایش گالی، نسبت طول به عرض، ژئومتری، زبری سطح.

هدف اصلی پژوهش حاضر ارائه یک مدل مفهومی برای شناسایی فاکتورها و مکانیزم‌های موثر بر دینامیک فرسایش گالی در سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها می‌باشد. سطوح ۶۰ مخروط افکنه در دامنه‌های جنوبی آلاداغ تفکیک و ژئومتری هر یک اندازه‌گیری شد. الگوی گالی هر مخروط ارزیابی و ارتباط بین تحول مخروط افکنه‌ها، تغییرپذیری در ژئومتری سطوح و الگوی فرسایش گالی تعیین شد. گالی زایی در سطوح فعال ۲٫۵ برابر بیشتر از سطوح غیرفعال بوده است. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از در معرض قرارگیری سطوح فعال نسبت به فرایندهای سیلابی و مساحت کوچک‌تر آن‌ها در مقایسه با سطوح غیر فعال باشد. افزایش معنادر میانگین طول گالی در سطوح فعال بیانگر انرژی بیشتر جریان و تداوم فرایندهای فرسایشی می‌باشد. افزایش معنادر میانگین عرض گالی در سطوح غیرفعال ناشی از فرایندهای تخریب دیواره گالی، فرسایش جانبی و پرشدگی نسبی در طول زمان است. نسبت طول به عرض گالی به طور معناداری در مخروط افکنه‌های فعال بیشتر از سطوح غیرفعال بوده است. وجود رسوبات به شدت هوادیده و دور بودن از فرایندهای سیلابی در سطوح غیرفعال با ایجاد خاک‌های تکامل یافته‌تر و ریزدانه، زمینه توسعه عرضی و عمقی گالی‌ها را فراهم می‌آورند. در سطوح فعال، انرژی اولیه جریان، توسعه شبکه زهکشی و شرایط ارتفاعی مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در گالی زایی به نظر می‌رسند. در مخروط افکنه‌های غیرفعال، افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی، زبری سطحی و وضعیت تثبیت شده سطوح، اهمیت بیشتری در الگوی فرسایش گالی می‌یابند. مراحل تکاملی مخروط افکنه‌ها با تغییر ژئومتری آن‌ها، اهمیت نسبی عوامل توپوگرافیک مؤثر بر توسعه گالی را در نسل‌های مختلف مخروط افکنه علی‌رغم وجود برخی عوامل مشترک تغییر می‌دهد. احداث استخرها در بالادست برای جمع‌آوری رواناب، کاهش اتصال هیدرولوژیک و روش‌های بیولوژیک می‌توانند تمهیداتی برای کنترل فرسایش گالی در این سطوح باشند.

استناد: برابریان، امین، محسنی، ندا. (۱۴۰۴). تحلیل نقش ژئومتری سطوح فعال و غیرفعال مخروط افکنه‌های دامنه‌های جنوبی آلاداغ در تحول الگوی فرسایش گالی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۳)، ۱۲۷-۱۰۵.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.528739.1563

مقدمه

مخروط افکنه‌ها لندفرم‌های ژئومورفیک غالب در طیف گسترده‌ای از مناطق اقلیمی هستند که محصول حمل و جابجایی رسوبات هوادیده توسط سیلاب‌ها و رواناب‌های حوضه آبریز به سمت پایکوه‌ها و مناطق دشت سر می‌باشند. این سطوح از مهم‌ترین منابع در دسترس با شیب ملایم، خاک‌های عمیق تکامل یافته و منابع غنی آب‌های سطحی و زیرزمینی برای توسعه کشاورزی و سایر کاربری‌های انسانی محسوب می‌شوند (چن و همکاران^۱، ۲۰۲۲). با این وجود، شرایط توپوگرافی و ژئومورفولوژیک حاکم بر مخروط افکنه‌ها، این لندفرم‌ها را به شدت مستعد وقوع فرسایش خاک بخصوص فرسایش گالی کرده است، بطوریکه این شرایط نقش موثری در تشدید تلفات منابع آب و خاک و متعاقباً کاهش کیفیت خاک، عملکرد محصول و رشد پوشش گیاهی بر روی سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها دارد (فرانکل و همکاران^۲، ۲۰۱۶؛ ایکسو و همکاران^۳، ۲۰۱۶). وقوع فرسایش در حوضه آبریز و متعاقباً انتقال و نهشته گذاری رسوبات روی سطوح مخروط افکنه‌ها، پتانسیل وقوع فرسایش گالی روی این لندفرم‌ها را تشدید می‌کند. فرسایش گالی به عنوان یکی از شایع‌ترین فرم‌های فرسایش خاک از مهمترین ابعاد تخریب زمین محسوب می‌شود (بوریل و همکاران^۴، ۲۰۱۷؛ کاستیلو و گومز^۵، ۲۰۱۶). توسعه گالی‌ها منجر به افزایش اتصال هیدرولوژیک در حوضه آبریز، کوتاه شدن زمان تمرکز، افزایش پیک رواناب و بنابراین افزایش ریسک سایر مخاطرات مانند سیلاب و تشدید فرایندهای رسوبگذاری می‌گردد (کاستا و بچلار^۶، ۲۰۰۷؛ پوئنسن^۷، ۲۰۱۸؛ کانگ و همکاران^۸، ۲۰۲۱الف). جریان‌ات سطحی مهم‌ترین عامل شکل‌گیری و توسعه فرسایش گالی محسوب می‌شوند، زمانی که تنش برشی جریان‌ات سطحی بیشتر از مقاومت برشی خاک باشد، خاک شروع به کنده شدن از بستر کرده و بنابراین آغاز شکل‌گیری گالی فراهم می‌شود (اندرسون و همکاران^۹، ۲۰۲۱؛ چاپلوت^{۱۰}، ۲۰۱۳). ژانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای نشان دادند اتصال هیدرولوژیکی حوضه آبریز به شدت کنترل‌کننده فرسایش گالی می‌باشد. مطالعه آن‌ها نشان داد میزان بارندگی در حوضه زهکشی بالادست مناطق گالی می‌تواند منجر به تامین آب و انرژی پتانسیل موردنیاز برای تولید رواناب شده و نرخ کنده شدگی خاک از بستر بطور معناداری با افزایش سرعت رواناب افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر، یوآن و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۰) همبستگی مثبت معنادار بین وقوع بارش و توسعه گالی‌ها در مناطق دامنه‌ای را گزارش داده‌اند. پوشش گیاهی با افزایش نفوذ جریان‌ات سطحی، انرژی کینتیک جریان را کاهش داده و متعاقباً با کاهش ظرفیت حمل رسوبات توسعه فرسایش گالی را فراهم می‌آورند (مو و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۹). چن و چایی (۲۰۰۶) به بررسی اثرات احیا پوشش گیاهی بر کاهش نرخ فرسایش ناشی از عملکرد رسوب توسط گالی‌ها تا بیش از ۷۵٪ در حوضه‌های کوچک فلات‌های لسی پرداخته‌اند. بیشتر، فعالیت‌های آنتروپوژنیک منجر به تشدید فرسایش گالی به دنبال تخریب پوشش گیاهی و تغییرات کاربری می‌گردد (پوئنسن^{۱۴}، ۲۰۱۸). چاپلوت و همکاران (۲۰۰۵) وجود

¹ Chen et al

² Frankl et al

³ Xu et al

⁴ Borrelli et al

⁵ Castillo & Gómez

⁶ Costa & Bacellar

⁷ Poesen

⁸ Kang et al

⁹ Anderson et al

¹⁰ Chaplot et al

¹¹ Zhang et al

¹² Yuan et al

¹³ Mu et al

یک ارتباط مثبت معنادار بین نسبت عملکرد محصول در حوضه آبریز و نرخ فرسایش گالی در مناطق دامنه‌ای را در لائوس شمالی نشان داده‌اند. همچنانکه سایر مطالعات بررسی کرده‌اند، فاکتورهای توپوگرافی با کنترل جریانات تجمیع یافته در حوضه آبریز می‌توانند پتانسیل وقوع فرسایش گالی را افزایش دهند (یوسن و همکاران، ۲۰۰۳؛ والی پور و همکاران، ۲۰۲۲). همچنانکه چاپلوت (۲۰۱۳) گزارش کرده است، توسعه گالی نه فقط متأثر از جریانات سطحی می‌باشد بلکه فرایندهای پایپینگ نیز منجر به گسترش این نوع از فرسایش می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر نایسن و همکاران (۲۰۰۲) به دلایل توسعه گالی روی دامنه‌های کم شیب‌تر اشاره کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد بازسازی جاده منجر به تشدید اتصال هیدرولوژیکی جریانات انتشار یافته از حوضه‌های بالادست شده و زمینه ساز توسعه گالی روی سطوح مخروط-افکنه‌ها می‌شود.

سطوح مخروط‌افکنه‌ها با سنین مختلف تفاوت‌های مشخصی از نظر نوع و عملکرد فرایندهای ژئومورفیک نشان می‌دهند (محسنی و همکاران، ۱۴۰۱). تفاوت در سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها ناشی از فرایندهای تکتونیک و تغییرات اقلیمی در طول زمان اتفاق می‌افتد. تکتونیک، اقلیم، بریدگی کانال به سرعت منجر به تغییر سطوح و متعاقباً عملکرد فرایندهای ژئومورفیک غالب می‌گردد. متأثر از این شرایط مخروط افکنه‌ها تفاوت‌های معناداری از لحاظ نرخ هوادیدگی، فرسایش قهقرایی، الگوی زهکشی، سیل گرفتگی و فرایندهای نهشته گذاری به نمایش می‌گذارند. در مراحل ابتدایی، مخروط افکنه‌های فعال یا سطوح جدیدتر با الگوی زهکشی توزیعی در جبهه کوهستان شکل می‌گیرند. گسترش ساختمان‌های گسلی به سمت رودخانه منجر به انحراف مسیر رودخانه شده و بنابراین این انحراف و جابجایی منجر به متروک ماندن سطح مخروط افکنه و به اصطلاح ظهور مخروط‌های غیرفعال و شکل‌گیری سطوح فعال جدید می‌شود (بهرامی و قهرمان، ۲۰۱۹). بطوریکه قرارگیری این سطوح قدیمی‌تر بالاتر از مسیر آبراهه اصلی منجر به ایجاد شرایط پایدار، و عدم وقوع فرایندهای سیلابی و متعاقباً افزایش نرخ هوادیدگی می‌گردد. سطوح فعال کنونی در معرض فرایندهای سیلابی و رسوب‌گذاری بیشتری قرار داشته در حالی که سطوح قدیمی‌تر غیرفعال تقریباً به‌طور کامل از فرایند سیلاب حذف می‌شوند. سایر فرایندها مانند هوادیدگی و اثراتی مانند ورنی بیابان و نرخ تکامل خاک تفاوت‌های قابل‌توجهی بین مخروط‌های آبرفتی با سنین مختلف نشان می‌دهند (رگمی و راسموسن، ۲۰۱۸). افزایش فصلی سیلاب در مخروط‌های غیرفعال منجر به تشدید تشکیل و توسعه فرسایش گالی در مقایسه با سطوح فعال می‌گردد. بطوریکه توسعه چنین اشکالی مورفولوژی ناهموار و منقطع بر روی سطوح قدیمی‌تر در مقایسه با مخروط‌های فعال جدید ایجاد می‌کند. در نتیجه، در گذر زمان تحول سطوح مخروط افکنه‌ها با تغییر در خصوصیات ژئومتری آن‌ها منجر به تغییرات بارز در عملکرد فرایندهای ژئومورفیک از جمله الگوی فرسایش گالی خواهد شد.

در ایران پژوهش‌های متعددی با تمرکز بر مورفومتری مخروط افکنه‌ها انجام شده است. اکثر مطالعات در این زمینه به بررسی ارتباط بین مورفومتری مخروط افکنه با حوضه‌های آبریز و اثرات تکتونیک فعال و یا ارتباط این لندفرم‌ها با تغییرات اقلیم دیرینه پرداخته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۱؛ اوون و همکاران^۱، ۲۰۱۴). بطور مثال صالحی پور میلانی و بشکنی (۱۳۹۹)، تحلیل کمی از مورفولوژی و مورفومتری مخروط افکنه‌ها ارائه داده و به بررسی نقش مهم‌ترین عوامل موثر بر شکل‌گیری و تغییرات هندسی مخروط افکنه‌ها در جلگه ساحلی تالش پرداختند. بهرامی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی ارتباط بین پارامترهای مورفومتری مخروط افکنه‌ها شامل شیب توپوگرافی، طول، عرض، نسبت عرض به طول و زاویه جاروب با فعالیت‌های تکتونیک گسل دهشیر پرداختند. کارگریان و محسنی (۱۴۰۴) به بررسی نقش مورفومتری

¹ Owen et al

حوضه آبریز در تحول سطوح مخروط افکنه‌های فعال و غیرفعال پرداخته‌اند. اسماعیلی (۱۴۰۴) به بررسی مورفومتری مخروط افکنه‌های البرز شمالی و نقش عوامل موثر در شکل‌گیری و تغییرات آن‌ها پرداخته است. بهرامی (۱۳۹۳) در بررسی حجم مخروط افکنه دنه خشک و فعالیت‌های تکتونیکی در طاق‌دیس این منطقه به این نتیجه دست‌یافت که بین شیب مخروط افکنه و ساختار لایه‌ها رابطه مستقیمی وجود دارد. گورابی و کریمی (۱۳۹۱) به بررسی تأثیر گسل فعال مروست یزد بر تحول مخروط افکنه‌ها پرداختند و مشاهده کردند که تکتونیک نسبت به اقلیم اثرات بیشتری بر مورفولوژی مخروط‌ها داشته است. گورابی و یمانی (۱۳۹۱) با انتخاب ۳۰ حوضه زهکشی و مخروط افکنه‌های مرتبط در ایران مرکزی به بررسی ارتباط بیت ویژگی‌های مورفولوژیکی حوضه و مخروط‌افکنه‌ها پرداختند. علیرغم مطالعات متعدد انجام شده در این زمینه، تاکنون پژوهشی در خصوص ارتباط بین تغییرات ژئومتری مخروط افکنه‌ها با تحولات الگوی فرسایش گالی روی سطوح مختلف این لندفرم‌ها انجام نشده است.

فعالیت‌های انسانی، به ویژه کاربری اراضی و توسعه زیرساخت‌ها در تعامل با فرآیندهای طبیعی نقش فزاینده‌ای در تغییر مورفولوژی مخروط‌افکنه و الگوی فرسایش در مقیاس‌های زمانی طولانی مدت دارند. این امر نیاز حیاتی به پژوهش‌های یکپارچه ژئومورفولوژی و استراتژی‌های مدیریت انطباقی را برجسته می‌کند. دینامیک فرسایش گالی روی سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط زیستی از دیدگاه فرسایش خاک در ایران محسوب می‌شود، بنابراین بررسی ارتباط بین تحولات ژئومتری مخروط افکنه و دینامیک مورفومتری گالی‌ها همچنین بررسی ابعاد مختلف توسعه این نوع از فرسایش خاک و فاکتورهای کنترل‌کننده آن روی سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها نیازمند تأکید بیشتر در حوزه مدیریت اکوسیستم‌ها می‌باشد. با وجود اهمیت این دیدگاه، اندک مطالعاتی در جهان و ایران به بررسی ارتباط بین فرسایش گالی و تحول سطوح مخروط افکنه‌ها پرداخته‌اند. ما و همکاران (۲۰۱۸) نشان داده‌اند که گالی‌های شکل گرفته بر روی مخروط افکنه‌ها به مراتب بزرگتر از گالی‌های روی مناطق دامنه‌ای می‌باشند، بطوریکه گالی مخروط افکنه‌ها ۱٫۳ برابر عریض‌تر و ۲٫۷ برابر عمیق‌تر در مقایسه با گالی سطوح دامنه‌ای هستند. فولر و ماردن^۱ (۲۰۱۱) به فرایند پیچیده رسوبگذاری و فرسایش روی سطوح مخروط افکنه‌ها و نقش آن‌ها در تحول فرایندهای فرسایش خاک با تأکید بر فرسایش گالی اشاره کرده‌اند. در مقایسه با گالی‌های شکل گرفته در حوضه‌های آبریز کوچک روی پهنه‌های دامنه‌ای، فرسایش گالی روی سطوح مخروط افکنه به شدت متاثر از رواناب تجمیع یافته از کل حوضه آبریز است. در نتیجه فاکتورها و مکانیزم‌های کنترل‌کننده فرسایش گالی روی مخروط افکنه‌ها در مقایسه با دامنه‌ها به شدت پیچیده‌تر است. به منظور کنترل و کاهش ریسک فرسایش گالی بر روی سطوح مخروط افکنه‌ها، یکی از مهمترین مسیرها شناسایی و ارزیابی فاکتورها و مکانیزم‌های موثر بر شکل‌گیری و توسعه اشکال و فرایندهای گالی می‌باشد (ونمارک و همکاران^۲، ۲۰۲۱، ۵؛ نایسن و همکاران^۳، ۲۰۰۲، ۱۲۶۷). ظهور و توسعه گالی‌ها متاثر از فاکتورهای متعددی شامل نوع خاک، ساختار لیتولوژی، شرایط اقلیمی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های آنتروپوژنیک می‌باشد (شلیبرگ^۴، ۲۰۲۱؛ کانگ و همکاران^۵، ۲۰۲۱؛ ون و همکاران^۵، ۲۰۲۱). به غیر از فاکتورهای محیطی، مجموعه‌ای از ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه آبریز و خصوصیات مورفومتری مخروط افکنه‌ها به خصوص تحول سنی سطوح این لندفرم‌ها متاثر از تغییرات

¹ Fuller & Marden

² Vanmaercke et al

³ Nyssen et al

⁴ Shellberg

⁵ Wen et al

اقلیمی و تکتونیک پتانسیل وقوع فرسایش گالی را تحت الشعاع قرار می‌دهند (سان و همکاران^۱، ۲۰۱۳). شاخص‌های کمی و ویژگی‌های مورفومتری نظیر تراکم گالی، نرخ توزیع گالی، میزان برش، حجم گالی، طول، عرض و عمق گالی می‌توانند منعکس کننده پتانسیل و وسعت عملکرد فرسایش خاک در هر واحد از مساحت باشند (گوئو و همکاران^۲، ۲۰۱۹؛ یوان و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین اندازه‌گیری مورفولوژی گالی همچنین ارزیابی شدت، توزیع تراکم، و تحول زمانی آن یکی از مهم‌ترین اقدامات برای کمی‌سازی فرایندها و مکانیزم‌های شکل‌گیری و توسعه فرسایش گالی در راستای مدیریت چشم‌اندازهای مستعد به فرسایش خاک می‌باشد (استوکر و همکاران^۳، ۲۰۱۵؛ دسپراتس و همکاران^۴، ۲۰۱۳؛ گوسو و همکاران^۵، ۲۰۱۸)

با توجه به اهمیت کنترل فرسایش گالی و پتانسیل بالای مخروط‌افکنه‌ها به‌عنوان لندفرم‌های مستعد برای وقوع ابعاد مختلف فرسایش خاک، ارزیابی فاکتورها و فرایندهای کنترل‌کننده این نوع فرسایش بر روی سطوح مختلف مخروط‌افکنه‌ها و بررسی ارتباطات میان آن‌ها ضروری است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل مفهومی کمی برای شناسایی فاکتورها و مکانیزم‌های موثر بر دینامیک الگوی فرسایش گالی روی سطوح مختلف مخروط‌افکنه‌ها انجام شده است. این مدل، با تمرکز بر تحلیل ارتباط میان تحول سطوح مخروط‌افکنه‌ها و اثرات آن بر تغییرپذیری ژئومتری این لندفرم‌ها، و همچنین بررسی ارتباط میان تحول ژئومتری سطوح و تغییرات در الگوی فرسایش گالی، به‌دنبال روشن کردن نقش مراحل تکاملی لندفرم در شکل‌دهی به فرایندهای فرسایشی است. نوآوری کلیدی این پژوهش، ارائه یک تحلیل مقایسه‌ای جامع بین سطوح فعال و غیرفعال مخروط‌افکنه‌ها است که برای نخستین بار نشان می‌دهد چگونه مراحل تکاملی با تاثیر بر ژئومتری سطوح، منجر به تفاوت‌های معنادار در اهمیت نسبی عوامل ژئومتری و نقش آن‌ها در الگوی فرسایش گالی می‌شود؛ برای مثال، در سطوح فعال، عواملی همچون انرژی اولیه جریان و توسعه شبکه زهکشی غالب هستند، در حالی که در سطوح غیرفعال، شاخص رطوبت توپوگرافی و زبری سطحی اهمیت بیشتری می‌یابند. در این راستا، ابتدا سطوح سنی مختلف ۶۰ مخروط‌افکنه در دامنه‌های جنوبی آلاداغ تفکیک و ویژگی‌های ژئومتری هر یک اندازه‌گیری شد. سپس، ویژگی‌های مورفومتری گالی‌های شناسایی‌شده روی سطوح فعال و غیرفعال کمی‌سازی گردید. در نهایت، ارتباط میان تحول سنی مخروط‌افکنه‌ها، تغییرپذیری در ویژگی‌های ژئومورفومتری سطوح، و اثرات آن بر الگوی فرسایش گالی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه آلاداغ واقع در استان خراسان شمالی است (شکل ۱). این منطقه گستره‌ای به مساحت تقریبی ۳۸۴۶ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. از دیدگاه ویژگی‌های توپوگرافیکی، منطقه دارای تنوع ارتفاعی چشمگیری است؛ به‌گونه‌ای که کمینه ارتفاع در پست‌ترین نقاط برابر با ۸۸۵ متر از سطح دریا و بیشینه آن در مرتفع‌ترین بخش‌ها به ۲۹۷۵ متر می‌رسد. میانگین ارتفاع کل منطقه نیز حدود ۱۳۵۲ متر برآورد شده است. از منظر زمین‌شناسی، رشته‌کوه آلاداغ بخشی از کمر بند چین‌خورده آلپ-هیمالیا محسوب می‌شود و عمدتاً از سنگ‌های رسوبی دوران مزوزوئیک (مانند سنگ‌آهک‌ها و ماسه‌سنگ‌های کرتاسه) و پالئوزوئیک تشکیل شده است. این منطقه تحت تاثیر

¹ Sun et al

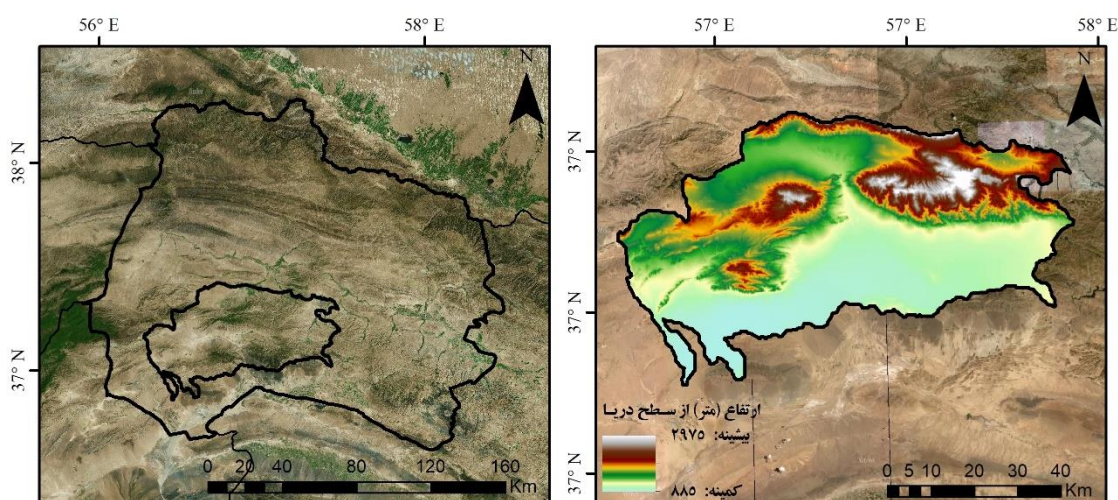
² Guo et al

³ Stöcker et al

⁴ Desprats et al

⁵ Golosov et al

فعالیت‌های تکتونیکی قرار دارد و گسل‌های فعالی مانند گسل آلاداغ در آن مشاهده می‌شود که نقش مهمی در شکل‌گیری ساختارهای زمین‌شناختی ایفا می‌کنند. همچنین، رسوبات کواترنری ناشی از فرسایش کوهستانی در دامنه‌ها انباشته شده و مخروط‌افکنه‌های گسترده‌ای را تشکیل داده‌اند. از دیدگاه ژئومورفولوژیکی، منطقه با اشکال متنوعی از جمله مخروط‌افکنه‌ها، دره‌های عمیق، سطوح پهنه‌ای و تپه‌ماهورهای فرسایشی مشخص می‌شود. فرآیندهای غالب ژئومورفولوژیکی شامل فرسایش آبی، هوازگی مکانیکی و شیمیایی و فعالیت‌های رودخانه‌ای است که منجر به تشکیل الگوهای زهکشی شعاعی و دندرتی شده‌اند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پویایی تکتونیکی و تأثیر عوامل اقلیمی بر شکل‌گیری لندفرم‌ها هستند. بر اساس شاخص اقلیمی دمارتن، اقلیم حاکم بر منطقه از نوع نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود. مشخصه‌های اقلیمی منطقه شامل میانگین بارش سالانه ۲۴۹/۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۳/۱۱ درجه سلسیوس است. تشخیص و تفکیک بخش‌های فعال و غیرفعال مخروط‌افکنه‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی انجام گرفت. برای شناسایی و تمایز سطوح، از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث استفاده شد. در مجموع، با به‌کارگیری شاخص‌هایی نظیر الگوی زهکشی، نرخ هوازگی، مورفولوژی و میزان تضاریس سطحی و همچنین درجه روشنایی رسوبات، سطوح فعال و غیرفعال تفکیک گردیدند (محسنی و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۱. موقعیت مورد مطالعه به همراه مدل رقومی ارتفاعی آن (متر)

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ارتفاعی و زمین‌شناسی

در این تحقیق، به منظور استخراج شاخص‌های ژئومتری و تحلیل‌های مرتبط با ارتفاع از سطح دریا، از مدل رقومی سطح جهانی ALOS DSM محصول AW3D30 استفاده شد. این مجموعه داده یک مدل رقومی سطح (DSM) با پوشش جهانی و تفکیک افقی حدود ۳۰ متر است که بر پایه داده‌های توپوگرافی سه‌بعدی جهان با قدرت تفکیک بالاتر (۵ متر) توسعه یافته است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش (محصول AW3D30)، شامل آخرین نسخه در دسترس (v4.1) است که در آوریل ۲۰۲۴ ارائه شده است. این مدل رقومی ارتفاعی به شکل مستمر از طریق به‌کارگیری داده‌های تکمیلی برای رفع نواحی فاقد اطلاعات و اصلاح ناهنجاری‌های پردازشی، بهبود یافته است. ویژگی‌های زمین‌شناختی و

ژئومورفولوژیکی منطقه با بهره‌گیری از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران و نقشه‌های ژئومورفولوژیکی تهیه‌شده بر پایه داده‌های میدانی تحلیل شد.

داده‌های ماهواره‌ای

به منظور محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی در این پژوهش، از داده‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ در سطح پردازشی L2A (بازتابندگی سطح) استفاده شد. ماهواره سنتینل-۲، یک مأموریت تصویربرداری چندطیفی با تفکیک‌پذیری بالا است که در چهارچوب برنامه کوپرنیکوس، داده‌های ارزشمندی برای پایش پوشش گیاهی، خاک، منابع آب و مناطق ساحلی فراهم می‌کند. داده‌های سطح L2A این سنجنده، پس از اعمال تصحیحات جوی، بازتابندگی سطح زمین را ارائه می‌دهند و مجموعه داده هماهنگ‌شده آن، تغییرات رادیومتریکی ناشی از به‌روزرسانی‌های خطوط پردازشی را تعدیل نموده و سازگاری زمانی داده‌ها را برای تحلیل‌های سری زمانی تضمین می‌کند. برای بررسی و ارزیابی تغییرات کاربری/پوشش زمین در دامنه‌های جنوبی آلاداغ، با تأکید بر مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال، مجموعه داده‌های Dynamic World استفاده شد. این محصول که از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ آژانس فضایی اروپا تولید می‌شود، با تفکیک افقی ۱۰ متر، امکان تحلیل دقیقی از الگوهای کاربری زمین را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از تصاویر طبقه‌بندی‌شده این مجموعه داده، تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۲۰۱۷ مورد تحلیل قرار گرفت. برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای، از پلتفرم Google Earth Engine استفاده گردید که امکان دسترسی به تصاویر چندزمانه Sentinel-2 را فراهم آورد. این ابزار برای استخراج شاخص‌هایی مانند درجه روشنایی رسوبات، الگوی زهکشی و نرخ هوازدگی به کار گرفته شد و پردازش‌های اولیه تصاویر، از جمله تصحیح هندسی و طبقه‌بندی طیفی، در این محیط انجام پذیرفت. همچنین، تصاویر گوگل ارث به عنوان منبع کمکی برای شناسایی بصری سطوح فعال و غیرفعال مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

روش تحقیق

استخراج ژئومتری مخروط افکنه‌ها

شاخص‌های ژئومتریکی ابزاری ضروری در ژئومورفولوژی برای کمی‌سازی ویژگی‌های فیزیکی زمین هستند. این شاخص‌ها، که از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) مشتق می‌شوند، اطلاعات زیادی را در مورد فرآیندهایی شکل‌دهنده سطح زمین، ارائه می‌دهند. در این تحقیق از ۱۱ شاخص ژئومتریکی برای بررسی ویژگی‌های مخروط افکنه‌های فعال و غیر فعال استفاده شده است که در ادامه توضیح مختصری از هر یک ارائه شده است. شاخص انحنا با اندازه‌گیری نرخ تغییر شیب، مناطق فرسایش و رسوب‌گذاری را شناسایی می‌کند. شاخص همگرایی، ضریب همگرایی جریان‌ها را ارزیابی می‌کند که بر دینامیک آب و رسوب تأثیر می‌گذارد. تراکم زهکشی، که طول جریان در واحد سطح است، کارایی زهکشی حوضه و پتانسیل فرسایش را منعکس می‌کند. ارتفاع از سطح دریا و ارتفاع نسبی داده‌های اساسی در مورد توپوگرافی و ناهمواری محلی ارائه می‌دهند. زبری سطح، مورفولوژی و تضاریس سطحی را کمی‌سازی کرده که بر فرآیندهای اکولوژیکی و هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد. شیب برای درک تأثیرات گرانشی بر خاک و آب ضروری است. شاخص قدرت جریان (SPI) ظرفیت فرسایشی جریان‌های آب را برآورد می‌کند، در حالی که شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) اشکال زمین را بر اساس ارتفاع نسبی طبقه‌بندی می‌کند. در نهایت شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) توزیع رطوبت خاک را پیش‌بینی کرده، و شاخص عمق دره مقدار برش ناهمواری‌های سطحی را اندازه‌گیری می‌کند. تحلیل‌های فضایی و

ترسیم نقشه‌های موضوعی، از جمله نقشه‌های توزیع مخروط‌افکنه‌ها و سطوح تضاریسی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفت. این نرم‌افزار برای محاسبه شاخص‌های مورفولوژیکی، مانند میزان تضاریس سطحی و الگوهای زهکشی، و همچنین ادغام لایه‌های اطلاعاتی مختلف به کار رفت.

استخراج شاخص‌های مرتبط با الگوی گالی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی کمی و تحلیل مشخصات فرسایش گالی در منطقه مورد مطالعه، از داده‌های سنجنده چندطیفی (MSI) ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. به منظور شناسایی و تفکیک دقیق پیکسل‌های مربوط به گالی از سایر کاربری‌ها و پدیده‌های سطحی، از روش یادگیری ماشین نظارت شده با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine - SVM) استفاده شد. در گام بعدی پراکنش گالی‌ها و شاخص‌های کلیدی مرتبط با ابعاد و پراکندگی آن‌ها محاسبه شد. این شاخص‌ها شامل درصد گالی (نسبت مساحت گالی‌ها به مساحت کل منطقه)، تراکم گالی (طول کل گالی‌ها در واحد سطح یا تعداد گالی در واحد سطح)، طول متوسط گالی، عرض متوسط گالی و نسبت طول به عرض گالی است که مستقیماً از روی نقشه گالی‌های حاصل از طبقه‌بندی SVM و داده‌های سنتینل-۲ استخراج شدند.

روش‌های آماری

به منظور ارزیابی وجود تفاوت‌های آماری معنادار در شاخص‌های ژئومتری و الگوی گالی بین مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه، از آزمون تی (t-test) استفاده شد. این آزمون برای مقایسه میانگین شاخص‌های ژئومتریک و همچنین شاخص‌های گالی بین دو گروه طبقه‌بندی شده (مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال) به کار گرفته شد. فرضیه صفر (H_0) در این تحقیق، عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین میانگین این شاخص‌ها در دو گروه مخروط‌افکنه بود، در حالی که فرضیه جایگزین (H_a) وجود چنین تفاوتی را مطرح می‌کرد. سطح معنی‌داری (α) برای تمامی آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

در مطالعات ژئومورفولوژی، به‌ویژه هنگام تفکیک کمی پدیده‌هایی نظیر مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال، اندازه اثر کوهن (Cohen's d) می‌تواند برای نشان دادن شدت تفاوت در متغیرهای مورفومتریک بین دو گروه (در این تحقیق مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال) مورد استفاده قرار گیرد. اندازه‌های اثر اغلب به عنوان کوچک، متوسط یا بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند. کوهن پیشنهاد کرده است که یک اثر با اندازه متوسط باید نمایانگر میانگین اندازه اثر مشاهده‌شده باشد و اثرهای کوچک و بزرگ نیز به طور متقارن و با فاصله یکسان از این اثر متوسط قرار گیرند. این آزمون نشان می‌دهد که تفاوت مشاهده‌شده بین میانگین‌های دو گروه چقدر بزرگ یا معنادار است و مستقل از حجم نمونه عمل می‌کند. در نتیجه برای مقایسه قدرت واقعی تفاوت‌ها نه فقط معنی‌داری آماری (مثل p-value) به کار می‌رود، بلکه از این روش آماری به منظور بررسی شاخص‌های گالی استفاده شده است. چرا که تفاوت بزرگی درصد گالی، تراکم گالی، طول گالی، عرض گالی و نسبت طول به عرض گالی در مخروط‌افکنه‌های فعال و غیر فعال دارای اهمیت زیادی است.

علاوه بر مقایسه میانگین‌ها بین گروه‌های مخروط‌افکنه، به منظور بررسی و درک بهتر روابط خطی بین شاخص‌های ژئومتریک مورد مطالعه، از تحلیل همبستگی استفاده شد. برای تحلیل جامع و نمایش ارتباطات دو به دو بین تمامی متغیرها، یک ماتریس همبستگی تهیه شد. در این تحلیل، ضریب همبستگی پیرسون (r) محاسبه شد که قدرت و جهت رابطه خطی بین هر جفت متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. متغیرهای وارد شده در این ماتریس شامل تمامی شاخص‌های

ژئومتریک مخروط‌ها و همچنین شاخص‌های مرتبط با فرسایش گالی هستند. استفاده از ماتریس همبستگی امکان شناسایی الگوهای ارتباطی و وابستگی‌های متقابل بالقوه بین شاخص‌های مختلف را فراهم می‌آورد. تمامی پردازش‌های آماری برای ارزیابی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی و تمایز سطوح فعال و غیرفعال با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R اجرا گردید. در این محیط، تحلیل‌های آماری مانند آزمون‌های همبستگی، مدل‌سازی رگرسیون و محاسبه میانگین‌ها و انحراف استاندارد انجام شد تا نتایج کمی و قابل اعتماد حاصل گردد.

نتایج و بحث

تحلیلی بر تغییرات ژئومتری سطوح فعال و غیرفعال مخروط افکنه‌ها

شاخص‌های ژئومتری ابزاری قدرتمند برای تحلیل کمی تفاوت سطوح مخروط‌افکنه‌ها و درک فرآیندهای فرسایش گالی در آن‌ها هستند. استفاده ترکیبی از این شاخص‌ها، به ویژه در مقایسه بین سطوح فعال و غیرفعال، می‌تواند به شناسایی مناطق مستعد تشکیل گالی، درک الگوی توسعه شبکه گالی، ارزیابی شدت فرسایش و در نهایت به مدیریت بهتر این فرایندها و مخاطرات مرتبط کمک نماید. تحلیل ژئومتری مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال دامنه‌های جنوبی آلاداغ نشان می‌دهد ضریب همگرایی، ارتفاع از سطح دریا، ارتفاع نسبی، شیب، شاخص توان جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، تغییرات کاربری تفاوت‌های آماری معناداری بین دو سطح مخروط افکنه‌ها داشته‌اند. این تفاوت‌ها می‌تواند به عوامل متعددی از جمله شرایط ژئومورفیک متفاوت و ویژگی‌های متمایز رسوبی در طول تکامل آن‌ها نسبت داده شود. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تحقیقات تکمیلی در زمینه درک عمیق‌تر تکامل و دینامیک مخروط‌افکنه‌ها در این منطقه و مناطق مشابه فراهم آورد.

همچنانکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین ضریب انحنا در مخروط‌افکنه‌های فعال به طور معناداری کمتر از سطوح غیرفعال بوده است. مقادیر مثبت ضریب انحناء نشان‌دهنده تحدب شیب (کاهش سرعت و واگرایی جریان) و مقادیر منفی نشان‌دهنده تقعر شیب (افزایش سرعت و همگرایی جریان) است. مقادیر منفی می‌تواند نشان‌دهنده پروفیل طولی مقعرتر یا پیچیدگی کمتر کانال اصلی سطوح فعال نسبت به غیرفعال‌ها باشد، که با فرآیندهای فرسایشی و رسوب‌گذاری جوان‌تر در ارتباط است. شاخص همگرایی جریان در سطوح فعال به طور معناداری پایین‌تر از مخروط‌افکنه‌های غیرفعال مشاهده شده است. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده مناطق واگرا یا تحدب بیشتر است. این یافته می‌تواند بیانگر تمایل بیشتر سطوح فعال به گسترش شعاعی و پراکندگی بیشتر رسوبات باشد. بنابراین مناطق با انحنای پروفیل مقعر (منفی)، به دلیل تمرکز و همگرایی جریانات سطحی، پتانسیل بالایی برای تجمع آب و افزایش تنش برشی داشته و بنابراین شرایط مناسبی برای شروع حفر گالی (Gully Head Initiation) محسوب می‌شوند. پسروری دیواره گالی (Headcut Retreat) اغلب در مناطقی با انحنای پروفیل مقعر اتفاق می‌افتد. مقادیر مثبت شاخص همگرایی نشان‌دهنده همگرایی شدید جریان (مانند خطوط تالوگ) و مقادیر منفی نشان‌دهنده واگرایی شدید جریان (مانند خط الراس) است. مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده شیب‌های مسطح یا یکنواخت است. این شاخص ارتباط نزدیکی با انحنای پروفیل دارد. شاخص همگرایی یکی از قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای مکان شروع گالی است. سرشاخه‌های گالی‌ها تقریباً همیشه در مناطقی با بیشترین همگرایی یافت می‌شوند. تداوم همگرایی جریان در بالادست گالی‌های موجود، باعث تغذیه آبی و رسوبی آن‌ها شده و به تعمیق و پسروری سرشاخه‌های آن‌ها کمک می‌کند. در مخروط‌افکنه‌های فعال، الگوهای همگرایی ممکن است پراکنده‌تر و تحت تأثیر میکروتوپوگرافی‌های ناشی از

رسوب‌گذاری‌های اخیر باشند. در سطوح غیرفعال و بریده‌شده، الگوهای همگرایی به وضوح مسیرهای زهکشی تثبیت‌شده و گالی‌های اصلی را دنبال می‌کنند و مقادیر بالای همگرایی در امتداد این مسیرها دیده می‌شود (جدول ۱).

میانگین ارتفاع سطوح فعال به طور معناداری کمتر از سطوح غیرفعال بوده که نشان دهنده قرارگیری مخروط‌افکنه‌های فعال در موقعیت‌های توپوگرافیک پایین‌تر در مقایسه با موقعیت سطوح غیرفعال است. کاهش معنادار ارتفاع نسبی سطوح فعال در مقایسه با سطوح قدیمی‌تر نشان می‌دهد که مخروط‌افکنه‌های فعال به دلیل عدم توسعه کامل عمودی یا به دلیل فرسایش بیشتر در بخش‌های بالایی خود، اختلاف ارتفاع کمتری بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه خود دارند. ارتفاع نسبی^۱ نشان‌دهنده وجود دره‌ها و گالی‌های عمیق و بریدگی شدید توپوگرافی است. مناطقی در مخروط‌افکنه که ارتفاع نسبی بالایی دارند، دارای شبکه گالی توسعه‌یافته‌ای هستند. این شاخص به طور غیرمستقیم عمق گالی‌ها را نسبت به فضای بین‌گالی‌ها^۲ نشان می‌دهد. مخروط‌افکنه‌های قدیمی که زمان بیشتری برای فرسایش داشته‌اند، به ویژه در بخش‌های میانی و پایینی، ارتفاع نسبی بیشتری نسبت به سطوح جدیدتر و کمتر بریده‌شده، نشان می‌دهند. از لحاظ تفاوت شیب، سطوح فعال به طور معناداری شیب بیشتری نسبت به مخروط‌افکنه‌های غیرفعال داشته که ارتباط مستقیمی با فعالیت‌های رسوب‌گذاری اخیر و پویایی بیشتر این سطوح دارد، در حالی که سطوح غیرفعال به دلیل فرسایش طولانی‌مدت و تثبیت، شیب ملایم‌تری را نشان داده‌اند. مقادیر پایین‌تر شاخص رطوبت توپوگرافی در سطوح فعال نشان‌دهنده زهکشی بهتر و پتانسیل تجمع آب کمتر است. از آنجا که سطوح فعال در مسیر آبراهه‌های اصلی و متعاقباً عملکرد مکرر فرایندهای سیلابی قرار دارند، بنابراین رسوبات جوان، درشت دانه، غیر هوادیده و تکامل نیافته زمینه را برای نفوذ بیشتر رواناب فراهم می‌آورند. این ویژگی به همراه افزایش میزان شیب، شرایط را برای زهکشی بهتر و تجمع کمتر رواناب فراهم آورده که متعاقباً منجر به کاهش رطوبت توپوگرافی می‌شود. میانگین عمق دره در سطوح فعال به طور معناداری بیشتر از سطوح غیرفعال بوده است. این تفاوت‌ها بیانگر قدرت فرسایشی بیشتر جریان‌ها و بریدگی عمیق‌تر کانال‌ها در سطح مخروط‌افکنه‌های فعال است. مخروط‌افکنه‌های قدیمی‌تر به دلیل تاریخچه فرسایشی طولانی‌تر و متعاقباً تکامل شبکه گالی‌های تثبیت‌شده، دارای مقادیر عمق دره به مراتب بیشتری در مقایسه با گالی‌های معمولاً کم‌عمق‌تر در مخروط‌افکنه‌های جدید هستند.

مخروط‌افکنه‌های غیرفعال به دلیل زمان بیشتر برای تکامل فرسایشی، معمولاً تراکم زهکشی بالاتری (شامل شبکه‌های گالی توسعه‌یافته‌تر) نسبت به سطوح جدیدتر نشان می‌دهند. مقایسه تراکم زهکشی بین این دو نوع مخروط‌افکنه می‌تواند شاخصی از مرحله تکاملی و میزان پایداری یا فعالیت فرسایشی آن‌ها باشد. در مخروط‌افکنه‌های قدیمی، الگوی زبری سطح با بریدگی‌های طولانی‌مدت و توسعه خاک مرتبط است. در حالی که مخروط‌افکنه‌های فعال، زبری، بیشتر ناشی از فعالیت‌های کانالی اخیر، لوب‌های رسوبی تازه یا مراحل اولیه حفر گالی می‌باشد. در سطوح غیرفعال، مقادیر بالای قدرت جریان بیشتر در امتداد خطوط زهکشی و گالی‌های تثبیت‌شده و عمیق متمرکز است. مقادیر مثبت شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) نشان‌دهنده موقعیت‌های برجسته و مقادیر منفی نشان‌دهنده موقعیت‌های پست و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده دامنه‌های یکنواخت یا مناطق مسطح است. گالی‌های عمیق‌تر در مخروط‌افکنه‌های غیرفعال مقادیر TPI منفی‌تری نسبت به گالی‌های کم‌عمق‌تر در سطوح جدید دارند. هرچند توسعه خاک در سطوح قدیمی‌تر ممکن است بر رابطه بین TWI (شاخص رطوبت توپوگرافی) و رطوبت واقعی تأثیر بگذارد، اما مناطقی با TWI بالا همچنان به عنوان

¹ Relative Relief

² Interfluves

نقاط بحرانی برای تجمع بالقوه آب و فعالیت‌های مرتبط با گالی در هر دو نوع سطح اهمیت دارند. در مخروط‌افکنه‌های غیرفعال در مقایسه با سطوح غیرفعال بدلیل وجود خاک‌های کمتر توسعه‌یافته، ارتباط بین TWI و اشباع سطحی می‌تواند مستقیم باشد.

جدول ۱. نتایج آماری آزمون t برای شاخص‌های ژئومتری مخروط افکنه‌های فعال و غیرفعال

شاخص ژئومتری	مخروط افکنه فعال	مخروط افکنه غیر فعال	آزمون t	P-value
ضریب انحنای (درجه/متر)	-۷۵/۸۴	-۴۳/۰۹	-۲/۴۴	۰/۰۲۶
مساحت (کیلومتر مربع)	۱۰/۸۴	۱۱/۷۵	-۰/۱۳	۰/۸۹
همگرایی	-۴۰/۲۳	-۳۵/۳۶	-۴/۴۸	۰/۰۱۳
تراکم زهشکی (متر/مترمربع)	۴۶۰/۹۰	۵۳۱/۷۰	-۰/۲۴	۰/۸۰
ارتفاع (متر)	۱۰۷۷/۰۱	۱۱۳۹/۲۱	-۲/۵۰	۰/۰۳
ارتفاع نسبی (متر)	۱۹۲/۰۱	۲۵۴/۲۳	-۲/۲۰	۰/۰۳۱
زبری سطح	۰/۵۸۱	۰/۵۹۱	-۰/۲۲	۰/۸۲
شیب (درجه)	۴/۰۹	۳/۷۰	-۰/۸۷	۰/۰۱۴
شاخص قدرت جریان (SPI)	-۰/۰۷۷	-۰/۰۸۱	۰/۳۵	۰/۷۲
شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)	-۰/۷۷	-۰/۶۹	-۰/۳۶	۰/۷۲
شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)	۱۴/۲۳	۱۶/۳۲	-۱/۹۸	۰/۰۲۳
عمق دره (متر)	۶/۶۷	۵/۲۳	-۱/۴۳	۰/۰۳۴

در مجموع نتایج این بخش نشان می‌دهد میانگین ارتفاع مخروط‌افکنه‌های غیرفعال (۱۱۳۹/۲۱ متر) بیشتر از مخروط‌افکنه‌های فعال (۱۰۷۷/۰۱ متر) است. ضریب تغییرات ارتفاع برای مخروط‌افکنه‌های غیرفعال (۱۰ درصد) کمتر از مخروط‌افکنه‌های فعال (۱۱/۳۵ درصد) بوده است. این امر می‌تواند بیانگر آن باشد که سطوح غیرفعال فرصت بیشتری برای انباشت رسوبات و توسعه عمودی در طول دوره‌های فعالیت پیشین خود داشته و یا در موقعیت‌های تکتونیکی و توپوگرافیک پایدارتری شکل گرفته‌اند که امکان تکامل بیشتر را فراهم نموده است. همگنی نسبی بیشتر در ارتفاع مخروط‌افکنه‌های غیرفعال نیز نشان‌دهنده رسیدن به یک حالت تعادل نسبی پس از توقف فرآیندهای عمده رسوب‌گذاری است. در ارتباط با متغیر شیب، سطوح فعال میانگین شیب بیشتری (۴/۰۹ درجه) را در مقایسه با مخروط‌افکنه‌های غیرفعال (۳/۷۰ درجه) نشان می‌دهند. سطوح فعال دارای ضریب تغییرات بالاتری برای شیب (۴۴/۰۴ درصد) در مقایسه با مخروط‌افکنه‌های غیرفعال (۳۸/۷۵ درصد) هستند. شیب در مخروط‌افکنه‌های فعال، بیشتر با فرآیندهای رسوب‌گذاری فعال و حمل مواد درشت‌دانه سازگار است. کاهش شیب در مخروط‌افکنه‌های غیرفعال می‌تواند نتیجه فرآیندهای فرسایشی طولانی‌مدت، تثبیت سطح و یا بازتوزیع رسوبات پس از توقف فرآیندهای فرسایشی باشد.

تغییرپذیری در الگوی فرسایش گالی در پاسخ به تحول سطوح مخروط افکنه‌ها

نتایج تحلیل آماری ارائه شده در جدول ۲، به مقایسه شاخص‌های مورفومتری گالی‌ها در مخروط‌افکنه‌های فعال و غیرفعال با استفاده از آزمون t برای نمونه‌های مستقل و اندازه اثر کوهن (Cohen's d) می‌پردازد. بر اساس جدول ۲ اگرچه درصد گالی که بیانگر نسبت سطح پوشیده شده توسط گالی‌ها به مساحت کل سطح مخروط‌افکنه است، در سطوح مختلف، تفاوت آماری معنی‌داری نشان نمی‌دهد اما بطور جالب توجهی سایر ویژگی‌های مرتبط با الگوی گالی تفاوت

معناداری را با سطح اثرگذاری بسیار برجسته (نتایج آزمون کوهن) در نسل‌های متفاوت مخروط افکنه‌ها نشان می‌دهد. عدم وجود تفاوت معنادار بین سطوح از لحاظ درصد پراکنش گالی نشان می‌دهد اگرچه فرآیندهای گالی‌زایی امکان وقوع در نسل‌های متفاوت مخروط افکنه‌ها را دارند اما مکانیزم‌های ایجاد، تکامل و الگوی فرسایش گالی متاثر از عملکرد متفاوت فرایندهای ژئومورفیک در سطوح مختلف، متفاوت است.

میانگین تراکم گالی در سطوح فعال با ۲۵ کیلومتر در هر کیلومتر مربع افزایش معناداری را در مقایسه با میزان تراکم گالی در سطوح غیر فعال (۱۰ کیلومتر در هر کیلومتر مربع) نشان داده است. بنابراین گالی‌زایی در سطوح فعال ۲٫۵ برابر بیشتر از سطوح غیرفعال می‌باشد. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از در معرض قرارگیری سطوح فعال نسبت به فرایندهای سیلابی در مقایسه با سطوح غیر فعال باشد. همچنین مساحت کمتر سطوح فعال (میان مساحت در مخروط افکنه‌های جدید حدود ۲ کیلومتر و در مخروط افکنه‌های قدیم حدود ۱۰ کیلومتر است)، میزان تراکم گالی در واحد سطح را افزایش می‌دهد. این تفاوت قابل توجه می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی همچون فرسایش بیشتر در دوره‌های اخیر و مساحت کوچک‌تر مخروط افکنه‌های جدید باشد. میانگین طول گالی در مخروط افکنه‌های فعال بطور معناداری بیشتر از سطوح غیرفعال و مقدار d کوهن نیز اندازه اثر بالایی را نشان می‌دهد. این امر می‌تواند بیانگر گسترش طولی بیشتر گالی‌ها در مخروط افکنه‌های فعال، به دلیل انرژی بیشتر جریان‌ها و تداوم فرآیندهای فرسایشی باشد. گالی‌ها در مخروط افکنه‌های غیرفعال به طور معناداری عریض‌تر از گالی‌های فعال بوده‌اند. عرض بیشتر گالی‌ها در سطوح غیرفعال می‌تواند ناشی از فرآیندهای تخریب دیواره گالی، فرسایش جانبی و پرتشدگی نسبی در طول زمان پس از کاهش یا توقف فعالیت اصلی مخروط افکنه باشد، در حالی که در سطوح فعال، فرسایش طولی و عمقی غالب‌تر بوده و گالی‌ها کم‌عرض‌تر باقی می‌مانند. مقادیر بالاتر شاخص نسبت طول به عرض گالی در مخروط افکنه‌های فعال تأییدی بر ماهیت خطی و فرسایش عمقی غالب در این گالی‌ها است، در حالی که نسبت‌های پایین‌تر در مخروط افکنه‌های غیرفعال می‌تواند نشان‌دهنده پهن‌شدگی و کاهش کشیدگی گالی‌ها به دلیل فرآیندهای ثانویه فرسایشی و رسوب‌گذاری باشد.

نسبت طول به عرض گالی عمدتاً منعکس‌کننده محیطی است که گالی در آن توسعه می‌یابد (فرانکل و همکاران، ۲۰۱۳). نسبت عمق به عرض بزرگتر از ۱ بدان معنا است که نرخ فرسایش کناری سریع‌تر از فرسایش رو به پائین (فرسایش عمقی) است (دنگ و همکاران^۱، ۲۰۱۵). مطالعات کانگ و همکاران (۲۰۲۱ الف) نشان داده است که ششستوی دیواره‌های گالی به مرور زمان منجر به فروپاشی و ریزش حاشیه‌ها و متعاقباً گسترش عرض گالی می‌شود. چاپلوت و همکاران (۲۰۱۳) تأیید داده‌اند گسترش جانبی گالی‌ها مهم‌ترین فاکتور برای توسعه فرسایش کناری می‌باشد. گرادیان شیب ملایم مخروط افکنه‌های فعال باعث می‌شود که رواناب گرایش به پخش‌شدگی بیشتر در مقایسه با تجمع داشته باشد. علاوه بر این کمبود خاک‌های تکامل یافته روی سطوح غیرفعال در مقایسه با سطوح غیرفعال و توزیع رسوبات درشت دانه و تکامل نیافته مانند گراول در لایه‌های عمقی‌تر باعث می‌شوند رواناب به سختی بتواند بستر گالی را برش دهد (چن و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین در این شرایط گالی‌ها گرایش به عریض‌تر شدن دارند تا عمیق‌تر شدن. از سوی دیگر، خاک‌هایی با گراول و شن بیشتر در سطوح غیرفعال که عملاً نفوذپذیری بالایی دارند، شرایط را برای توسعه طولی گالی فراهم می‌آورند. برعکس وجود رسوبات به شدت هوادیده ناشی از افزایش طول مدت هوادیدگی و دور بودن از فرایندهای سیلابی در سطوح غیرفعال امکان ایجاد خاک‌های تکامل یافته‌تر و ریزدانه‌تر رسی که نفوذپذیری پائینی دارند را فراهم کرده است، شرایطی که باعث می‌شود توسعه طولی گالی‌ها کمتر، برعکس گالی‌ها عرض و عمق بیشتری

¹ Deng et al

در مقایسه با طول داشته باشند. همچنانکه این نتایج در مشاهدات سایر مطالعات مشابه مانند موتما و همکاران^۱ (۲۰۲۰) و چن و همکاران (۲۰۲۲) نیز دیده شده است.

جدول ۲. نتایج آماری آزمون t و Cohen's d برای الگوی گالی سطوح فعال و غیرفعال

شاخص های گالی	میانگین مخروط افکنه		آزمون t-test		آزمون Cohen's d	
	فعال	غیر فعال	مقدار t	P-value	مقدار d	معنی داری
درصد گالی	۳۹/۲۳	۲۸/۳۶	۰/۸۴۷۳	۰/۴۴۳۴	۰/۰۳۴۲	غیر معنی دار
تراکم گالی	۳۱/۸۸	۲۶/۷۴	۳/۴۷۰۴	۰/۰۱۱۶	۰/۵۸۵۹	معنی دار
طول گالی	۵۷/۵۱	۵۳/۷۲	۱/۷۴۰۳	۰/۰۰۲۳	۰/۷۴۶۵	معنی دار
عرض گالی	۳/۳۲	۵/۰۶	-۳/۵۸	۰/۰۰۰۷	-۰/۶۳۱۴	معنی دار
نسبت طول به عرض گالی	۱۸/۹۹	۱۲/۲۴	۳/۶۴	۰/۰۰۱۱	۰/۶۶۴۷	معنی دار

از آنجا که مساحت و شیب مخروط افکنه‌ها نقش کنترلی مهمی در تجمیع رواناب‌های جریان یافته از حوضه آبریز دارند، تغییرپذیری مساحت مخروط افکنه تحت تاثیر شرایط محیطی، شاخص مهم تاثیرگذار در توسعه فرسایش گالی شناخته می‌شود (توری و پوتسن^۲، ۲۰۱۴، یبیتال و همکاران^۳، ۲۰۱۹). این نتایج با مطالعه نایسن و همکاران (۲۰۰۲) مطابقت دارد که نشان دادند در شرایطی که بازسازی جاده‌ها منجر به افزایش اتصال هیدرولیکی رواناب‌های انتشار یافته از حوضه آبریز شود، گالی‌ها در شیب‌های کمتر نیز توسعه فزاینده‌ای خواهند یافت. کانوسکتی و همکاران^۴ (۲۰۱۸) در ارزیابی حساسیت پذیری منطقه‌ای در ایتالیا نسبت به فرسایش گالی نشان داده‌اند تراکم زهکشی در هر موقعیت ژئومورفیک بیشترین تاثیر را برای توسعه فرسایش گالی دارد. علاوه بر این مطالعات دیگری نشان داده‌اند که گالی‌ها شرایط تسهیل کننده برای دسترسی به جریان‌ات سطحی را فراهم آورده و با تغییرات توپوگرافی و زهکشی سطحی شرایط اتصال هیدرولوژیکی جریان‌ات را تسریع می‌کنند. شرایطی که منجر به تشدید تولید و تجمیع رواناب بر روی سطوح مختلف مخروط افکنه می‌گردد (بریکن و کوک^۵، ۲۰۰۷؛ مولینا و همکاران^۶، ۲۰۰۹؛ مونسیرس و همکاران^۷، ۲۰۱۵، کانگ و همکاران، ۲۰۲۱ الف). گالی‌ها منجر به تجمع جریان‌ات در کانال‌های کم عرض و متعاقبا افزایش اتصال هیدرولوژیکی در سطوح مخروط می‌شوند. اتصال هیدرولوژیکی بیشتر در مخروط افکنه به معنای کوتاه شدن زمان تمرکز جریان و افزایش انرژی کینتیک رواناب است. بنابراین تراکم گالی و درصد پراکنش گالی در مخروط افکنه‌ها می‌تواند فاکتور موثری برای توسعه الگوی فرسایش گالی بر روی این سطوح باشد.

بررسی ارتباط بین ژئومتری مخروط افکنه‌های فعال و غیرفعال و الگوی فرسایش گالی

شکل ۲ و ۳ ماتریس همبستگی بین پنج مشخصه اصلی گالی شامل درصد، تراکم، طول، عرض و نسبت طول به عرض گالی با یازده متغیر ژئومتری مخروط افکنه‌های غیرفعال و فعال شامل همگرایی جریان، انحنای پروفیل، تراکم زهکشی، ارتفاع از سطح دریا، ارتفاع نسبی، زبری سطحی، شیب، قدرت جریان، موقعیت توپوگرافی، رطوبت توپوگرافی و عمق دره را نشان می‌دهد. تراکم گالی در سطوح غیرفعال همبستگی مثبت بسیار قوی با شیب (۰/۷۰) و عمق دره (۰/۷۰) نشان

¹ Mutema et al

² Torri & Poesen

³ Yibeltal et al

⁴ Conoscenti et al

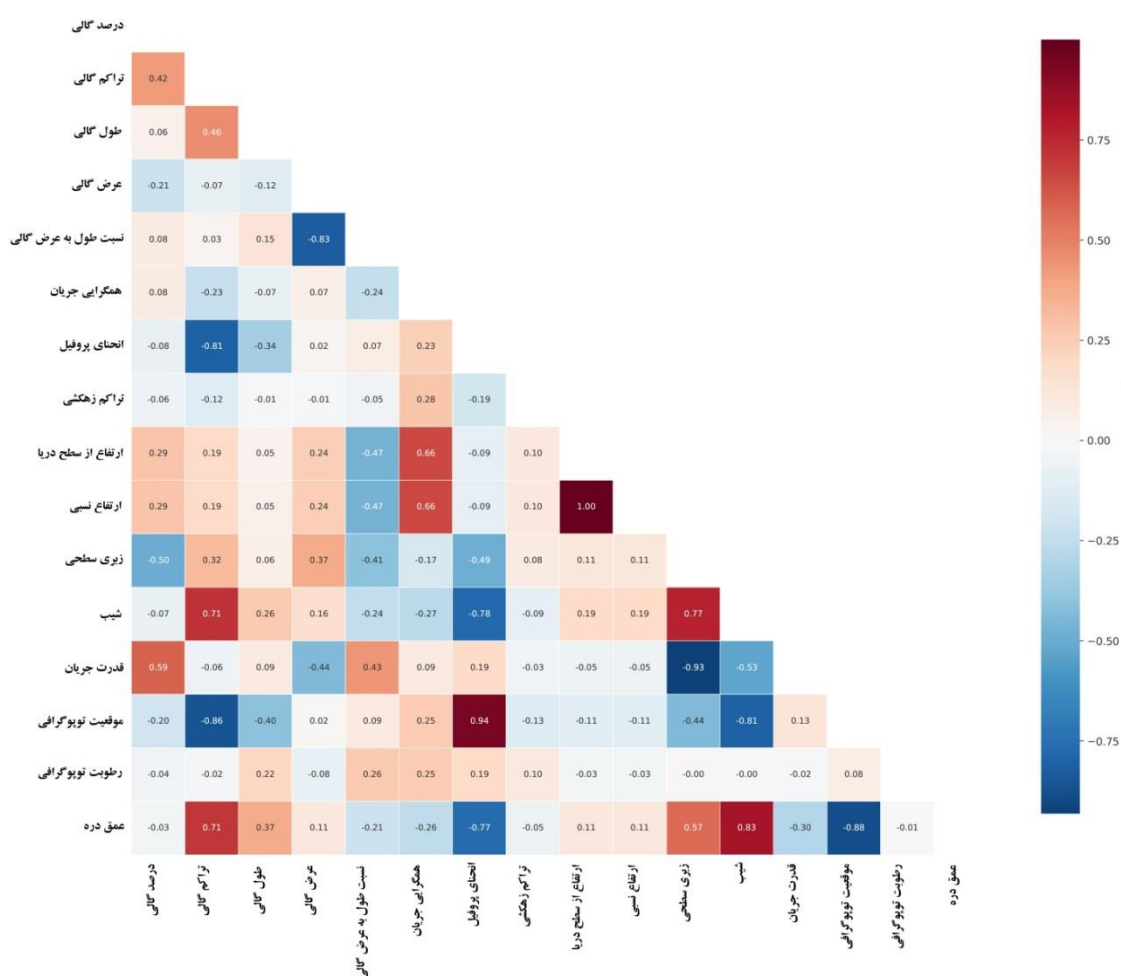
⁵ Bracken & Croke

⁶ Molina et al

⁷ Monsieurs et al

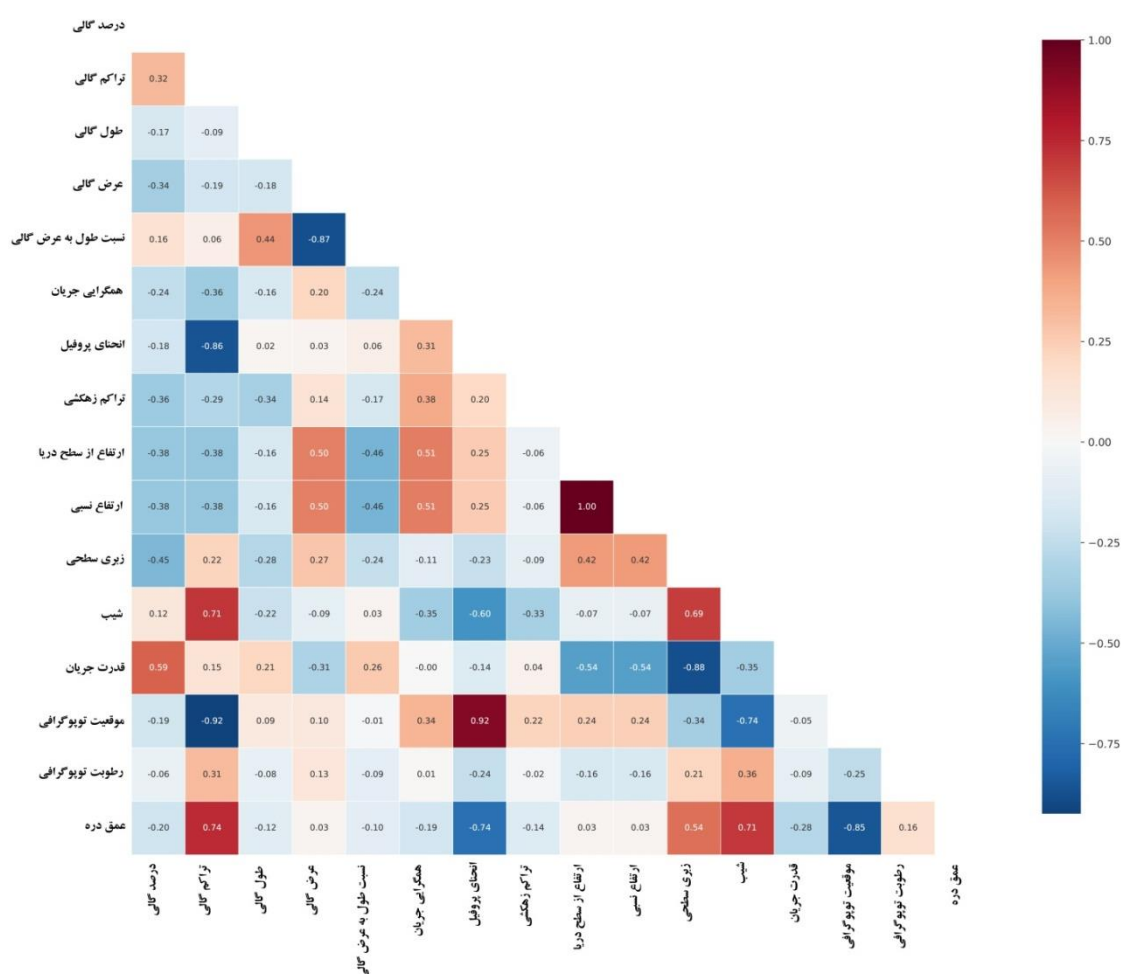
داده است (شکل ۲). در مقابل، همبستگی منفی بسیار قوی بین تراکم گالی و انحنای پروفیل ($-0/81$) و موقعیت توپوگرافی ($-0/86$) مشاهده شده است. همبستگی منفی با انحنای پروفیل و موقعیت توپوگرافی بیانگر آن است که گالی‌های سطوح غیرفعال تمایل بیشتری به تشکیل در سطوح مقعر و نواحی پست‌تر توپوگرافیک دارند، جایی که تجمع آب بیشتر اتفاق می‌افتد. همچنین طول گالی همبستگی مثبت قوی با رطوبت توپوگرافی ($0/77$) و همبستگی منفی معنادار با موقعیت توپوگرافی ($-0/40$) و انحنای پروفیل ($-0/34$) را نشان می‌دهد، که به ترتیب حاکی از نقش مهم تجمع آب در گسترش طولی گالی‌ها و شکل‌گیری کمتر گالی‌های طولی‌تر در برجستگی‌ها و سطوح محدب می‌باشد. همبستگی مثبت عرض گالی ($0/44$) و طول گالی ($0/46$) با قدرت جریان بیانگر تأثیر انرژی جریان بر افزایش ابعاد عرضی گالی‌ها است. نسبت طول به عرض گالی، که نشان‌دهنده شکل کشیدگی گالی است، همبستگی منفی متوسطی با زبری سطحی ($-0/41$) نشان داده است. این رابطه نشان دهد که در سطوح ناهموارتر غیرفعال، گالی‌ها تمایل کمتری به کشیدگی داشته و تمایل بیشتری به عریض‌تر شدن دارند. به طور کلی، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که در مخروط‌افکنه‌های قدیمی، توسعه و مشخصات گالی‌ها، به ویژه تراکم و طول آن‌ها، به شدت تحت تأثیر عواملی مانند شیب زمین، پستی و بلندی‌های محلی (که با موقعیت توپوگرافی، عمق دره و انحنای پروفیل بیان می‌شوند) و مسیرهای بالقوه تجمع آب (که با رطوبت توپوگرافی مشخص می‌شود) قرار دارد (شکل ۲). این یافته‌ها می‌تواند در درک بهتر فرآیندهای فرسایشی حاکم بر این لندفرم‌ها و همچنین در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و حفاظتی خاک در محیط‌های مخروط افکنه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل ماتریس همبستگی بین مشخصه‌های گالی (درصد گالی، تراکم گالی، طول گالی، عرض گالی و نسبت طول به عرض گالی) و مجموعه‌ای از متغیرهای ژئومتری مخروط‌افکنه‌های جدید به درک بهتر فرآیندهای مؤثر بر شکل‌گیری و توسعه گالی‌ها در این محیط‌های ژئومورفولوژیکی کمک می‌کند (شکل ۳). درصد گالی همبستگی مثبت متوسط تا قوی با قدرت جریان ($0/59$) در سطوح فعال نشان می‌دهد. زیرا قدرت جریان بالاتر می‌تواند پتانسیل فرسایشی بیشتری را فراهم کرده و منجر به گسترش و افزایش درصد گالی‌ها در سطح مخروط‌افکنه گردد. همبستگی معنادار و منفی درصد گالی با موقعیت توپوگرافی ($-0/92$) و انحنای پروفیل ($-0/86$) نشان می‌دهد که در موقعیت‌های توپوگرافی خاص (احتمالاً مناطق تجمع آب یا شاخص رطوبت توپوگرافیک بالا) و در پروفیل‌های مقعر، تراکم گالی‌ها کمتر است، یا برعکس، در پروفیل‌های محدب و موقعیت‌های دامنه‌ای خاص تراکم بیشتر است. همبستگی مثبت درصد گالی با شیب ($0/71$) و عمق دره ($0/74$) به وضوح بیانگر فعالیت فرسایشی شدیدتر و در نتیجه تراکم بالاتر گالی‌ها تحت تأثیر این ۲ فاکتور باشد. همبستگی مثبت طول گالی با تراکم زهکشی ($0/34$) نشان‌دهنده سیستم هیدرولوژیکی توسعه‌یافته‌تر در سطوح جدید است که به طولی شدن گالی‌ها کمک می‌کند. همبستگی مثبت عرض گالی با ارتفاع از سطح دریا ($0/50$) و ارتفاع نسبی ($0/50$) نشان می‌دهد در ارتفاعات بالاتر مخروط‌افکنه‌های جدید، گالی‌ها تمایل بیشتری به عریض‌تر شدن دارند. همبستگی منفی عرض گالی با قدرت جریان ($-0/31$) نشان می‌دهد که قدرت جریان بیشتر منجر به تعمیق و طولی شدن گالی‌ها به جای عریض شدن آن‌ها شده، و گالی‌های عریض‌تر در مناطقی با قدرت جریان کمتر در سطوح فعال شکل می‌گیرند.



شکل ۲. ماتریس همبستگی بین ژئومتری سطوح غیرفعال مخروط افکنه‌ها و الگوی فرسایش گالی

تحلیل حاضر به بررسی تفاوت‌های مورفومتریک سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها و الگوهای فرسایشی میان آن‌ها می‌پردازد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در سطوح فعال، همبستگی منفی معناداری بین ضریب انحنای و درصد گالی‌ها وجود دارد. به این ترتیب، با افزایش مقادیر انحنای، درصد گالی‌ها در سطوح فعال کاهش می‌یابد. این یافته حاکی از آن است که سطوح با انحنای بیشتر ممکن است جریان آب را به شکلی پراکنده‌تر هدایت کنند و در نتیجه، تمرکز جریان برای تشکیل گالی‌ها را کاهش دهند.



شکل ۳. ماتریس همبستگی بین ژئومتری سطوح فعال مخروط افکنه‌ها و الگوی فرسایش گالی

نتایج شاخص همگرایی نیز نشان‌دهنده همبستگی منفی این شاخص با درصد پراکنش گالی‌ها در سطوح فعال است. این رابطه بیانگر آن است که در مناطق با همگرایی بیشتر جریان، درصد گالی‌ها افزایش می‌یابد، که این امر می‌تواند به دلیل تمرکز جریان‌های سطحی و تشدید فرآیندهای فرسایشی خطی باشد. عدم وجود همبستگی معنادار بین درصد گالی‌ها و ضریب انحنای یا شاخص همگرایی در سطوح غیرفعال، نشان‌دهنده آن است که در سطوح پایدارتر و قدیمی‌تر، الگوی همگرایی جریان نقش کم‌رنگی در توزیع گالی‌ها ایفا می‌کند و عوامل دیگری مانند تکامل خاک و پوشش گیاهی ممکن است برتری یابند. در مقابل، در سطوح غیرفعال، همبستگی مثبت معنادار بین درصد گالی‌ها و شاخص ارتفاع مشاهده می‌شود، که این امر دلالت بر آن دارد که در بخش‌های مرتفع‌تر مخروط‌افکنه‌های قدیمی‌تر (که احتمالاً بقایای سطوح اولیه هستند)، به دلیل شیب بیشتر و مواجهه طولانی‌مدت با فرآیندهای فرسایشی، درصد گالی‌ها افزایش یافته است. همچنین، همبستگی منفی معنادار بین درصد گالی‌ها و میانگین ارتفاعی در مخروط‌افکنه‌های فعال، نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، درصد گالی‌ها کاهش می‌یابد. این الگو می‌تواند ناشی از جوان‌تر بودن این سطوح و فعالیت بیشتر بخش‌های پایین دست تحت تأثیر فرآیندهای سیلابی، جابجایی و رسوب‌گذاری مکرر جریان‌های حمل‌شده از حوضه آبریز باشد، که در نهایت به کاهش تمرکز فرسایشی در ارتفاعات بالاتر منجر می‌شود. در سطوح فعال، تراکم زهکشی بالاتر با درصد گالی‌ها ارتباط معناداری نشان می‌دهد. این ارتباط می‌تواند بیانگر آن باشد که شبکه‌های زهکشی توسعه‌یافته‌تر در

سطوح فعال، یا به تمرکز جریان و تسهیل تشکیل گالی کمک می‌کنند یا خود نتیجه فرآیندهای گالی‌زایی هستند، که این امر چرخه‌ای از تعامل بین مورفولوژی و هیدرولوژی را برجسته می‌سازد. عدم وجود ارتباط معنادار بین درصد گالی‌ها و تراکم زهکشی در مخروط‌افکنه‌های غیرفعال، می‌تواند به دلیل پایدار شدن سطوح و پر شدن یا غیرفعال شدن شبکه‌های زهکشی قدیمی‌تر باشد، که این پایداری با کاهش فعالیت‌های فرسایشی فعال همراه است. سطوح ناهموارتر (شاخص زبری سطح) می‌توانند تمرکز جریان آب را افزایش دهند و به تشکیل گالی کمک کنند، یا خود گالی‌ها عامل افزایش زبری سطح باشند. ارتباط قوی زبری با درصد پراکنش گالی‌ها در سطوح غیرفعال می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که گالی‌های قدیمی و تثبیت‌شده، مهم‌ترین عامل ایجاد ناهمواری در این سطوح هستند و فرآیندهای هواپدگی و فرسایش طولانی‌مدت، الگوهای زبری شدیدشده‌ای را در ارتباط با شبکه‌های گالی قدیمی ایجاد کرده‌اند. عدم ارتباط بین سایر شاخص‌ها در سطوح غیرفعال می‌تواند به دلیل پایدار شدن نسبی این سطوح، تکامل پروفیل خاک و کاهش تأثیر مستقیم فرآیندهای سطحی اولیه باشد. فرآیندهای هواپدگی طولانی‌مدت در مخروط‌افکنه‌های غیرفعال، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد سطحی را تغییر می‌دهند و مقاومت آن‌ها را در برابر فرسایش تحت تأثیر قرار می‌دهند، که این امر می‌تواند پیچیدگی الگوهای فرسایشی را افزایش دهد و به توزیع نامنظم‌تر گالی‌ها منجر شود.

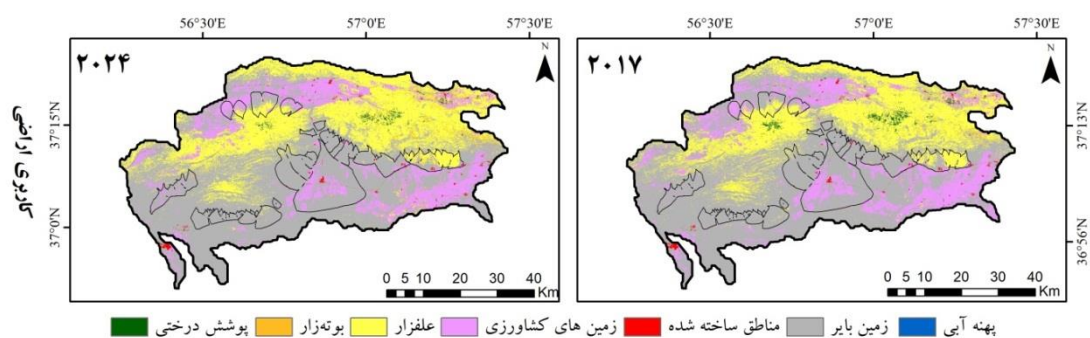
همچنانکه در شکل ۲ و ۳ مشاهده می‌شود مساحت مخروط‌افکنه‌ها و میانگین طول گالی‌ها در مخروط‌افکنه‌های قدیمی‌تر، ضریب همبستگی برابر با $-0/89$ و در مخروط‌افکنه‌های جدید برابر با $-0/85$ داشته‌اند. این ارتباط منفی می‌تواند به دلیل تمرکز بیشتر جریان‌های سطحی و فرسایش در مخروط‌افکنه‌های کوچک‌تر باشد. در مخروط‌افکنه‌های بزرگ‌تر، جریان‌ها ممکن است در سطح وسیع‌تری پخش شوند و در نتیجه، فرسایش و تشکیل گالی‌ها کمتر متمرکز شود. در مقابل، مخروط‌افکنه‌های کوچک‌تر به دلیل محدودیت فضایی، جریان‌های متمرکزتری را تجربه کرده که منجر به فرسایش شدیدتر و تشکیل گالی‌های عمیق‌تر و طولی‌تر می‌شود.

در مورد، اثرات فعالیت‌های آنتروپوژنیک و تغییرات پوشش گیاهی بر الگوی تکاملی گالی در سطوح مخروط افکنه‌ها همچنانکه در شکل ۴ مشاهده می‌شود روند تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۲۴ در مقایسه با سال ۲۰۱۷ $6/95$ درصد بوده است. بطوریکه بخش عمده‌ای از زمین‌های بایر و پوشش گیاهی طبیعی تبدیل به زمین‌های کشاورزی شده‌اند. درباره شاخص پوشش گیاهی درصد افزایش و کاهش پوششش به ترتیب $3/30$ و $1/51$ بوده است. از این میان برای سطوح فعال درصد مناطق با افزایش پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۷ با $3/83$ درصد و در سطوح غیرفعال $0/78$ درصد بوده است. پوشش گیاهی با کاهش سرعت جریان و اتصال هیدرولوژیک منجر به تضعیف دینامیک توسعه فرسایش گالی می‌شود (جین و همکاران^۱، ۲۰۲۰، یان و همکاران^۲، ۲۰۲۱). همچنانکه مطالعه ما و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده است با افزایش پوشش گیاهی ظرفیت جابجایی رسوبات بطور نمای کاهش می‌یابد. فرناندز و همکاران^۳ (۲۰۲۰) نشان دادند بعد از احیا پوشش گیاهی، اتصال هیدرولوژیکی در حوضه‌های کوچک تا 13 درصد و عملکرد رسوب تا 10 برابر کاهش می‌یابد. بطور کلی فعالیت‌های انسانی به دنبال تخریب پوشش گیاهی و تغییرات کاربری شرایط را برای گسترش فرسایش گالی تسهیل می‌کنند (پوتسن، ۲۰۱۸؛ کانگ و همکاران، ۲۰۲۱ ب؛ شلبرگ، ۲۰۲۱).

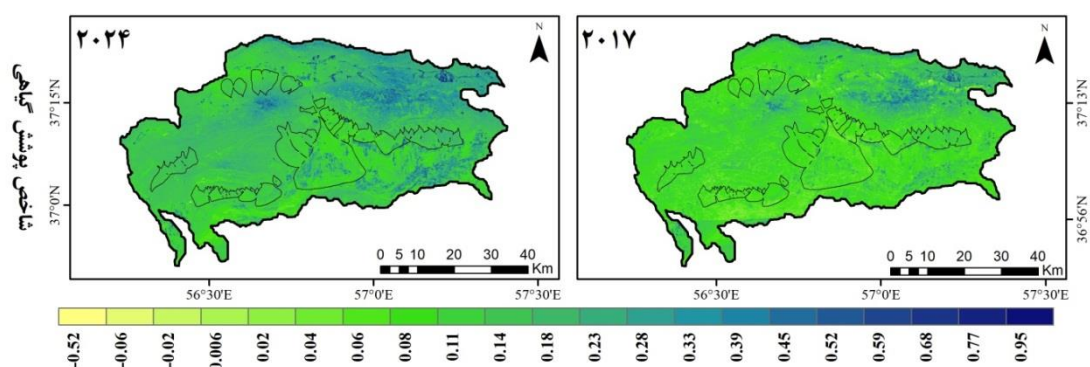
¹ Jin et al

² Yan et al

³ Fernández et al



درصد تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۲۴ نسبت به سال ۲۰۱۷: ۶.۹۵ درصد



درصد مناطق با افزایش شاخص پوشش گیاهی سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۷: ۳.۳۰ درصد

درصد مناطق با کاهش شاخص پوشش گیاهی سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۷: ۱.۵۱ درصد

شکل ۴. تغییرات کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۲۴ در محدوده مورد مطالعه

در تحقیق حاضر، فعالیت‌های انسانی منجر به افزایش پراکندگی گالی‌ها روی سطوح مختلف مخروط افکنه شده است. بررسی روند پراکندگی گالی‌ها بر روی مخروط افکنه‌ها طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۲۴ نشان می‌دهد، به ازای هر سال ۰/۷۲ افزایش در نرخ تراکم گالی در محدوده مورد مطالعه داشته‌ایم (شکل ۵). این خروجی نشان می‌دهد علیرغم افزایش شاخص پوشش گیاهی در این سال‌ها، براساس نقشه تغییرات کاربری، تبدیل زمین‌های بایر و پوشش گیاهی طبیعی به زمین‌های کشاورزی زمینه افزایش توزیع تراکم گالی‌ها در سطوح مختلف را تسهیل کرده است. در سال‌های اخیر با توسعه کشاورزی مکانیزه گالی‌های ایجاد شده بر روی سطوح مخروط افکنه توسط ماشین آلات کشاورزی پر شده و شرایط تراز سطح خاک برای کشاورزی فراهم می‌شود. در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است که بعد از تغییرات مصنوعی، تراکم گالی تا ۶۳ درصد و درجه بریدگی گالی تا ۸۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این حذف برخی گالی‌ها و پر کردن آنها منجر به کاهش همبستگی بین تراکم گالی و تغییرات کاربری در نتایج شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا ویژگی‌های ژئومتری سطوح مختلف مخروط افکنه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، برای تعیین الگوی فرسایش گالی در نسل‌های گوناگون مخروط افکنه‌ها، ویژگی‌های مورفومتری گالی‌ها اندازه‌گیری و کمی‌سازی شد. در نهایت، روابط میان تحول سطوح مخروط افکنه‌ها، تغییرات ژئومتری سطوح و الگوی دینامیک فرسایش گالی بررسی گردید. نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری معنی‌دار در شاخص‌های مورفومتری گالی میان مخروط افکنه‌های

فعال و غیرفعال است. مخروط افکنه‌های فعال با تراکم بالاتر گالی، طول بیشتر گالی و نسبت طول به عرض بالاتر، بیانگر سیستم‌های گالی جوان‌تر و پویاتر از منظر فرسایشی هستند. در مقابل، سطوح غیرفعال با گالی‌های عریض‌تر و عمیق‌تر، حاکی از تکامل پیشرفته گالی‌ها در شرایطی با فعالیت فرسایشی کمتر شدید می‌باشند. این یافته‌ها بر اهمیت تحلیل مورفومتری گالی به عنوان ابزاری مؤثر برای تمایز و درک وضعیت فعالیت مخروط افکنه‌ها تأکید می‌ورزند.

تفاوت‌های مشاهده شده در ژئومتری و الگوی فرسایش گالی، بازتابی از تکامل ژئومورفولوژیکی مخروط افکنه‌ها از مراحل اولیه و فعال به سمت مراحل توسعه یافته و پایدارتر است. بر اساس استنباط از داده‌ها، در مراحل اولیه، انرژی جریان و شیب اولیه به عنوان عوامل غالب در شکل‌گیری الگوهای فرسایشی عمل می‌کنند، در حالی که با گذشت زمان، عواملی همچون توزیع مجدد آب، توسعه خاک، پوشش گیاهی و فرآیندهای فرسایشی و هوازگی بلندمدت، شرایط متفاوتی را رقم می‌زنند. این تحلیل مقایسه‌ای حاکی از آن است که اگرچه برخی عوامل توپوگرافیک در هر دو نسل مخروط افکنه بر توسعه گالی تأثیرگذارند، اما سن و مرحله تکاملی مخروط افکنه می‌تواند اهمیت نسبی عوامل ژئومتری و الگوی فرسایش گالی را تغییر دهد. در سطوح فعال، انرژی اولیه جریان (قدرت جریان برای درصد گالی)، توسعه شبکه زهکشی (برای طول گالی) و شرایط ارتفاعی (برای عرض گالی و نسبت طول به عرض) به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در الگوی فرسایش گالی شناسایی شدند. در سطوح غیرفعال، عوامل مرتبط با تجمع و ماندگاری آب (شاخص رطوبت توپوگرافی برای طول گالی) و وضعیت تثبیت شده سطوح (زبری سطحی برای نسبت طول به عرض) نقش برجسته‌تری در الگوی فرسایش گالی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، همبستگی مثبت میان عرض گالی و قدرت جریان، نشان‌دهنده غلبه فرسایش کناری و عریض‌تر شدن گالی‌های تکامل یافته در سطوح غیرفعال نسبت به سطوح فعال است. این استنباط‌ها، بر پایه تحلیل آماری و مقایسه‌ای، بر نقش پویای عوامل محیطی در تکامل ژئومورفولوژیکی تأکید دارند و پیشنهاد می‌کنند که مدل‌های پیش‌بینی فرسایش گالی باید مرحله تکاملی مخروط افکنه را به عنوان متغیری کلیدی در نظر گیرند.

نتایج همبستگی در سطوح فعال نشان می‌دهد که متغیرهایی مانند شیب، قدرت جریان، موقعیت توپوگرافی، انحنای پروفیل، عمق دره و ارتفاع، نقش‌های متفاوتی در تعیین الگوی گالی‌ها در سطوح مختلف مخروط‌ها داشته‌اند. بنابراین درک فرآیندهای فرسایشی و گالی‌زایی در مخروط افکنه‌ها نیازمند در نظر گرفتن همزمان وضعیت فعالیت سطح (فعال یا غیرفعال) و ژئومتری آن است. سطوح فعال به نظر می‌رسد بیشتر تحت تأثیر دینامیک‌های جریانی و توپوگرافی اولیه هستند، در حالی که در مخروط افکنه‌های غیرفعال، اثرات طولانی مدت فرسایش، هوازدگی و پایداری نسبی سطح، الگوهای پیچیده‌تری را ایجاد می‌کند. زبری سطح به عنوان یک شاخص کلیدی در هر دو نوع مخروط افکنه در ارتباط با گالی‌زایی ظاهر می‌شود. بر اساس تحلیل داده‌های ارائه شده، به نظر می‌رسد، مخروط افکنه‌های فعال در منطقه مورد مطالعه، میانگین درصد فرسایش گالی بالاتری نسبت به سطوح قدیمی‌تر داشته‌اند. این یافته می‌تواند به عواملی مانند تفاوت در زمان سپری شده از آخرین فعالیت عمده رسوب‌گذاری، تفاوت در ویژگی‌های مواد سطحی (مانند انسجام و نفوذپذیری)، شیب، پوشش گیاهی، یا تأثیرات متفاوت تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی بر بخش‌های با سن متفاوت نسبت داده شود. آگاهی جامعه محلی از تبعات فرسایش خاک روی مخروط افکنه‌ها می‌تواند به پیشبرد اقدامات مدیریتی برای حفاظت این منابع کمک نماید. برای مثال ساخت استخرها در بالادست مخروط‌های فعال برای جمع‌آوری رواناب از حوضه آبریز و آبیاری زمین‌های کشاورزی می‌تواند در کاهش فرسایش خاک مؤثر باشد. با قرق بخشی از حوضه آبریز بالادست مخروط افکنه‌های فعال، شرایط احیای پوشش گیاهی فراهم شده و بنابراین کاهش چرای دام می‌تواند منجر به تسهیل شرایط برای کنترل فرسایش گالی در مخروط‌های پائین دست شود. برخی دیگر از راهکارها برای کنترل

فرسایش بصورت زیر خلاصه می‌شود: کاهش اتصال هیدرولوژیک در حوضه بالادست و تغییر مسیر رواناب بر روی مخروط‌ها با روش‌هایی نظیر احیا پوشش گیاهی و ساخت سدهای کوچک در اطراف گالی‌ها در حوضه آبریز و یا ساخت بند و آبیگر در اطراف زمین‌های کشاورزی و مناطق سازه ای (مولینا و همکاران، ۲۰۰۹، ۱۸۲۳). هزینه کاشت پوشش گیاهی نسبتاً پائین بوده اما اثرات کنترل کننده آن در کاهش بارش‌های حدی و فرسایش گالی بسیار چشمگیر است. بنابراین روش‌های بیولوژیک در ترکیب با سایر روش‌ها می‌تواند نتایج قابل توجهی در کنترل فرسایش گالی مخروط افکنه داشته باشد. اگر چه ساخت سدهای کوچک در اطراف کانال‌های زهکشی بطور موثری ضریب اتصال جریان‌ها را کاهش می‌دهد اما این سازه‌ها به سرعت توسط رسوبات پر شده و بنابراین تغییر مسیر جریان همچنان نیازمند بررسی‌های سیستماتیک‌تر است.

منابع

- بهرامی، ش.، احتشامی معین آبادی، م.، و فاطمی، ح.، ۱۴۰۳. تحلیل کمی مورفومتری مخروط افکنه های واقع در امتداد گسل امتداد لغز دهشیر. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۲): ۷۱-۸۸.
- بهرامی، ش.، ۱۳۹۳. برآورد حجم مخروط افکنه های واقع در حاشیه طاقدیس دنه خشک و ارتباط آن با تکتونی. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹(۱): ۵۲-۷۹.
- صالحی پور میلانی، ع.، و بشکنی، ز.، ۱۳۹۹. تحلیل روابط کمی بین ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه های ساحلی با حوضه های آبخیز (مطالعه موردی، واحد ژئومورفولوژیکی تالش). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۸(۴): ۱۳۰-۱۱۲.
- کارگریان مروستی، م.، و محسنی، ن.، ۱۴۰۴. تحلیل ارتباط بین ویژگی سطوح مختلف مخروط افکنه‌های مروست با مورفومتری حوضه‌های آبریز بوانات-مدوار. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۴): ۱۸۰-۱۵۸.
- گورابی، ا.، و یمانی، م.، ۱۳۹۱. ارتباط کمی ویژگی‌های مورفولوژیک حوضه‌های زهکشی و مخروط‌افکنه‌های آن‌ها در ایران مرکزی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۲): ۱۶-۱.
- گورابی، ا.، و کریمی، مصطفی.، ۱۳۹۱. تأثیر تکتونیک فعال و تغییرات اقلیمی در تحول مخروط افکنه مروست، ایران مرکزی. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۲(۲۷): ۳۰-۷.
- محسنی، ا.، محسنی، ن.، و کریمی، ع.، ۱۴۰۱. اثرات تحول سنی لندفرم‌ها بر دینامیک کربن پدوسفر (مطالعه موردی: دامنه های آلاداغ-شمال شرقی ایران). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۱۱(۳): ۱۰۰-۸۵.

- Anderson, R. L., Rowntree, K. M., Le Roux, J. J. (2021). An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. *Catena*, 206, 105482. DOI:[10.1016/j.catena.2021.105482](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105482)
- Bahrami, S., Ghahraman, K. (2019). Geomorphological controls on soil fertility of semi-arid alluvial fans: A case study of the Joghatay Mountains, Northeast Iran. *Catena*, 176, 145-158. DOI:[10.1016/j.catena.2019.01.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.016)
- Bracken, L. J., Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(13), 1749-1763. DOI:[10.1002/hyp.6313](https://doi.org/10.1002/hyp.6313)
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8(1), 2013. DOI:[10.1038/s41467-017-02142-7](https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7)

- Castillo, C., Gómez, J. A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319. DOI:[10.1016/j.earscirev.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009)
- Chen, T., Jiao, J., Zhang, Z., Lin, H., Zhao, C., Wang, H. (2022). Soil quality evaluation of the alluvial fan in the Lhasa River Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Catena*, 209, 105829. DOI:[10.1016/j.catena.2021.105829](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105829)
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N. A., Rotigliano, E. (2018). Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land degradation & development*, 29(3), 724-736. DOI:[10.1002/ldr.2772](https://doi.org/10.1002/ldr.2772)
- Chaplot, V. (2013). Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology*, 186, 1-11. DOI:[10.1016/j.geomorph.2012.10.031](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.031)
- Costa, F. M., & Bacellar, L. D. A. P. (2007). Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena*, 69(3), 230-238. DOI:[10.1016/j.catena.2006.05.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.007)
- Desprats, J. F., Raclot, D., Rousseau, M., Cerdan, O., Garcin, M. L. B. Y., Le Bissonnais, Y., ... Monfort-Climent, D. (2013). Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery. *Land Degradation & Development*, 24(1), 22-32. DOI:[10.1002/ldr.1094](https://doi.org/10.1002/ldr.1094)
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, G. (2015). Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology*, 228, 703-713. DOI:[10.1016/j.geomorph.2014.10.032](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.032)
- Frankl, A., Deckers, J., Moulaert, L., Van Damme, A., Haile, M., Poesen, J., Nyssen, J. (2016). Integrated solutions for combating gully erosion in areas prone to soil piping: innovations from the drylands of Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 27(8), 1797-1804. DOI:[10.1002/ldr.2301](https://doi.org/10.1002/ldr.2301)
- Fuller, I. C., Marden, M. (2011). Slope-channel coupling in steepland terrain: A field-based conceptual model from the Tarnedale gully and fan, Waipaoa catchment, New Zealand. *Geomorphology*, 128(3-4), 105-115. DOI:[10.1016/j.geomorph.2010.12.018](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.018)
- Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., Vega, J. A. (2020). Exploring the effect of hydrological connectivity and soil burn severity on sediment yield after wildfire and mulching. *Land Degradation & Development*, 31(13), 1611-1621. DOI:[10.1002/ldr.3539](https://doi.org/10.1002/ldr.3539)
- Golosov, V., Yermolaev, O., Rysin, I., Vanmaercke, M., Medvedeva, R., Zaytseva, M. (2018). Mapping and spatial-temporal assessment of gully density in the Middle Volga region, Russia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(13), 2818-2834. DOI:[10.1002/esp.4435](https://doi.org/10.1002/esp.4435)
- Guo, M., Yang, B., Wang, W., Chen, Z., Wang, W., Zhao, M., Kang, H. (2019). Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, 345, 106847. DOI:[10.1016/j.geomorph.2019.106847](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106847)
- Jin, Z., Guo, L., Yu, Y., Luo, D., Fan, B., Chu, G. (2020). Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation. *Science of the Total Environment*, 748, 141375. DOI:[10.1016/j.scitotenv.2020.141375](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141375)

- Kang, H., Guo, M., Wang, W. (2021a). Ephemeral gully erosion in concentrated flow channels induced by rainfall and upslope inflow on steep loessial slopes. *Land Degradation & Development*, 32(17), 5037-5051. DOI:[10.1002/ldr.4089](https://doi.org/10.1002/ldr.4089)
- Kang, H., Wang, W., Guo, M., Li, J., Shi, Q. (2021). How does land use/cover influence gully head retreat rates? An in-situ simulation experiment of rainfall and upstream inflow in the gullied loess region, China. *Land Degradation & Development*, 32(9), 2789-2804. DOI:[10.1002/ldr.3892](https://doi.org/10.1002/ldr.3892)
- Molina, A., Govers, G., Van den Putte, A., Poesen, J., Vanacker, V. (2009). Assessing the reduction of the hydrological connectivity of gully systems through vegetation restoration: field experiments and numerical modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1823-1836. DOI:[10.5194/hess-13-1823-2009](https://doi.org/10.5194/hess-13-1823-2009)
- Monsieurs, E., Dessie, M., Adgo, E., Poesen, J., Deckers, J., Verhoest, N., Nyssen, J. (2015). Seasonal surface drainage of sloping farmland: a review of its hydrogeomorphic impacts. *Land degradation & development*, 26(1), 35-44. DOI:[10.1002/ldr.2286](https://doi.org/10.1002/ldr.2286)
- Mu, H., Yu, X., Fu, S., Yu, B., Liu, Y., Zhang, G. (2019). Effect of stem basal cover on the sediment transport capacity of overland flows. *Geoderma*, 337, 384-393. DOI:[10.1016/j.geoderma.2018.09.055](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.055)
- Mohseni, A., Mohseni, N., Karimi, A., Egli, M. (2023). Interactions of soil quality, ages of alluvial fans, and mechanisms controlling total soil organic carbon dynamics. *Catena*, 232, 107413. DOI:[10.1016/j.catena.2023.107413](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107413)
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., ... Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1267-1283. DOI:[10.1002/esp.404](https://doi.org/10.1002/esp.404)
- Owen, L. A., Clemmens, S. J., Finkel, R. C., Gray, H. (2014). Late Quaternary alluvial fans at the eastern end of the San Bernardino Mountains, Southern California. *Quaternary Science Reviews*, 87, 114-134. DOI:[10.1016/j.quascirev.2014.01.003](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.01.003)
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth surface processes and landforms*, 43(1), 64-84. DOI:[10.1002/esp.4250](https://doi.org/10.1002/esp.4250)
- Regmi, N. R., Rasmussen, C. (2018). Predictive mapping of soil-landscape relationships in the arid Southwest United States. *Catena*, 165, 473-486. DOI:[10.1016/j.catena.2018.02.031](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.031)
- Stöcker, C., Eltner, A., Karrasch, P. (2015). Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry—A case study from Andalusia, Spain. *Catena*, 132, 1-11. DOI:[10.1016/j.catena.2015.04.004](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004)
- Sun, J., Li, S. H., Muhs, D. R., Li, B. (2007). Loess sedimentation in Tibet: provenance, processes, and link with Quaternary glaciations. *Quaternary Science Reviews*, 26(17-18), 2265-2280. DOI:[10.1016/j.quascirev.2007.05.003](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.05.003)
- Shellberg, J. G. (2021). Agricultural development risks increasing gully erosion and cumulative sediment yields from headwater streams in Great Barrier Reef catchments. *Land Degradation & Development*, 32(3), 1555-1569. DOI:[10.1002/ldr.3807](https://doi.org/10.1002/ldr.3807)
- Torri, D., Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, 130, 73-85. DOI:[10.1016/j.earscirev.2013.12.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.006)
- Vanmaercke, M., Panagos, P., Vanwallegem, T., Hayas, A., Foerster, S., Borrelli, P., ... Poesen, J. (2021). Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A

- state of the art. *Earth-Science Reviews*, 218, 103637. DOI:[10.1016/j.earscirev.2021.103637](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637)
- Valipour, M., Mohseni, N., Hosseinzadeh, S. R. (2021). Factors affecting topographic thresholds in gully erosion occurrence and its management using predictive machine learning models. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 423-432. DOI:[10.15446/esrj.v25n4.95748](https://doi.org/10.15446/esrj.v25n4.95748)
- Wen, Y., Kasielke, T., Li, H., Zepp, H., Zhang, B. (2021). A case-study on history and rates of gully erosion in Northeast China. *Land Degradation & Development*, 32(15), 4254-4266. DOI:[10.1002/ldr.4031](https://doi.org/10.1002/ldr.4031)
- Xu, M., Li, Q., Wilson, G. (2016). Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 155, 9-18. DOI:[10.1016/j.still.2015.07.012](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.012)
- Yuan, M., Zhang, Y., Zhao, Y., Deng, J. (2020). Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River basin, China. *Science of the Total Environment*, 739, 140066. DOI:[10.1016/j.scitotenv.2020.140066](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140066)
- Yan, Y., Zhang, X., Liu, J., Li, J., Ding, C., Qi, Z., ... Guo, M. (2021). The effectiveness of selected vegetation communities in regulating runoff and soil loss from regraded gully banks in the Mollisol region of Northeast China. *Land Degradation & Development*, 32(6), 2116-2129. DOI:[10.1002/ldr.3866](https://doi.org/10.1002/ldr.3866)
- Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Masunaga, T., ...Berihun, M. L. (2019). Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments. *Geomorphology*, 341, 15-27. DOI:[10.1016/j.geomorph.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.012)
- Zhang, G. H., Liu, B. Y., Liu, G. B., He, X. W., Nearing, M. A. (2003). Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 67(3), 713-719. DOI:[10.2136/sssaj2003.0713](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0713)