

Spatio-temporal monitoring of piping and assessment of erosion and sedimentation using Multi-temporal UAV data

Hanieh Pourjavad ¹, Mohammad Reza Yazdani ^{2*}, Mohsen Hosseinalizadeh ³, Narges Kariminejad ⁴

¹ Ph.D. Student of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran

² Associate Professor, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran

³ Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Extended Abstract

Introduction

Soil erosion is one of the most critical environmental challenges in semi-arid regions worldwide, particularly in landscapes dominated by loessic deposits, where weak physical and mechanical characteristics significantly increase susceptibility to subsurface erosion and the development of piping features. Piping often initiates and progresses covertly during its early stages, eventually leading to sudden surface collapse, topographic instability, accelerated sediment delivery, reduced land productivity, and disruption of hydrological and ecological systems. Despite extensive research on soil erosion, most existing studies have adopted static or single-temporal approaches, and substantial scientific gaps still remain regarding multi-temporal and spatial monitoring of piping frequency, distribution, density, and evolutionary trends. Furthermore, the combined and interactive influences of topography, vegetation cover, and land use patterns on piping development in loess-derived terrains are not yet adequately understood, posing challenges for soil and water conservation planning, bioengineering practices, and watershed management decisions. Accordingly, the present study aims to monitor four-year temporal changes in the number, location, and evolution of piping features, and to evaluate the controlling roles of slope, elevation, vegetation cover, and land use using ultra-high-resolution UAV data combined with multi-temporal Digital Elevation Model of Difference (DoD) analysis

Materials and Methods

Initially, two sub-watersheds with different proportions of rangeland and agricultural land use were selected. To ensure accurate detection and temporal monitoring of piping development, the spatial location of all piping features within both sub-watersheds was recorded using GPS during the 2019 and 2023 survey campaigns. Multi-temporal UAV surveys were conducted under comparable illumination and meteorological conditions using a Phantom 4Pro UAV, and the acquired high-resolution imagery was processed using a photogrammetric workflow in ContextCapture to generate three-dimensional point clouds and high-precision Digital Elevation Models (DEMs) with a spatial accuracy of approximately 5 cm. To quantify volumetric topographic changes, the DoD approach was applied within ArcGIS, resulting in spatially explicit erosion deposition maps as well as annual mean volumetric change estimates (expressed as tons per hectare per year) for each sub-watershed. Land use classification was carried out through visual interpretation of UAV imagery combined with extensive field verification. Slope and elevation layers were extracted from the DEM using ArcGIS to examine topographic control on piping distribution. Density plots generated in R software were used to statistically explore the relationships between piping occurrence, slope gradient, and elevation range. Finally, temporal variations in piping frequency, spatial displacement, initiation, expansion, or disappearance were compared between the two sub-watersheds to identify dominant geomorphic and land-management drivers of piping dynamics.

Results and Discussion

The findings indicated that in Sub-watershed 1, with 85% agricultural land, the piping density was only 10%, of which 2 occurred in croplands and 18 in rangelands. In Sub-watershed 2, with 70% rangeland, the density was considerably higher at 55%, with 198 cases occurring in rangelands. Piping mainly occurred at lower elevations (370–410 m and 300–340 m in Sub-watersheds 1 and 2), on steep slopes (25–35°), and weak vegetation. DoD analysis over the period 2019–2023 revealed that in agricultural lands, deposition was the dominant process, whereas in rangelands, erosion were more pronounced; in Sub-watershed 1, 72% of the area experienced deposition and 28% erosion, while in Sub-watershed 2, 77% erosion and 23% deposition were recorded. Annual

rates were ± 5 t/ha/yr in Sub-watershed 1 and 15–25 t/ha/yr in Sub-watershed 2. Over four years, two agricultural piping features were lost, but two new features formed in Sub-watershed 1 and ten in Sub-watershed 2. The main advantage of this study lies in the integration of real UAV data, precise DoD analysis, pixel-based monitoring of erosion, and piping relocation, enabling identification of high-risk areas and prioritization for management interventions.

Conclusion

According to the results, Sub-watershed 1, dominated by agricultural land use, was mainly characterized by depositional processes, and the total number of piping features remained constant during the four-year monitoring period. In contrast, Sub-watershed 2, where rangelands are dominant, experienced severe erosion, resulting in the formation of eight new piping. This discrepancy can be attributed to contrasting land management practices: agricultural operations such as tillage and crop cultivation may lead to the infilling or concealment of existing pipes, whereas terrain forms, overgrazing and vegetation degradation in rangelands facilitate accelerated piping expansion. Field observations also revealed a dual functional role of piping features. While they intensify subsurface discharge, soil erosion, and desertification, their internal cavities may also serve as favorable microhabitats for the establishment of drought-resistant plant species such as wild pomegranate and *Amygdalus scoparia*. The outcomes of this research can directly support soil and water conservation planning, particularly for prioritizing preventive measures in fragile dryland environments. Enhancing deep-rooted vegetation, regulating grazing patterns, and applying bio-engineering strategies around piping zones are recommended for controlling further degradation. Future studies are advised to integrate UAV observations with seasonal satellite datasets and high-resolution DEM modeling while assessing climate-change-driven rainfall scenarios to better predict long-term piping dynamics.

Keywords: Piping, Loess deposits, Unmanned Aerial Vehicle, Orthophoto, Erosion and sedimentation, Spatio-temporal changes

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors warmly thank the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources and the Semnan University for their support and for providing UAV equipment, which greatly helped with the fieldwork and data collection.

Conflicts of interest

The authors of this article declare no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All data generated during the manuscript analysis are included in the article.

Authors' contribution

Hanieh Pourjavad: Conceptualization, software and statistical analyses, writing the original draft; **Mohammad Reza Yazdani:** Supervision, editing the manuscript, results verification; **Mohsen Hosseinalizadeh:** Supervision, editing the manuscript, results verification; **Narges Kariminejad:** Consultation, reviewing the manuscript, results verification.

*Corresponding Author, E-mail: m_yazdani@semnan.ac.ir

Citation: Pourjavad, H., Yazdani, M.R., Hosseinalizadeh, M., & Kariminejad, N. (2026). Spatio-temporal monitoring of piping and assessment of erosion and sedimentation using Multi-temporal UAV data. *Water and Soil Management and Modelling*, 6(3), 1-20.

doi: 10.22098/mmws.2025.18901.1735

Received: 24 November 2025, Received in revised form: 12 December 2025, Accepted: 03 January 2026, Published online: 27 August 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 1-20.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پایش زمانی - مکانی پایپینگ و ارزیابی فرسایش و رسوب با استفاده از داده های پهپادی چندزمانه

هانیه پورجواد^۱، محمدرضا یزدانی^{۲*}، محسن حسینی زاده^۳، نرگس کریمی نژاد^۴

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه بیابانزدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ دانشیار، گروه آموزشی بیابانزدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۳ دانشیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

نهمین دهه های لسی شرق استان گلستان به دلیل حساسیت ساختاری و هیدرولوژیکی، مستعد فرسایش متمرکز و شکل گیری پایپینگ هستند. پایپینگ ها و فرسایش تونلی، با ایجاد مجاری زیرسطحی موجب تخلیه شدید خاک و ناپایداری دامنه ها می شود. هدف این پژوهش، بررسی نقش همزمان شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بر شکل گیری پایپینگ ها و همچنین پایش تغییرات مکانی و زمانی تعداد و موقعیت آن ها و نرخ میانگین فرسایش و رسوب از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در دو زیرحوضه همجوار از حوزه آبخیز آق چاتال (نهمین دهه های لسی شرق استان گلستان) است. بدین منظور، موقعیت پایپینگ ها با GPS و تصاویر پهپادی دو دوره (۱۳۹۸ و ۱۴۰۲) ثبت و با روش فتوگرامتری پردازش شد. سپس مدل های رقومی ارتفاع با دقت ۵ سانتی متر تهیه و با استفاده از روش تفاضل مدل ارتفاعی (DoD)، نقشه های تغییرات فرسایش و رسوب تولید شد. همچنین نقشه های شیب و ارتفاع از DEM و نقشه کاربری اراضی با مشاهدات میدانی و تصاویر پهپاد استخراج شدند و با نحوه پراکنش پایپینگ ها بررسی شدند. نتایج نشان داد که تراکم پایپینگ ها در زیرحوضه (۲) با غالبیت کاربری مرتع به مراتب بیشتر از زیرحوضه (۱) با غالبیت کشاورزی (به ترتیب ۵۵ و ۱۰٪) است. بیشترین فراوانی و احتمال رخداد پایپینگ ها در ارتفاع های پایین تر (۳۰۰-۴۰۰ متر) و شیب های تندتر (۲۵-۳۵ درجه) مشاهده شد. همچنین، بخش اعظم زیرحوضه (۱) دارای نرخ متعادل فرسایش و رسوب در محدوده ± 5 تن بر هکتار در سال بود؛ در حالی که زیرحوضه (۲) با فرسایش شدید ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال مواجه بود. ارزیابی تغییرات زمانی نیز نشان داد که در هر دو زیرحوضه طی ۴ سال، دو پایپینگ در کاربری کشاورزی حذف شدند؛ در حالی که در زیرحوضه (۱) دو پایپینگ جدید و در زیرحوضه (۲) ده پایپینگ جدید در کاربری مرتع ظاهر شدند. این نتایج بیانگر نقش تعیین کننده شرایط توپوگرافی و کاربری اراضی در کنترل پایداری دامنه ها بوده و بر ضرورت مدیریت پوشش گیاهی برای کاهش و گسترش پایپینگ در مناطق لسی تأکید دارد.

واژه های کلیدی: پایپینگ، نهمین دهه های لسی، پهپاد، تصاویر ارتوفتو، فرسایش و رسوب، تغییرات مکانی و زمانی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_yazdani@semnan.ac.ir

استناد: پورجواد، هانیه، یزدانی، محمدرضا، حسینی زاده، محسن، و کریمی نژاد، نرگس (۱۴۰۵). پایش زمانی - مکانی پایپینگ و ارزیابی فرسایش و رسوب با استفاده از داده های پهپادی چندزمانه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۱-۲۰.

doi: 10.22098/mmws.2025.18901.1735

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۰۱ تا ۲۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱-مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب اراضی است که کاهش حاصل‌خیزی، آسیب به زیرساخت‌ها و تهدید منابع طبیعی را در پی دارد (Poesen, 2017; Hossini et al., 2022; Sartori et al., 2024; Yaghobi et al., 2024). پیشرفت سنجش از دور و یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی امکان پایش مکانی- زمانی فرسایش را افزایش داده و ترکیب مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های پوشش گیاهی در تفکیک و کمی‌سازی مناطق پرخطر مؤثر است (Wang et al., 2025). در ایران، نهشته‌های لسی به‌ویژه در استان گلستان گسترش زیادی دارند (Bahremand and Hosseinalizadeh, 2022) و به دلیل اقلیم نیمه‌خشک، شیب اراضی و ناپایداری کاربری‌ها بسیار حساس به فرسایش هستند (Feizi et al., 2025). ساختار سیلتی و تخلخل بالای لس‌ها موجب واکنش سریع به فرسایش و شکل‌گیری رخساره‌هایی مانند پایپینگ می‌شود (Zhu et al., 2012; Bernatek-Jakiel et al., 2016; Fang et al., 2024). همچنین ترک‌ها و حفرات نقش مهمی در فروپاشی داشته و مدیریت پوشش گیاهی می‌تواند فرسایش را کاهش دهد (Zeng et al., 2024; Hemati Daiv et al., 2023). بنابراین، بررسی اثر کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی بر رفتار فرسایشی لس‌ها ضروری است (Zhuang et al., 2024). نهشته‌های لسی حوزه آبخیز آق‌چاتال با ساختمان ضعیف خاک، تخلخل زیاد و حساسیت ذرات سیلتی، نمونه‌ای شاخص از محیط‌های بسیار حساس است و کوچک‌ترین تغییر در رژیم رطوبتی، گسترش جریان‌های زیرسطحی و آغاز پایپینگ را در این منطقه سبب می‌شود (Hosseinalizadeh et al., 2018). پایپینگ ناشی از جریان متمرکز زیرسطحی است که منجر به ایجاد مجرا و فروپاشی سطح می‌شود (Faulkner, 2013; Bovi et al., 2020). وقوع و رشد پایپینگ‌ها با ساختار خاک، شیب و پوشش گیاهی مرتبط است (Rafaeli et al., 2023). این پدیده در انواع خاک به‌ویژه لس‌ها رخ می‌دهد (Bernatek-Jakiel and Nadal-Romero, 2022) و شدت نقش عوامل اداپیکتی، هیدرولوژیکی و زیستی در آن متفاوت است (Bhagyalekshmi, 2015). پایپینگ باعث تلفات خاک، آب و ناپایداری دامنه‌ها می‌شود (Kariminejad et al., 2021; Pereyra et al., 2020). اما به دلیل دشواری اندازه‌گیری، کمتر مطالعه شده است (Rodzik et al., 2024). درحالی‌که شدت تلفات خاک ناشی از پایپینگ چندین برابر فرسایش سطحی گزارش شده است (Verachtert et al., 2011). با توجه به موارد مذکور، بررسی وضعیت نهشته‌های لسی

در حوزه‌های آبخیز متأثر از پایپینگ با در نظر گرفتن رخداد فرسایش و رسوب در طول زمان دارای اهمیت است. در سال‌های اخیر پهپاد (UAV)^۱ به ابزاری مؤثر برای مطالعه فرسایش خاک تبدیل شده است و امکان تولید ارتوفتو و مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۲ با قدرت تفکیک بالاتر را فراهم می‌کند (Rabiu and Ahmad, 2023). برای ارزیابی تغییرات رخساره‌های فرسایشی، مانند پایپینگ‌ها در طول زمان و عوامل تأثیرگذار بر روند توسعه آن‌ها، به اطلاعات بسیار دقیق از پستی و بلندی منطقه نیاز است (Hosseinalizadeh et al., 2018). در این زمینه استفاده از فن‌آوری پهپاد باعث افزایش دقت و کیفیت مدل‌های ارتفاعی می‌شود (Hosseinalizadeh et al., 2019; Hamshaw et al., 2019). دقت DEM حاصل از پهپاد وابسته به نقاط کنترل زمینی، برنامه‌ریزی پرواز و واسنجی است (Szypuła, 2024). چون پایپینگ‌ها مانند بسیاری از پدیده‌های طبیعی به راحتی در عرصه قابل اندازه‌گیری نیستند؛ بنابراین، دسترسی به اطلاعات آن‌ها مشکل است (Jalalifard et al., 2019; Verachtert et al., 2010). از این‌رو روش فتوگرامتری امکان بازسازی سه‌بعدی دقیق را فراهم می‌کند (D'Oleire-Oltmanns et al., 2014; Stocker et al., 2015; Eltner et al., 2015). بنابراین، دسترسی به جزئیات با دقت بیشتر، آسان‌تر و هزینه کمتر صورت می‌گیرد (Koci et al., 2017; Bae et al., 2019).

تحلیل اختلاف مدل‌های ارتفاعی (DoD)^۳ ابزاری دقیق برای برآورد فرسایش و رسوب است (Niculita et al., 2020). در این زمینه، استفاده از DEM در زمان‌های متفاوت، امکان بررسی تغییرات توپوگرافی ناشی از فرآیندهای ژئومورفولوژیکی را فراهم می‌سازند (Vaze et al., 2010; Dai et al., 2024). این روش با کمی‌سازی تفاضل پیکسلی بین دو DEM با دقت هندسی و مکانی یکسان، قادر است کاهش و افزایش ارتفاع ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری را با تفکیک مکانی بالا نشان دهد (Li et al., 2024). همچنین ضمن برآورد کمی از جابه‌جایی مواد، قابلیت تحلیل مکانی دقیق‌تری نسبت به روش‌های سنتی دارد؛ زیرا تغییرات را در مقیاس پیکسلی نشان می‌دهد (Li et al., 2025a). با این حال، کیفیت نتایج به دقت DEM اولیه و قدرت تفکیک مکانی بستگی دارد. به‌گونه‌ای که قدرت تفکیک بزرگ‌تر منجر به کاهش خطا می‌شود (Li et al., 2025b). بنابراین، DoD تولیدشده از UAV می‌تواند برای استخراج نقشه‌های فرسایش و رسوب در مقیاس‌های کوچک تا متوسط دقیق باشد و این روش نه تنها ابزاری قدرتمند برای پایش فرآیندهای فرسایشی است، بلکه در ارزیابی اثربخشی اقدامات حفاظتی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد

³ Digital Elevation Model of Difference

¹ Unmanned Aerial Vehicle

² Digital Elevation Model

سنجش‌ازدور، تحلیل مکانی دقیق و رویکرد زمانی - مقایسه‌ای، گامی مؤثر در جهت توسعه روش‌های نوین و مدیریت پویای فرایندهای فرسایشی در مناطق لسی ایران به شمار می‌آید.

۲- مواد و روش‌ها

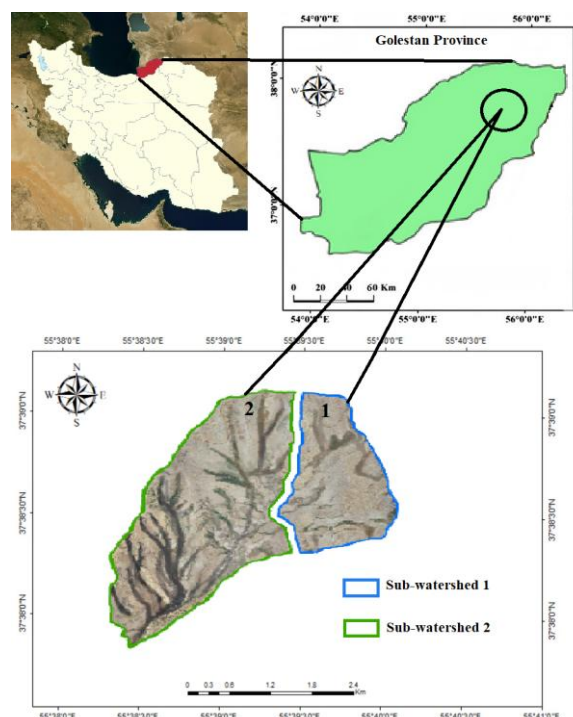
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی، بخشی از حوزه آبخیز آق چاتال در شرق استان گلستان است. این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک با بارندگی سالانه حدود ۲۸۰ میلی‌متر است و عمدتاً از رسوبات لسی کواترنر تشکیل شده است. از نظر زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی در زون کپه‌داغ و در تیپ تپه‌ماهور قرار دارد. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی شامل ۲ زیرحوضه، در عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ} 38' 37''$ تا $37^{\circ} 19' 40''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $55^{\circ} 29' 38''$ تا $55^{\circ} 55' 19''$ شرقی واقع گردیده است. طبق پژوهش Hosseinalizadeh et al. (2025b)، ویژگی‌های خاک‌شناسی این منطقه شامل درصد بالای سیلت (۵۷ تا ۸۴ درصد)، تخلخل ذاتی و افزایش یون سدیم (Na^{+}) و درصد سدیم تبادل (ESP) در لایه‌های عمیق‌تر خاک موجب حساسیت بسیار بالا به فرسایش متمرکز و پایبینگ می‌شود. بنابراین، انتخاب این منطقه، علاوه بر موقعیت ژئومورفولوژیک، بر اساس ویژگی‌های حساس خاک و پتانسیل بالای پایبینگ مناسب است. شکل ۱ نقشه موقعیت دو زیرحوضه چسبیده به هم را در استان گلستان نشان می‌دهد.

۲-۲- ثبت موقعیت مکانی و پوشش گیاهی هر پایبینگ

طی عملیات میدانی صورت گرفته، با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، موقعیت مکانی دقیق پایبینگ‌ها در محدوده مطالعاتی ثبت شد. شکل ۲ نمایی از پایبینگ‌های موجود در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. در ادامه، دو زیرحوضه بر اساس تعداد و تراکم مختلف پایبینگ‌ها، سطح متفاوتی از کاربری‌های اراضی و مرز هیدرولوژیکی جدا شدند. زیر حوضه (۱) با تعداد ۲۰ پایبینگ و مساحت ۱۹۱.۱۰۳ هکتار و زیرحوضه (۲) با تعداد ۲۰۹ پایبینگ و مساحت ۳۷۷.۲۲۶ هکتار انتخاب شدند (شکل ۳).

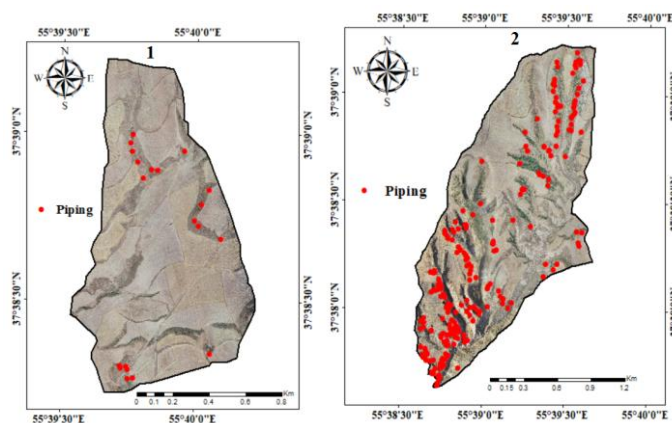
(Li et al., 2025c). با توجه به موارد فوق، پایش تغییرات مکانی و زمانی پایبینگ، به ویژه در محیط‌های حساس مانند آق‌چاتال، از ارکان اساسی مدیریت پایدار و حفاظت خاک محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که مطالعات پیشین از جمله Bernatek-Jakiel et al. (2016)، et al. (2018) و Hosseinalizadeh و Rodzik et al. (2024) درباره پایبینگ و فرسایش در نهشته‌های لسی، ماهیتی مقطعی و ایستا داشته و امکان بررسی پویا و تحول زمانی این پدیده را فراهم نکرده‌اند و در مواردی که تغییرات مورد توجه قرار گرفته است؛ تمرکز پژوهش بر اهداف دیگری بوده است. برای مثال، Kariminejad et al. (2023b) در نهشته‌های لسی سرخس با بهره‌گیری از داده‌های پهبادی و روش‌های ژئوفیزیکی، به شناسایی معماری زیرسطحی و برآورد حجم فروپاشی پایبینگ پرداختند و بررسی تغییرات تعداد و مکان پایبینگ‌ها یا فرسایش و رسوب در بازه زمانی مشخص انجام نشده است. مطالعه دیگری توسط Kariminejad et al. (2023a) نیز تغییرات زمانی فرسایش و رسوب، با هدف ارزیابی تصاویر پهبادی و ماهواره‌ای نشان داد که داده‌های پهبادی بالاترین دقت را در شناسایی شدت فرسایش و مناطق مستعد ایجاد عوارض فرسایشی دارند. از این‌رو، با وجود شباهت در رویکرد زمانی، هدف با پژوهش حاضر متفاوت بوده و به پایبینگ نپرداخته است. در این راستا، پژوهش حاضر با استفاده از تلفیق داده‌های پهبادی چندزمانه و مدل تفاضلی ارتفاعی، امکان برآورد دقیق تغییرات توپوگرافی را فراهم می‌آورد و مناطق فعال فرسایشی را با دقت بالا شناسایی می‌کند و همزمان به ارزیابی نقش شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بر شکل‌گیری پایبینگ می‌پردازد. نوآوری این پژوهش در کاربرد داده‌های پهبادی با فاصله زمانی چند ساله برای بررسی تغییرات تعداد و موقعیت پایبینگ‌ها و تحلیل الگوهای فرسایش و رسوب با استفاده از روش DoD است. این رویکرد نه تنها امکان پایش پویا تغییرات را فراهم می‌کند، بلکه تصویری جامع از تعامل بین عوامل فیزیوگرافی و پدیده‌های فرسایشی ارائه می‌دهد. از منظر کاربردی، یافته‌های این تحقیق می‌تواند در پایش بلندمدت مناطق حساس فرسایشی، ارزیابی اثرات تغییرات کاربری اراضی و اقدامات حفاظتی خاک و آب مورد استفاده قرار گیرد و با ترکیب فناوری‌های نوین



شکل ۱- نقشه موقعیت دو زیر حوضه مطالعاتی در ایران و شرق استان گلستان
Figure 1- Location of the sub-watersheds in eastern Golestan Province, Iran

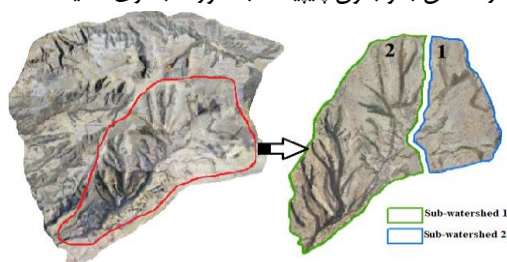


شکل ۲- پایشنگ‌های مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه (سال ۱۴۰۲)
Figure 2- Observed piping features in the study area (2023)



شکل ۳- زیرحوضه (۱) با تعداد بسیار محدود پایشنگ و زیرحوضه (۲) با تعداد بسیار زیاد پایشنگ (سال ۱۴۰۲)
Figure 3- Sub-watershed (1) with limited number of pipings and sub-watershed (2) with large number of pipings (2023)

و عرضی ۸۵ درصد برداشت شد. پس از حذف تصاویر نامناسب، پردازش در نرم‌افزار Context Capture انجام گرفت که نتیجه آن تولید ابرنقاط، ارتوفتو و DEM در پیکسل‌هایی به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر بود (شکل ۶). سپس با استفاده از تصاویر پهپادی و روش طبقه‌بندی نظارت‌شده در محیط ArcGIS 10.3 و داده‌های میدانی، نقشه کاربری اراضی تهیه شد. برای تحلیل ارتباط پایبینگ با ویژگی‌های توپوگرافی، نقشه شیب و ارتفاع در دو زیرحوضه استخراج و در ادامه با استفاده از بسته ggplot2 در نرم‌افزار R نمودارهای چگالی ترسیم شدند و توزیع و تفاوت الگوی شیب و ارتفاع در مناطق با و بدون پایبینگ به صورت بصری مقایسه شد.



شکل ۶- ارتوفتو حاصل پردازش تصاویر پهپادی (سال ۱۴۰۲)
Figure 6- Orthophoto derived from UAV image processing (2023)

برای بررسی دینامیک فرسایش و رسوب در نهشته‌های لسی منطقه، از دو DEM حاصل از داده‌های پهپادی چندزمانه استفاده شد. نقشه‌ی اول مربوط به پرواز اخیر این پژوهش و نقشه‌ی دوم حاصل پرواز تیر ماه ۱۳۹۸ توسط تیم پژوهشی این مطالعه، با مشخصات و پارامترهای پروازی مشابه است. جهت حذف خطاهای مکانی و اطمینان از همخوانی هندسی، هر دو مدل در محیط ArcGIS 10.3 با وضوح مکانی یکسان، هم‌مرجع‌سازی و زمین‌مرجع شدند. سپس با بهره‌گیری از روش DoD، اختلاف ارتفاعی بین دو مدل در سطح پیکسلی محاسبه شد. در این روش کاهش ارتفاع نشان‌دهنده فرسایش و افزایش ارتفاع بیانگر رسوب‌گذاری است. نقشه‌های تولیدشده شامل توزیع مکانی فرسایش و رسوب و نرخ میانگین سالانه‌ی آن‌ها بودند تا مناطق فعال و ارتباط مکانی میان پایبینگ‌ها با فرآیند فرسایش در بازه‌ی زمانی چهار ساله مشخص شود. همچنین با توجه به ثبت موقعیت دقیق پایبینگ‌ها در هر دو سال، موقعیت این عوارض به صورت فایل نقطه‌ای در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 مقایسه و تحلیل شد. شکل ۷ نمودار جریانی مراحل روش پژوهش را نشان می‌دهد.

علاوه بر ثبت موقعیت پایبینگ‌ها، آمار تعداد و مکان پایبینگ‌های با و بدون پوشش گیاهی همراه با نوع گونه گیاهی موجود ثبت شد. به منظور بررسی خصوصیات خاک‌شناسی، نمونه‌برداری خاک از چندین نقطه در هر دو زیرحوضه انجام و با استفاده از روش هیدرومتری (آزمایشگاه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان) بافت خاک تعیین شد. شکل ۴ تصاویری از بررسی حضور یا عدم حضور، نوع گونه‌های گیاهی موجود در داخل پایبینگ‌ها و نمونه‌برداری از خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمونه‌برداری از خاک و ثبت پوشش گیاهی موجود در پایبینگ‌ها (سال ۱۴۰۲)

Figure 4- Soil sampling and survey of existing vegetation in pipings (2023)

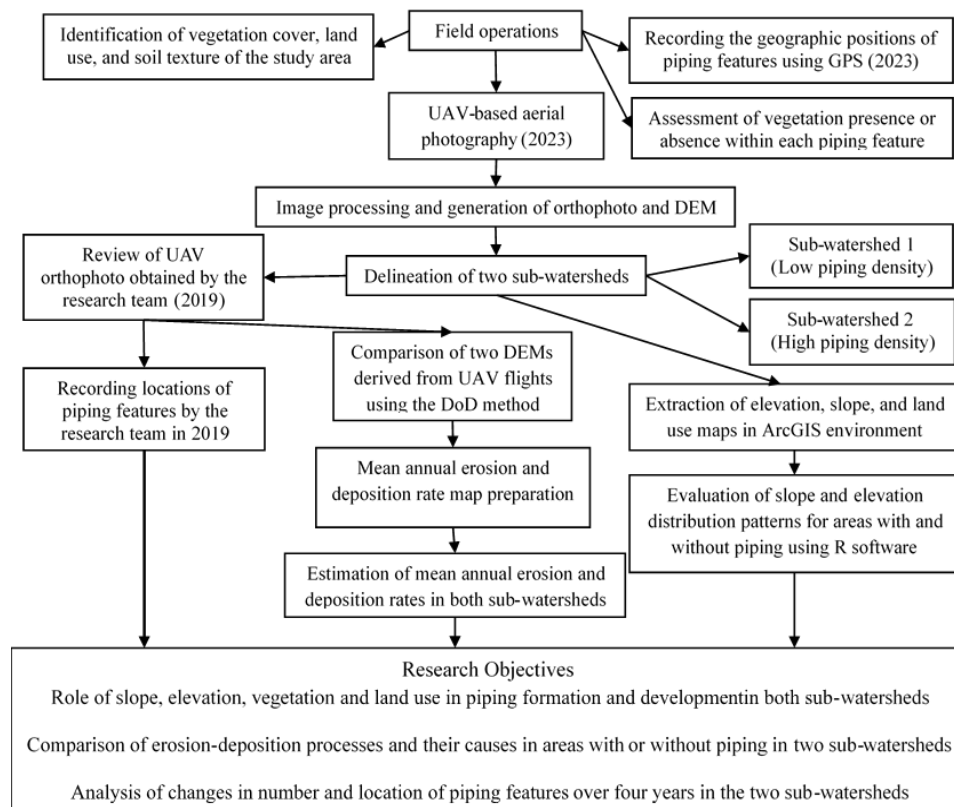
۳-۲- پرواز پهپاد

پیش از انجام پرواز، به منظور ثبت موقعیت مکانی نقاط کنترل زمینی، مختصات نقاط توسط دستگاه GPS دو فرکانسه ثبت و سپس با استفاده از نرم‌افزار Trimble Business Center پردازش شد (Vega et al., 2015; Mlambo et al., 2017). تصاویر با استفاده از پهپاد فانتوم ۴ پرو با قدرت تفکیک دوربین ۲۰ مگاپیکسل اخذ شد (شکل ۵). جهت انجام کالیبره‌های پهپاد از نرم‌افزار DJI 4D استفاده شد و مسیر پرواز با نرم‌افزار Pix4d مشخص شد.



شکل ۵- تصویر پهپاد مورد استفاده
Figure 5- The UAV employed in this research

۲ تا ۵ تیر ماه ۱۴۰۲ با پرواز پهپاد در ارتفاع حدود ۱۰۰ متر و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، حدود ۱۷۵۰ تصویر با همپوشانی طولی ۷۰



شکل ۷- نمودار جریان روش کار پژوهش

Figure 7- Flowchart of the methodology

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایشات نشان‌دهنده بافت خاک سیلتی لومی در دو زیرحوضه مطالعاتی است. با توجه به بالا بودن درصد سیلت، خاک منطقه مطالعاتی پتانسیل زیادی برای وقوع فرسایش و گسترش عارضه‌های فرسایشی دارد. همان‌طور که در جدول ۱ ارائه شده است؛ درصد نمونه‌های خاک با بافت سیلتی در زیرحوضه (۱) و (۲) به ترتیب ۷۵ و ۸۰ درصد است. بنابراین، بخش عمده نمونه‌ها در هر دو زیرحوضه دارای بافت سیلتی هستند، که با مطالعه Hosseinalizadeh et al. (2025b) نیز همخوانی دارد؛ زیرا آن پژوهش محتوای سیلت بسیار بالا را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های حساسیت خاک‌های لسی به فرسایش و ایجاد پایپینگ گزارش کرده است.

جدول ۱- درصد نمونه‌های خاک با بافت سیلتی و لومی در دو

زیرحوضه

Table 1 - Percentage of soil samples with silty and loamy textures in the studied sub-watersheds

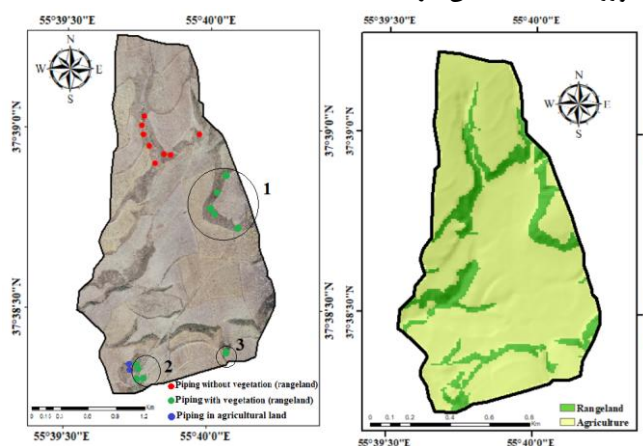
Sub-watershed	Number of soil samples	Percentage of silty samples	Percentage of loamy samples
1	8	75	25
2	2	80	20

شکل‌های ۸ و ۹، نقشه کاربری اراضی و پایپینگ‌هایی که در کاربری کشاورزی و مرتع (با حضور و عدم حضور پوشش گیاهی

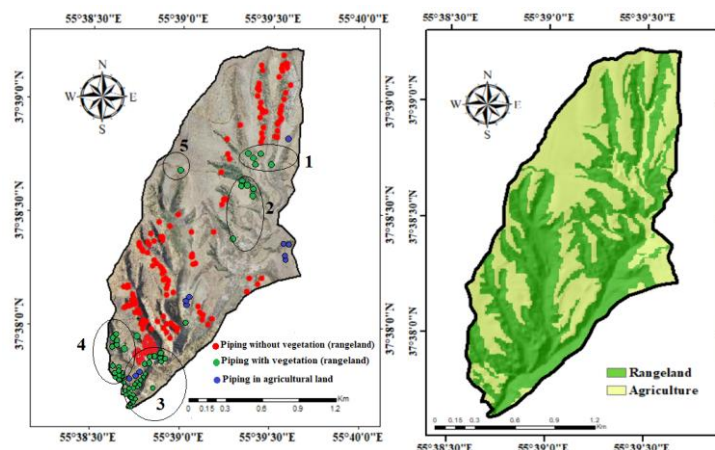
داخل پایپینگ) وجود دارند را در دو زیرحوضه نشان می‌دهند. در این شکل کاربری مرتع با سبز پررنگ و کاربری کشاورزی با سبز کم‌رنگ نشان داده شده است. در هر دو زیرحوضه، کاربری کشاورزی شامل کشت دیم گندم، جو و کلزا است و گیاهان غالب موجود در نواحی مختلف کاربری مرتع در ادامه شرح داده می‌شود. بر اساس شکل ۸، ۸۵ درصد مساحت زیر حوضه (۱) دارای کاربری کشاورزی است. کاربری مرتع در ناحیه شمالی زیرحوضه (۱) عمدتاً شامل گونه‌های علفی خودرو و یکساله و تعداد بسیار محدودی نیزار، قسمت شرق دارای گراس و نیزار، ناحیه جنوبی زیرحوضه نیزار، گراس و انجیر وحشی و قسمت غرب زیرحوضه با پوشش گیاهی غالب درختچه انار و سیاه تلو است. تراکم پایپینگ (تعداد پایپینگ در هکتار به‌صورت درصد) در زیرحوضه (۱)، ۱۰ درصد برآورد شد. نقشه سمت چپ نشان می‌دهد که از ۲۰ عدد پایپینگ تنها ۲ عدد در کاربری کشاورزی (آبی رنگ) و ۱۸ پایپینگ در کاربری مرتع قرار دارند که از بین آنها ۵ پایپینگ در شرق دارای پوشش محدود گراس (شماره ۱) و ۴ پایپینگ در قسمت جنوبی حوضه دارای نیزار و تعداد بسیار محدود انجیر وحشی (شماره ۲) و یک پایپینگ (شماره ۳) دارای پوشش گیاهی سیاه تلو و انجیر وحشی است. بنابراین، به‌طور کلی از ۱۸ پایپینگ در کاربری مرتع، ۱۰ پایپینگ دارای پوشش گیاهی هستند.

مدیریت مرتعی و علاوه بر آن فعالیت‌های کشاورزی مانند عملیات خاک‌ورزی و جابجایی خاک برای آماده‌سازی زمین است که به نوعی موجب کاهش، مخفی یا پر شدن پایبینگ‌ها در اراضی کشاورزی می‌شود. بنابراین، تعداد پایبینگ مشاهده شده در زمین‌های کشاورزی کمتر از واقعیت است. اما بر اساس مطالعه‌ای که توسط Hosseinalizadeh et al., (2025a) صورت گرفته است؛ ابعاد پایبینگ‌ها در کاربری کشاورزی ممکن است بزرگ‌تر باشند. لازم به ذکر است که تغییر کاربری اراضی طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ بررسی شد و هیچ تغییری بین اراضی مرتع و کشاورزی مشاهده نشد. بنابراین، تغییر کاربری تأثیری در تفاوت تعداد پایبینگ‌ها بین دو سال (۱۳۹۸-۱۴۰۰) نداشته است. تأثیر پوشش گیاهی و کاربری اراضی بر ایجاد و گسترش پایبینگ توسط Rodzik et al., (2024) نیز تأیید شده است. ایشان با بررسی تأثیر کاربری اراضی، پوشش گیاهی و مداخلات کشاورزی در ایجاد و فعال شدن پایبینگ‌ها در نهشته‌های لسی لهستان نتیجه گرفتند که ضعیف شدن پوشش گیاهی و الگوی خاک‌ورزی نامناسب منجر به تولید رواناب بیشتر و ایجاد و گسترش پایبینگ‌ها می‌شود و بیان نمودند کاشت گیاهان دائمی و ایجاد کمربندهای پوشش گیاهی در بین زمین‌های زراعی و مدیریت کاربری اراضی از مهمترین ابزارهای کاهش فرسایش شدید و گسترش پایبینگ‌ها است. همچنین Bai et al. (2024) به بررسی تأثیر بازسازی پوشش گیاهی بر رواناب و فرسایش رسوب در چندین حوضه مطالعاتی و با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تحلیل آماری در فلات لسی پرداختند. مقایسه بین سایت‌های بازسازی شده و سایت‌های کنترل در این مطالعه نیز نشان داد که بهبود پوشش گیاهی منجر به تغییر در رواناب، کاهش فرسایش و تلفات خاک می‌شود.

شکل ۹ نشان می‌دهد که در زیرحوضه (۲)، برعکس زیر حوضه (۱)، مساحت کاربری مرتع با میزان ۷۰ درصد غالب است. در این زیرحوضه، پوشش گیاهی غالب مرتعی ناحیه شمالی، گونه‌های علفی خودرو و یکساله و تعداد محدود نیزار، ناحیه شرق سیاه تلو و نیزار، شمال غربی حوضه دارای گراس و نیزار، ناحیه غرب دارای گیاهان علفی خودرو و یکساله و قسمت جنوبی حوضه بیشترین تراکم پوشش گیاهی را دارا است که این پوشش گیاهی شامل درختچه انار به صورت غالب در کنار سیاه تلو و انجیر وحشی است. تراکم پایبینگ در زیرحوضه (۲)، ۵۵ درصد برآورد شد. نقشه سمت چپ حاکی از آن است که از ۲۰۹ پایبینگ، ۱۱ عدد در کاربری کشاورزی (آبی رنگ) و ۱۹۸ پایبینگ در کاربری مرتع قرار دارند و در میان آن‌ها در ناحیه شرقی ۵ پایبینگ دارای نیزار (شماره ۱) و ۶ پایبینگ با پوشش غالب سیاه‌تلو (شماره ۲) قرار دارند. قسمت جنوبی زیرحوضه شامل بیشترین تعداد پایبینگ با پوشش گیاهی متراکم است. تعداد زیادی پایبینگ دارای درختچه انار (شماره ۳) و مابقی پایبینگ‌ها دارای گیاه سیاه تلو و انجیر وحشی هستند (شماره ۴) و یک پایبینگ در شمال غرب دارای نیزار است (شکل ۵). بنابراین، به جز ناحیه جنوبی زیرحوضه، غالب پایبینگ‌ها بدون پوشش گیاهی هستند. نتایج نشان داد که قسمت اعظم پایبینگ‌ها با اختلاف زیاد در کاربری مرتع قرار دارند بگونه‌ای که از کل ۲۲۹ پایبینگ در مجموع دو زیرحوضه، تعداد ۲۱۶ پایبینگ در کاربری مرتع ایجاد شده‌اند که این امر اهمیت کاربری اراضی را در ایجاد و گسترش عوارض فرسایشی نشان می‌دهد. همچنین از بین ۲۱۶ پایبینگ تعداد ۵۸ عدد دارای پوشش گیاهی در مرتع هستند که اغلب در ناحیه جنوبی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که بیان شد، تعداد پایبینگ‌های موجود در کاربری مرتع به مراتب بیشتر از کاربری کشاورزی است. علت این امر ضعف



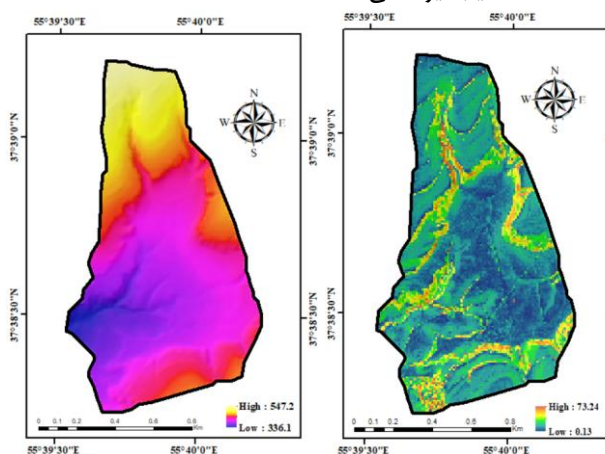
شکل ۸- نقشه کاربری اراضی (راست) و نقشه موقعیت پایبینگ‌ها با و بدون گیاه در کاربری مرتع و کشاورزی (چپ) در زیرحوضه (۱)
Figure 8- Land use map (right) and the map of piping locations with and without vegetation in rangeland areas and piping occurrences in agricultural land (left) in sub-watershed (1)



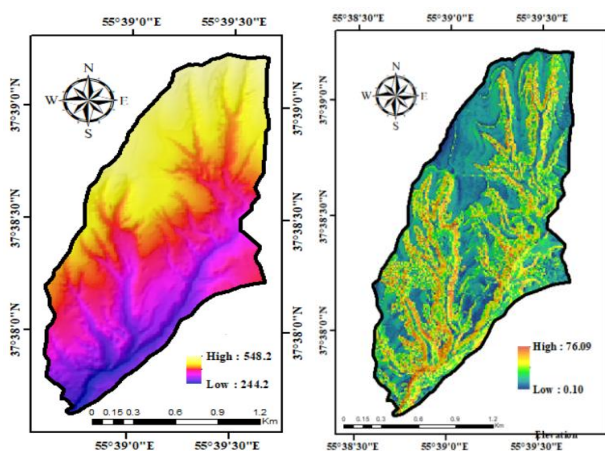
شکل ۹- نقشه کاربری اراضی (راست) و نقشه موقعیت پایپینگ‌ها با و بدون گیاه در کاربری مرتع و کشاورزی (چپ) در زیرحوضه (۲)
Figure 9- Land use map (right) and the map of piping locations with and without vegetation in rangeland areas and piping occurrences in agricultural land (left) in sub-watershed (2)

از آن است که در زیرحوضه (۱) و (۲) به ترتیب حداکثر شیب ۷۳ و ۷۶ درجه و حداقل شیب حدود صفر است.

شکل ۱۰ و ۱۱ نقشه شیب و ارتفاع را در دو زیرحوضه نشان می‌دهند. بر این اساس ارتفاع در زیرحوضه (۱)، ۵۴۷ تا ۳۳۶ متر و در زیرحوضه (۲)، ۵۴۸ تا ۲۴۴ متر است. نقشه شیب نیز حاکی



شکل ۱۰- نقشه شیب (راست) بر حسب درجه و نقشه ارتفاع (چپ) بر حسب متر در زیرحوضه (۱)
Figure 10- Slope map (right) in degrees and elevation map (left) in meters in sub-watershed (1)

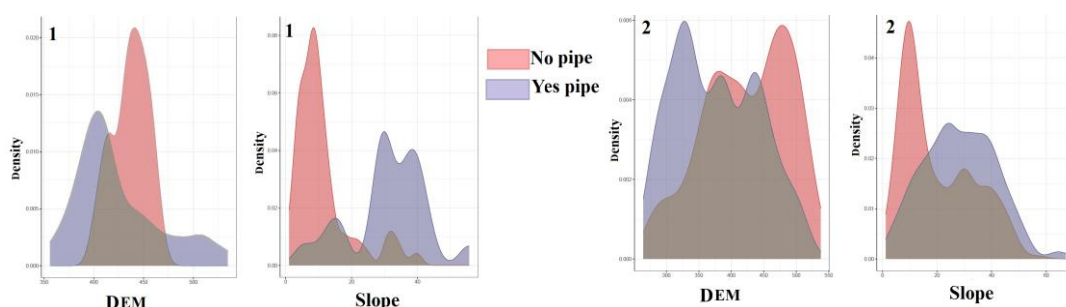


شکل ۱۱- نقشه شیب (راست) بر حسب درجه و نقشه ارتفاع (چپ) بر حسب متر در زیرحوضه (۲)
Figure 11- Slope map (right) in degrees and elevation map (left) in meters in sub-watershed (2)

تسريع می‌شود. این یافته با نتایج مطالعات پیشین نیز همخوان است. برای مثال، Zakerinejad and Maerker (2015) استفاده از مدل‌سازی فرآیندهای فرسایشی و تحلیل داده‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی نشان دادند که شیب از مؤثرترین عوامل کنترل‌کننده شکل‌گیری و توسعه عوارض فرسایشی به‌ویژه آبکندها است. همچنین، Bao et al. (2024) با انجام آزمایش‌های میدانی و تحلیل رطوبت خاک در دامنه‌های لسی با شیب‌های مختلف گزارش دادند که شیب‌های تندتر به دلیل تغییرات سریع‌تر رطوبتی، افزایش گردان هیدرولیکی و کاهش پایداری ساختاری، استعداد بیشتری برای شروع فرسایش زیرسطحی و گسترش پایپینگ دارند. در پژوهشی دیگر توسط Wang et al. (2024)، با داده‌های پهنای و مدل‌های یادگیری ماشین در فلات لسی چین، شیب زمین را به عنوان مهم‌ترین متغیر مؤثر در بروز آبکند شناسایی کردند. بدین ترتیب، هم‌سویی این مطالعات بیانگر آن است که فرآیندهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی ناشی از شیب، از محرک‌های کلیدی در آغاز و گسترش عارضه‌های مختلف از جمله پایپینگ به شمار می‌روند. بنابراین ویژگی‌های گوناگون پستی و بلندی و کاربری اراضی یک منطقه، از مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری و توسعه عوارض فرسایشی هستند و گنجاندن این عوامل در پیش‌بینی و مدیریت، دقت بررسی آسیب‌پذیری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این نتایج با پژوهش‌های پیشین، از جمله Verachtert et al. (2010)، Bernatek-Jakiel and Poesen (2018)، Arabameri et al. (2020) و Kariminejad et al. (2020) همخوانی دارد.

با مقایسه آستانه‌های عددی پارامترهای ارتفاع و شیب که در آن‌ها تراکم حضور پایپینگ بیشتر است با مکان‌های بدون پایپینگ، نتایج زیر توسط نمودارهای چگالی حاصل گشت (شکل ۱۲). در زیر حوضه (۱) (شماره ۱)، تحلیل آماری ارتفاع نشان می‌دهد که تراکم پایپینگ‌ها (قله نمودار بنفش) در مناطق با ارتفاع پایین (۳۷۰-۴۱۰ متر) حداکثر است و برعکس حداکثر تراکم مکان‌های بدون پایپینگ (قله نمودار قرمز) در ارزش ارتفاعی بالاتری (۴۳۰-۴۷۰ متر) قرار دارند. نقشه شیب بیان می‌کند که مناطق با پایپینگ در شیب بیشتر و تندتر (۲۵-۳۵ درجه) و مکان‌های بدون پایپینگ در شیب ملایم‌تر (۵-۱۵ درجه) قرار دارند.

در زیرحوضه (۲) (شماره ۲)، مکان‌هایی که دارای تراکم بالایی از عارضه پایپینگ هستند؛ در ارتفاع کمتر (۳۰۰-۳۴۰ متر) و برعکس مکان‌های با ارتفاع بالا بدون عارضه پایپینگ هستند (۴۵۰-۴۹۰ متر). نقشه شیب نیز حاکی از این است که مکان‌های با تراکم بالا پایپینگ در شیب تندتر (۲۵-۳۵ درجه) و حداکثر تراکم مناطق بدون پایپینگ در شیب ملایم (۵-۱۵ درجه) قرار دارند. بنابراین، در مناطقی با ارتفاع کمتر، احتمال رخداد پایپینگ بیشتر است. مقایسه دو زیرحوضه نیز این امر را ثابت می‌کند؛ زیرا در زیرحوضه (۲) با تعداد و تراکم زیاد پایپینگ، متوسط ارتفاعی مناطق دارای پایپینگ (۳۲۰ متر)، کمتر از همین مناطق در زیرحوضه (۱) (۳۹۰ متر) است. همچنین نتایج این پژوهش نقش اساسی شیب زمین را در کنترل آغاز و گسترش عارضه‌های فرسایشی با حضور و تراکم بیشتر پایپینگ‌ها در شیب تندتر، نشان داد. زیرا شیب تندتر باعث افزایش سرعت رواناب سطحی و تنش برشی می‌شود که در نتیجه فرآیند جداشدگی و انتقال ذرات خاک



شکل ۱۲- مقایسه آستانه‌های عددی ارتفاع و شیب در حضور و عدم حضور پایپینگ در زیرحوضه (۱) و (۲)
Figure 12- Comparison of elevation and slope thresholds in the presence and absence of piping in sub-watersheds (1) and (2)

در تحلیل DoD بسیار ناچیز دیده شد و بدون اعمال LoD تغییرات واقعی به وضوح تفکیک شدند. بر اساس شکل ۱۳، در هر دو زیرحوضه فرآیندهای فرسایش و رسوب به‌صورت همزمان رخ می‌دهند ولی میزان وسعت درگیر فرآیند فرسایشی، متفاوت است. در این نقشه، رنگ زرد غالب بودن فرسایش و رنگ آبی

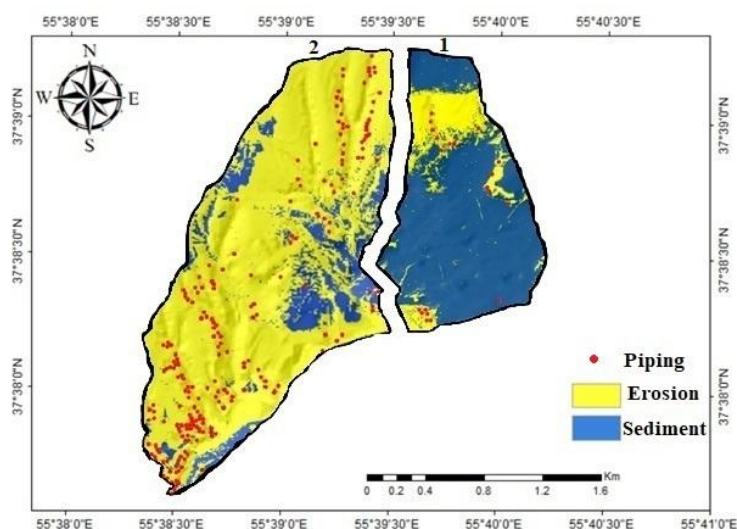
با بررسی اختلاف DEM‌های دو پرواز، نقشه طبقه فرسایش و رسوب برای تفسیر فضایی در دو زیرحوضه بدست آمد. لازم به ذکر است که در این پژوهش با توجه به دقت بالا تصاویر پهنای DEM با وضوح ۵ سانتی‌متر، نقاط کنترل زمینی متعدد و بررسی کیفیت و دقت داده‌ها در تمام مراحل جمع‌آوری و تحلیل، اثر خطا

پایپینگ‌ها در نواحی شمال، شمال‌شرق، جنوب و جنوب غربی پتانسیل بالای فرسایش در این ناحیه را تأیید می‌کنند. در شمال غرب با وجود فرآیند رسوب، پایپینگ تشکیل نشده است. قسمت مرکزی به سمت جنوب و کل ناحیه جنوب با فرآیند فرسایشی شدید، بیشترین تراکم پایپینگ وجود دارد. به‌طور کلی در مناطق با حضور متراکم پایپینگ فرسایش غالب است. اما در انتهایی‌ترین نواحی جنوب‌شرقی و لکه‌هایی در جنوب زیرحوضه (۲) با وجود تراکم زیاد پایپینگ، در ما بین محل قرارگیری این عارضه، به‌صورت محدود فرآیند رسوب وجود دارد. بر اساس بازدیدهای میدانی، بررسی تصاویر پهپاد و ثبت پوشش گیاهی غالب در دو زیرحوضه، از علل اصلی این امر حضور پوشش گیاهی قوی در حاشیه و دیواره داخلی اکثر پایپینگ‌های و یا کاربری کشاورزی (حضور محصولات یا بقایای آن‌ها) در این ناحیه است. پایپینگ‌های این قسمت به‌صورت غالب دارای درختچه انار و با تراکم کمتر سیاه تلو و انجیر وحشی هستند. بنابراین، علی‌رغم فرسایش بالا در این مکان، اثراتی از رسوب با شدت متوسط قابل مشاهده است. شکل ۱۴، نمایی از پایپینگ‌های با پوشش گیاهی متراکم این محدوده را نشان می‌دهد. همچنین در قسمت شرق و جنوب شرقی با فرآیند غالب رسوب، به جز تعداد بسیار محدود، عارضه پایپینگ مشاهده نمی‌گردد. شایان ذکر است تطابق محل قرارگیری پایپینگ‌ها با مناطقی فرسایشی و برعکس مکان‌هایی با عدم حضور پایپینگ‌ها که به‌صورت فرآیند رسوب پیش‌بینی شدند؛ نشان داد که روش اختلاف ارتفاع در بازه‌های زمانی مختلف به ویژه با داده‌های دقیق پهپاد دقت بالایی در پایش و مدیریت فرسایش و رسوب دارد.

غالب بودن رسوب را نشان می‌دهد که بر پایه مقایسه برآیند ارتفاعی بین دو سال ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ تعیین شده‌اند. با وجود هم‌جوار بودن دو زیر حوضه، تفاوت بسیار زیادی در فرآیند فرسایش و رسوب قابل مشاهده است که در ادامه به تفسیر آن پرداخته می‌شود.

بر اساس شکل ۱۳، در قسمت اعظم زیر حوضه (۱) فرآیند رسوب رخ داده است. به‌طوری‌که به جز مناطق محدود شامل: نواری در ناحیه شمالی نزدیک به مرکز و مناطق بسیار کوچک‌تری در شرق و جنوب‌غربی با فرآیند غالب فرسایش، مابقی زیرحوضه (مرکز، شرق، غرب و قسمت اعظمی از جنوب) فرآیند رسوب شدیدتر است. بر این اساس ۷۲ درصد از مساحت زیرحوضه (۱) رسوب و ۲۸ درصد از سطح فرسایش را نشان می‌دهد. قسمت اعظم زیرحوضه (۲) شامل شمال، مرکز، غرب و جنوب دچار فرآیند فرسایش و نواحی محدودتری در شرق و شمال‌غرب و با وسعت کمتر در جنوب و جنوب‌غربی درگیر رسوب هستند. خروجی نشان داد که ۷۷ درصد از سطح زیرحوضه (۲)، فرآیند فرسایش و ۲۳ درصد فرآیند رسوب حاکم است.

شکل ۱۳، امکان ارزیابی موقعیت قرارگیری پایپینگ‌ها را در نقشه توزیع مکانی فرآیند فرسایش و رسوب نیز فراهم می‌کند. بر این اساس، شمالی‌ترین ناحیه زیرحوضه (۱) با فرآیند غالب رسوب عاری از پایپینگ است. با حرکت به سمت مرکز، حضور تعداد پایپینگ‌ها مستعد بودن این ناحیه را جهت فرسایش تأیید می‌کند. این امر در نوار ناحیه شرقی و جنوب غرب نیز با حضور پایپینگ‌ها قابل مشاهده است. مابقی قسمت‌ها که فرآیند رسوب غالب است نیز پایپینگ تشکیل نشده است. در زیرحوضه (۲) نیز حضور



شکل ۱۳- نقشه توزیع مکانی فرسایش و رسوب در زیر حوضه (۱) و (۲) و مقایسه موقعیت مکانی پایپینگ‌ها با فرآیند فرسایش و رسوب
Figure 13- Spatial distribution maps of erosion and sediment in sub-watersheds (1) and (2), and comparison of piping locations with erosion-sedimentation processes

و رسوب در موقعیت‌های مکانی مختلف در زیرحوضه (۱)، تغییرات شیب در سطح است. زیرا رواناب متناسب با شیب مناطق مختلف، با سرعت و توان گوناگون به سمت خروجی حرکت می‌کند. با توجه به نقشه شیب زیرحوضه (۱) (شکل ۱۰)، شمالی‌ترین بخش و مرکز این زیرحوضه دارای شیب کم (وجود رنگ غالب آبی و سبز) است و این امر منجر به حرکت کندتر و کم‌قدرت‌تر رواناب شده و با فرآیند رسوب غالب در این مناطق مطابقت دارد و شیب زیاد (رنگ زرد و قرمز) در ناحیه فرسایشی شدید (شمال در زیر منطقه رسوب، نوار نیم‌دایره در ناحیه شرقی و جنوب‌غربی) مجدداً تأییدی بر فرسایش بیشتر به دلیل افزایش سرعت و توان رواناب در این مناطق است. در نقشه ارتفاع این زیرحوضه (شکل ۱۰) نیز وجود کمترین ارتفاع در غرب، با شدت زیاد رسوب و عدم‌حضور متراکم پایبینگ‌ها در این نواحی تطابق دارد.

بر اساس شکل ۱۵ (شماره ۲)، در قسمت اعظم سطح زیرحوضه (۲)، فرآیند فرسایش شدید غالب است (۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال). شمال‌غرب و شمال‌شرق زیرحوضه با رنگ سبز به معنی وقوع ۵ تن بر هکتار در سال فرسایش و رسوب و رنگ آبی کم‌رنگ حاکی از ۵ تا ۱۵ تن بر هکتار در سال رسوب است. بنابراین در این مناطق فرسایش و رسوب با شدت کمتر رخ داده است و با توجه به برآیند دو فرآیند فرسایش و رسوب و نقشه طبقه‌بندی (شکل ۱۳)، رخداد رسوب غالب است. ناحیه شرقی زیرحوضه (۲) دچار رسوب شدید (آبی پررنگ) به میزان ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال است. حضور نوار باریک در انتهای‌ترین قسمت جنوب و جنوب‌شرق زیرحوضه (۲) با میزان رسوب ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال (رنگ آبی کم‌رنگ) نشان می‌دهد که حداکثر پتانسیل رسوب منطقه در این مکان رخ نداده است و این نقشه نیز منطبق بر شکل ۱۳ است که نشان داد با وجود حضور متراکم پایبینگ در این ناحیه، مکان‌هایی مابین آن‌ها به دلیل حضور پوشش گیاهی متراکم در پایبینگ‌ها رسوب رخ داده است. با توجه به نقشه شیب و ارتفاع زیرحوضه (۲) (شکل ۱۱)، شیب زیاد (رنگ زرد و قرمز) در جنوب و جنوب غربی و شمالی‌ترین ناحیه، منجر به افزایش توان رواناب شده و در نتیجه فرسایش ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال را در این نواحی توجیه می‌کند و حاکی از خروجی مناسب و قابل اعتماد روش DoD است. همچنین وجود کمترین ارتفاع در جنوب (رنگ بنفش) منطبق بر فرسایش شدید، کاربری مرتع و تراکم بالا پایبینگ‌ها در این ناحیه و بیشترین ارتفاع (رنگ زرد) در شمال‌شرق زیرحوضه نیز منطبق بر فرآیند رسوب، کاربری کشاورزی و عدم‌حضور پایبینگ در این ناحیه است.

شکل ۱۶، تصاویری از کاربری‌ها، شیب‌های گوناگون و حضور و عدم‌حضور پایبینگ‌ها را در هر دو زیرحوضه نشان



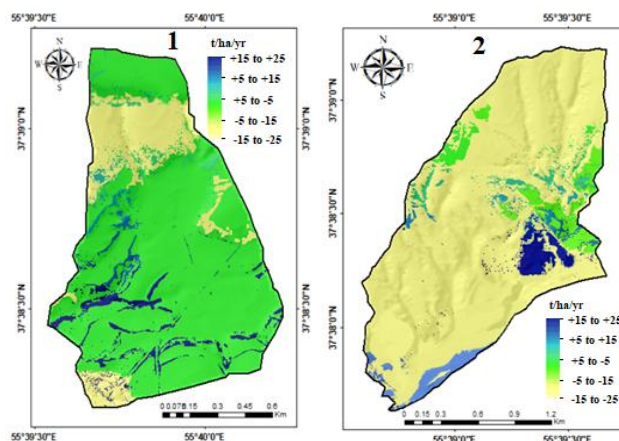
شکل ۱۴- پایبینگ‌های با پوشش گیاهی درختچه‌ای متراکم در جنوب زیرحوضه (۲)

Figure 14- Piping features with dense vegetation cover in the southern part of sub-watershed (2)

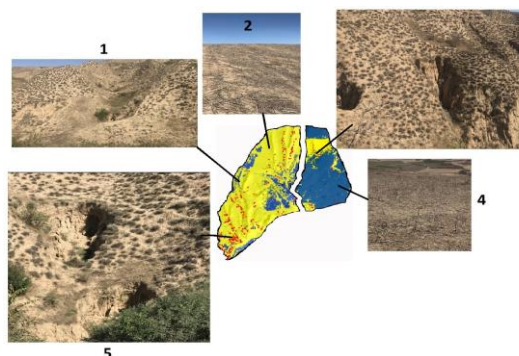
شکل ۱۵، میانگین نرخ فرسایش و رسوب را در هر دو زیرحوضه نشان می‌دهد. بر اساس راهنمای نقشه، مقادیر مثبت معرف افزایش ارتفاع یا رسوب‌گذاری و مقادیر منفی بیان‌گر کاهش ارتفاع یا فرسایش است. آبی پررنگ موقعیت مکانی شدیدترین میزان رسوب و رنگ زرد وقوع شدیدترین فرسایش را به میزان ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال نشان می‌دهند. با تغییر رنگ آبی پررنگ به رنگ سبز، از شدت رسوب کاسته می‌شود. بگونه‌ای که رسوب متوسط با رنگ آبی کم‌رنگ و به میزان ۵ تا ۱۵ تن بر هکتار در سال برآورد گردیده است. با میل از رنگ سبز به سمت زرد، شدت فرسایش بیشتر شده و میزان فرسایش متوسط ۵ تا ۱۵ تن بر هکتار در سال محاسبه گردید. رنگ سبز در نقشه حاکی از وقوع فرسایش و رسوب به شکلی متعادل تر و با شدت کمتر است. تغییر ارتفاع این نواحی بین ۵ تن بر هکتار در سال برای فرسایش و رسوب در نوسان است. بنابراین به‌صورت متوسط میزان خاک جابه‌جا شده توسط هر دو فرآیند فرسایش و رسوب کمتر و نزدیک به هم هستند و عملاً تغییر ارتفاع چشمگیر برای تشکیل عوارض فرسایشی با تراکم بالا رخ نمی‌دهد. شکل ۱۵ (شماره ۱) نشان می‌دهد که سطح کمی از زیرحوضه (۱) با حداکثر فرسایش منطقه به میزان ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال روبه‌رو است (ناحیه شمالی در زیر منطقه رسوب، مناطق محدودی در شرق و جنوب غربی) و قسمت اعظم زیرحوضه فرآیند فرسایش و رسوب هر دو با شدت کمتر و نزدیک به هم رخ می‌دهند (رنگ سبز) که البته با توجه به شکل ۱۳ شدت یا تغییر ارتفاع خاک ناشی از رسوب در این مکان بیشتر است و این رسوب با حضور رگه‌های آبی پررنگ در قسمت جنوب و به‌ویژه غرب زیرحوضه به میزان ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال به اوج خود می‌رسد. رنگ آبی کم‌رنگ نیز در چندین نقطه در این زیرحوضه قابل مشاهده است که حاکی از فرسایش کمتر از حداکثر به میزان ۵ تا ۱۵ تن بر هکتار در سال است. از عوامل اصلی اختلاف میانگین فرسایش

پایپینگ مشخص است. شکل های شماره ۲ و ۴ نیز کاربری کشاورزی که توسط پوشش کلزا پوشانده شده است را در دو زیرحوضه نشان می دهند که هیچ پایپینگی در کل دو دامنه وجود ندارد.

می دهد. شکل شماره ۱ تصویری از دامنه رو به شمال و با شیب بسیار کم را در موقعیت نشان شده در زیرحوضه (۲) نشان می دهد. شکل های شماره ۳ و ۵ حضور پایپینگ ها در دامنه جنوبی در دو زیرحوضه را نشان می دهند که شیب زیاد در این دامنه ها و تشکیل



شکل ۱۵- نقشه نرخ میانگین سالانه فرسایش و رسوب در زیرحوضه ۱ (شماره ۱) و ۲ (شماره ۲) برحسب تن بر هکتار در سال
Figure 15- Annual mean erosion and sedimentation rate map for Sub-watersheds 1 and 2 (t/ha/yr)

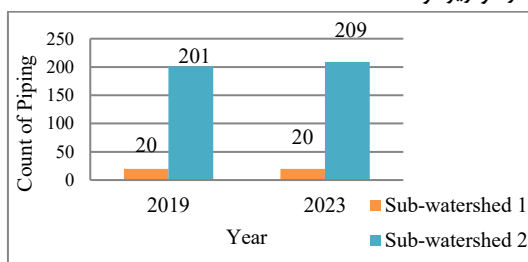


شکل ۱۶- تصاویری از شیب ها و کاربری های گوناگون همراه با حضور و عدم حضور پایپینگ در نواحی مختلف
Figure 16- Field images showing different slopes and land use types with and without piping

پایپینگ از بین رفته در کاربری کشاورزی قرار دارند. بنابراین به دلیل خاکورزی و با هدف کاشت محصول، زیر و رو شدن خاک و در نتیجه مخفی شدن یا پر شدن پایپینگ ها رخ داده است. لازم به ذکر است که در نقشه شیب این مناطق با رنگ آبی به معنی شیب بسیار کم نشان داده شده است و بر اساس نقشه نرخ میانگین فرسایش و رسوب، هر دو فرآیند با شدت بسیار کمتر رخ داده اند و طبق نقشه توزیع مکانی، رسوب بیشتر از فرسایش رخ داده است. در نتیجه این عوامل باعث عدم حضور این دو پایپینگ شده است. بنابراین، سایر پایپینگ های موجود در این زیرحوضه در هر دو سال بدون تغییر در موقعیت ثابت بوده و افزایش ۲ پایپینگ و نبود ۲ عارضه نشان می دهد که در زیرحوضه (۱) به جای تغییر در تعداد (نرخ افزایش صفر)، تغییرات بیشتر از نوع مکانی و مرتبط با نوع کاربری و شیب رخ داده است.

در این پژوهش، تغییرات تعداد و موقعیت پایپینگ ها در سال ۱۴۰۲ نسبت به سال ۱۳۹۸ در دو زیرحوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل های ۱۷ و ۱۸ موقعیت پایپینگ ها در سال ۱۴۰۲ با رنگ قرمز و در سال ۱۳۹۸ با رنگ زرد مشخص شده است. بر اساس شکل ۱۷، در زیر حوضه (۱) تعداد ۲ پایپینگ (رنگ قرمز) از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۰۲ در کاربری مرتع و در مناطق با شیب زیاد (رنگ نارنجی) ایجاد شده اند. بدین علت که در این ناحیه گونه های علفی یکساله بسیار محدود وجود دارد و در نتیجه هیچ پوشش گیاهی حفاظتی در این محدوده نیست و با توجه به نقشه فرسایش و رسوب (شکل ۱۳ و شکل ۱۵) در این ناحیه فرسایش شدید رخ داده است. بنابراین، مجموع این عوامل منجر به ایجاد دو عارضه پایپینگ در این زیرحوضه شده است. علاوه بر آن ۲ پایپینگ (رنگ زرد) در قسمت مرکزی و جنوب شرق زیرحوضه که در سال ۱۳۹۸ وجود داشتند؛ در سال ۱۴۰۲ دیده نشدند. این ۲

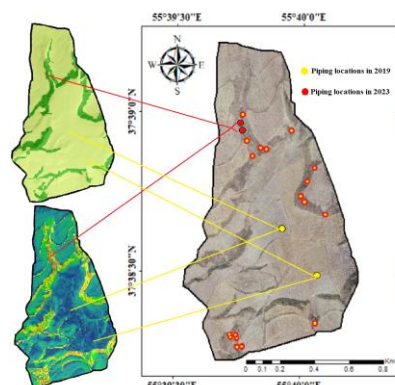
گرفته‌اند و بقیه پاپینگ‌ها تغییری نکرده‌اند. اضافه شدن ۸ پاپینگ نشان‌دهنده رشد خالص با نرخ افزایش حدود ۴ درصد در بازه زمانی چهار ساله است. در نهایت تطابق وسعت زیاد مناطقی با فرسایش شدید در زیرحوضه (۲) نسبت به زیرحوضه (۱) با تغییر تعداد پاپینگ‌ها نشان می‌دهد که نقشه فرسایش و رسوب تهیه شده به روش DoD با داده‌های دقیق پهباد، دقت زیادی دارد و اهمیت و ضرورت استفاده از این روش جهت اقدامات مدیریتی برای کنترل فرسایش و ایجاد عوارض فرسایشی نظیر پاپینگ را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ حاکی از تغییرات تعداد پاپینگ‌ها طی ۴ سال در دو زیرحوضه است.



شکل ۱۹- تغییرات ۴ ساله تعداد پاپینگ‌ها در دو زیرحوضه

Figure 19- 4-year changes in piping counts in two sub-watersheds

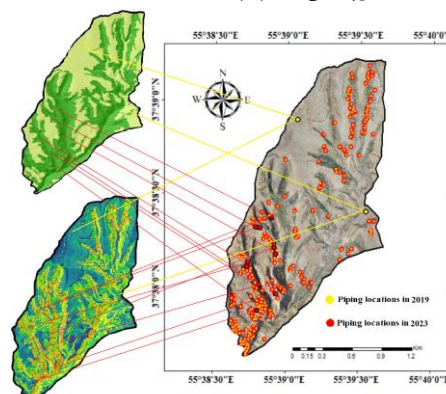
نتایج مذکور با پژوهش‌های بین‌المللی همخوانی دارد، اما پژوهش حاضر با دقت مکانی و زمانی بالاتر و داده‌های واقعی بدون شبیه‌سازی و مدل‌سازی صورت گرفته است. به عنوان مثال (Lena et al., 2024)، با استفاده از بازسازی مدل‌های ارتفاعی گذشته از طریق روش SfM و تلفیق آن با داده‌های LiDAR جدید، نرخ فرسایش را در حدود ۱۲ تا ۲۰ تن بر هکتار در سال و (Liu et al., 2023) نیز با استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپی پلوتونیوم، نرخ میانگین فرسایش را در محدوده ۵/۱ تا ۴۰/۵ تن بر هکتار در سال گزارش کردند. دو مطالعه نشان دادند که شیب زیاد و کاهش پوشش گیاهی از مهم‌ترین محرک‌های فروپاشی پاپینگ و آبکند هستند. در مطالعه (Gu et al., 2024) نیز نقش شیب و پوشش گیاهی در ناحیه لسی غرب هنان را مبتنی بر مدل‌سازی و نمونه‌برداری مدل CSLE و اندازه‌گیری میانگین فرسایش سالانه بررسی نمودند و بیشترین فرسایش را در شیب‌های بالا گزارش کردند. (He et al., 2023). نیز با استفاده از مدل‌سازی بلندمدت در فلات لسی چین نشان دادند که تقویت پوشش گیاهی عامل اصلی کاهش نرخ فرسایش طی ۵۰ سال گذشته بوده است. این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر مبنی بر حداکثر میانگین سالانه فرسایش و رسوب ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال در بخش‌های با شیب بالا و پوشش گیاهی ضعیف مطابقت دارد، ولی تفاوت روش‌شناختی اساسی وجود دارد و به جای بررسی تغییرات مورفولوژیکی با بازسازی تاریخی سطح زمین، مدل‌سازی و نمونه‌برداری از تغییرات واقعی و ثبت شده به



شکل ۱۷- موقعیت مکانی پاپینگ‌ها در سال ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ در زیرحوضه (۱)

Figure 17- Locations of piping in 2019 and 2023 in sub-watershed 1

بر اساس شکل ۱۸، ۲ پاپینگ با رنگ زرد در نقشه مشخص شده است که حاکی از حضور این ۲ عارضه در سال ۱۳۹۸ و نبود آن‌ها در سال ۱۴۰۲ است. لازم به ذکر است این ۲ پاپینگ در کاربری کشاورزی و در شیب کم قرار داشته و بنابراین، دخالت انسانی در این کاربری و پرشدن پاپینگ‌ها همراه با کاهش توان رواناب برای ایجاد شکاف و حفره به دلیل شیب کم این دو منطقه منجر به نبود این دو پاپینگ بعد از ۴ سال شده است. فرآیند غالب رسوب در نقشه توزیع مکانی فرآیند فرسایش و رسوب (شکل ۱۳) نیز تأییدی بر عدم‌حضور این دو پاپینگ است. همچنین ۱۰ پاپینگ جدید (نقاط قرمز) در بخش مرکزی تا جنوبی زیرحوضه اضافه شده است. بررسی این ناحیه نشان می‌دهد که تمام آن‌ها در کاربری مرتع قرار دارند و به دلیل نبود پوشش گیاهی مترکم، غالب بودن پوشش علفی یک‌ساله، شیب زیاد، ارتفاع کم تا متوسط و به‌ویژه شدت بالای فرسایش (۱۵ تا ۲۵ تن در هکتار در سال)، این ۱۰ پاپینگ جدید ایجاد شده‌اند.



شکل ۱۸- موقعیت مکانی پاپینگ‌ها در سال ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ در زیرحوضه (۲)

Figure 18- Locations of piping in 2019 and 2023 in sub-watershed (2)

بر این اساس، طی چهار سال در زیرحوضه (۲)، ۲ پاپینگ در کاربری کشاورزی حذف و ۱۰ پاپینگ در کاربری مرتع شکل

کمک پهپاد استفاده شد. نتایج این پژوهش از نظر نقش شیب و پوشش گیاهی در شکل گیری پایپینگ با مطالعه Hosseinalizadeh et al. (2025a) نیز نشان دادند که پایپینگ ها در دامنه های شیب دار و نواحی دارای پوشش گیاهی ضعیف رخ می دهند. با این حال، تمرکز مطالعه مذکور عمدتاً بر پایش تغییرات هندسی پایپینگ و بررسی بازشدگی دهانه و ریزش سقف در گذر زمان بود و تحلیل ها بیشتر ماهیت توصیفی داشت. در مقابل پژوهش حاضر علاوه بر بررسی عوامل توپوگرافی و کاربری اراضی، با استفاده از روش DoD و داده های پهپادی چندزمانه، نرخ سالانه فرسایش و رسوب و پهنه های فعال فرسایشی را به صورت کمی و پیکسلی تعیین نمود. از این رو، این پژوهش امکان شناسایی مناطق اولویت دار برای مدیریتی و برنامه ریزی مؤثر جهت تثبیت پوشش گیاهی و کنترل گسترش پایپینگ را فراهم می سازد. بر این اساس، نوآوری اصلی این پژوهش در داده محور بودن و امکان شناسایی مستقیم و پیکسلی نواحی فعال فرسایش و رسوب است و از نظر کاربردی و حفاظتی برتری قابل توجه دارد.

۴- نتیجه گیری

هدف این پژوهش، بررسی نقش شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بر تشکیل و گسترش پایپینگ، ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی پایپینگ ها و نرخ میانگین فرسایش و رسوب در بازه ی چهار ساله است. مقایسه دو زیرحوضه با تراکم متفاوت پایپینگ نشان داد که تفاوت در شرایط توپوگرافی، تراکم پوشش گیاهی و نوع کاربری اراضی، تأثیر مستقیم بر گسترش پایپینگ ها دارد. در زیرحوضه (۱) با ۸۵ درصد کاربری کشاورزی، تراکم پایپینگ ۱۰ درصد ولی در زیرحوضه (۲)، با غالبیت کاربری مرتعی (۷۰ درصد)، تراکم پایپینگ ۵۵ درصد برآورد شد. این تفاوت بیانگر نقش ضعف پوشش گیاهی پایدار و نبود مدیریت مرتع در افزایش آسیب پذیری خاک است. هرچند عملیات کشاورزی نیز باعث مخفی شدن برخی پایپینگ ها می شود. همچنین بیشترین تراکم پایپینگ در ارتفاع های پایین تر (زیرحوضه (۱): ۳۷۰-۴۱۰ متر و زیرحوضه (۲): ۳۰۰-۳۴۰ متر) و شیب های تند (۲۵-۳۵ درجه) نتیجه شد که این الگو با مطالعات فلات لسی چین و اروپای شرقی نیز همخوانی داشت. روش DoD بر پایه داده های پهپادی چندزمانه، با پایش دقیق تغییرات مورفولوژیک در بازه ی چهارساله نشان داد در زیرحوضه (۱)، ۷۲ درصد سطح درگیر رسوب و ۲۸ درصد تحت فرسایش با نرخ غالب ± 5 تن بر هکتار در سال است. در مقابل در زیرحوضه (۲)، ۷۷ درصد مساحت درگیر فرسایش با نرخ غالباً ۱۵ تا ۲۵ تن بر هکتار در سال است که شدت بالاتر فرآیند فرسایش و تعداد بیشتر پایپینگ ها در زیرحوضه (۲) را

توجیه می کند. مقایسه تعداد پایپینگ ها بین سال های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ نشان داد در زیرحوضه (۱)، دو پایپینگ در مناطق مرتعی با شیب زیاد و پوشش گیاهی ضعیف ایجاد و دو پایپینگ در اراضی کشاورزی حذف شدند. در حالی که در زیرحوضه (۲)، ۱۰ پایپینگ در دامنه های کم ارتفاع و پرشیب با پوشش گیاهی ضعیف ایجاد و تنها دو پایپینگ در کاربری کشاورزی حذف شدند. بدین ترتیب، تغییرات تعداد پایپینگ ها مستقیماً با شدت فرسایش در روش DoD همخوان است. در نهایت، لازم است به عملکرد دوگانه پایپینگ اشاره شود. از یک سو، با افزایش تخلیه ی زیرسطحی، شتاب گیری فرسایش و تداوم بیابان زایی را به دنبال دارد و از سوی دیگر، می تواند بستر استقرار گونه های مقاوم نظیر انار وحشی و سیاه تلو باشد (مشهود در جنوب شرقی زیرحوضه (۲)). بنابراین، تبدیل پایپینگ به تهدید یا فرصت و سازوکار تخریبی یا ترمیمی، تابع مدیریت اراضی است. نتایج پژوهش می تواند در مدیریت حفاظت آب و خاک، به ویژه شناسایی مناطق حساس به فرسایش و اولویت بندی اقدامات پیشگیرانه در مناطق خشک و نیمه خشک استفاده شود. تقویت و استقرار پوشش گیاهی عمیق ریشه و پایدار، اصلاح الگوی چرای دام در مراتع و به کارگیری رویکردهای مهندسی زیستی در داخل و حاشیه پایپینگ ها، نقش مؤثری در مهار این عارضه و کاهش نرخ فرسایش خواهد داشت. پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده پایش زمانی با آنالیز شیمیایی و فیزیکی خاک ترکیب شود تا مدل جامع تری برای پیش بینی نقاط مستعد پایپینگ ارائه گردد و از آنجا که استفاده از داده های پهپادی چندزمانه در پژوهش منجر به پایش دقیق تغییرات مورفودینامیک شد؛ پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، داده ها با تصاویر ماهواره ای فصلی و سالانه ترکیب شوند تا پویایی فرسایش و رسوب به صورت گسترده تر تحلیل شود. همچنین لحاظ کردن LOD در تحلیل DoD برای تفکیک بهتر تغییرات واقعی از خطای هرچند ناچیز، در مطالعات با مقیاس کوچکتر و حساسیت بالاتر مدنظر قرار گیرد. ارتقاء دقت DEM با فتوگرامتری پیشرفته یا لیزر اسکنر سیار و اعتبارسنجی میدانی گسترده تر (نصب پین های رسوب گیر)، می تواند منجر به افزایش دقت نتایج شود. در نهایت، توجه به پیامدهای احتمالی تغییرات اقلیم و سناریوهای آبی بارش بر فرسایشی و توسعه پایپینگ در مطالعات آتی ضروری به نظر می رسد.

سپاس گذاری

نویسندگان صمیمانه از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و دانشگاه سمنان برای حمایت و تأمین تجهیزات پهپاد تشکر می کنند که کمک شایانی به کارهای میدانی و جمع آوری داده ها نمود.

متأثر از فرسایش‌های پایپینگ و تونلی استان گلستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹(۱)، ۱۳۳-۱۱۵. doi: 10.22069/jwsc.2022.20050.3544

جلالی فرد، علیرضا، حسینعلی‌زاده، محسن، کمکی، چوقی بایرام، و عظیم محسنی، مجید (۱۳۹۷). مدل‌سازی فرسایش پایپینگ در اراضی لسی. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۸ (۴)، ۱-۱۸. doi: 20.1001.1.22517812.1397.8.4.1.4

همتی دایو، علیرضا، زارع گاریزی، آرش، شیخ، واحدبردی، و محمدیان بهبهانی، علی (۱۴۰۲). ارزیابی اثر پوسته‌های زیستی خاک بر کیفیت رواناب. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۴)، ۹۳-۱۰۶. doi: 10.22098/mmws.2022.11617.1151

یعقوبی، ثریا، حسینعلی‌زاده، محسن، کمکی، چوقی بایرام، نجفی‌نژاد، علی، و پورقاسمی، حمیدرضا (۱۴۰۳). ارزیابی کارآمدی سه مدل داده‌کاوی در پهنه‌بندی مناطق حساس به رخداد آبکند (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بالادست سد بوستان، استان گلستان). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۴)، ۲۳۸-۲۱۹. doi: 10.22098/mmws.2023.13511.1343

References

- Arabameri, A., Chen, W., Loche, M., Zhao, X., Li, Y., Lombardo, L., Cerda, A., Pradhan, B., & Bui, D.T. (2020). Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*, 11(5), 1609-1620. doi: 10.1016/j.gsf.2019.11.009
- Bahremand, A., & Hosseinalizadeh, M. (2022). Development of conceptual hydrological FLEX-Topo model for loess watersheds influenced by piping and tunnel erosion in Golestan Province of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(1), 115-133. doi: 10.22069/jwsc.2022.20050.3544 [In Persian]
- Bae, S., Yu, J., Wang, L., Jeong, Y., Kim, J., & Yang, D.Y. (2019). Experimental analysis of sand grain size mapping using UAV remote sensing. *Remote Sensing Letters*, 10(9), 893-902. doi: 10.1080/2150704X.2019.1629713
- Bai, R., Wang, X., Li, J., Yang, F., Shanguan, Zh., & Deng, L. (2024). The impact of vegetation reconstruction on soil erosion in the Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 363, 121382. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121382
- Bao, H., Lann, T., Ao, X., Yang, L., Lan, H., & Peng, J. (2024). Evolution characteristic of soil water in loess slopes with different slope angles. *Geoenvironmental Disasters*, 11(1). doi: 10.1186/s40677-024-00293-6
- Bernatek-Jakiel, A., Kacprzak, A., & Stolarczyk, M. (2016). Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های تولید شده در متن مقاله حاضر ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

هانیه پورجواد: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **محمد رضا یزدانی:** راهنمایی، ویرایش مقاله، کنترل نتایج؛ **محسن حسینعلی‌زاده:** راهنمایی، ویرایش مقاله، کنترل نتایج؛ **نرگس کریمی‌نژاد:** مشاوره، بازبینی مقاله، کنترل نتایج

منابع

- بهره‌مند، عبدالرضا، و حسینعلی‌زاده، محسن (۱۴۰۱). توسعه مدل مفهومی هیدرولوژی FLEX-Topo برای حوزه‌های آبخیز لسی Carpathians). *Catena*, 141, 117-129. doi: 10.1016/j.catena.2016.03.001
- Bernatek-Jakiel, A. & Nadal-Romero, E. (2022). Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(1), 72-86. doi: https://doi.org/10.1002/esp.5431
- Bernatek-Jakiel, A. & Poesen, J. (2018). Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107-1128. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.08.006
- Bhagyalekshmi, S., Mohan, M., Sreedharan, K., & Ajaykumar, B. (2015). Evaluation of the factors controlling the spatial distribution of soil piping: A case study from the southern Western Ghats, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), 8055-8067. doi: 10.1007/s12517-015-1793-8
- Bovi, R.C., Moreira, C. A., Rosolen, V.S., Rosa, F.T.G., Furlan, L.M., & Helene, L.P.I. (2020). Piping process: Genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach. *Geoderma*, 361, 114101. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114101
- Dai, W., Hu, J., Wang, B., Fan, M., Zhou, Y., & Zhang, M. (2024). Effects of Digital Elevation Model Resolution on Unmanned Aerial Vehicle-Based Topographic Change Detection in Human-Altered Landscapes. *Drones*, 8(11), 610. doi: 10.3390/drones8110610
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzolf, I., Tiede, D. & Blaschke, T. (2014). Detection of gully-affected areas by applying object-based image

- analysis (OBIA) in the region of Taroudannt, Morocco. *Remote Sensing*, 6(9), 8287-8309. doi: 10.3390/rs6098287
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. & Abellan, A. (2015). Image-based surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments of a promising tool for geoscientists. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 3, 1445-1508. doi: 10.5194/esurf-4-359-2016
- Fang, R., Deng, L., Fan, W., Yang, G., Tang, D., & Amini, M. (2024). Research on response characteristics of loess slope and disaster mechanism caused by structural plane extension under excavation. *Scientific Reports*, 14, 28700. doi:10.1038/s41598-024-80016-x
- Faulkner, H. (2013). Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106, 42-53. doi: 10.1016/j.catena.2012.04.005
- Feizi, V., Azizi, G., Mollashahi, M., & Alimohammadian, H. (2025). Magnetic properties and geochemistry of loess/paleosol sequences at Nowdeh section in northeastern Iran. *Climate of the Past*, 21, 941-955. doi: 10.5194/cp-21-941-2025
- Gu, Zh., Ji, K., Yi, Q., Cao, Sh., Li, P., & Feng, D. (2024). Quantitative evaluation of soil erosion in loess hilly area of western Henan based on sampling approach. *Water*, 16(20), 2895. doi: 10.3390/w16202895
- Hamshaw, S.D., Engel, T., Rizzo, D.M., O'Neil-Dunne, J. & Dewoolkar, M.M. (2019). Application of unmanned aircraft system (UAS) for monitoring bank erosion along river corridors. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1285-1305. doi: 10.1080/19475705.2019.1571533
- He, L., Guo, J., Zhang, X., Liu, B., Guzmán, G., & Gómez, J.A. (2023). Vegetation restoration dominated the attenuated soil loss rate on the Loess Plateau, China over the last 50 years. *Catena*, 228, 107149. doi: 10.1016/j.catena.2023.107149
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., & Alinejad, M. (2018). 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. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.005
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Bahremand, A., Gangi, N., Bernatek Jakiel, A., Tazikeh, H., Shafaie, V., & Movahedi Rad, M. (2025a). Integrating geophysical techniques and UAV mapping for the detection and temporal analysis of soil pipes and pipe collapses in agricultural loess landscapes. *Geoenvironmental Disasters*, 12, 37. doi: 10.1186/s40677-025-00343-7
- Hosseinalizadeh, M., Alinejad, M., Tazikeh, H., Kariminejad, N., Bernatek-Jakiel, A., & Khormali, F. (2025b). Piping erosion in semi-arid loess hillslope: The influence of soil characteristics. *Land Degradation & Development*. doi: 10.1002/ldr.70202
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Chen, W., Pourghasemi, H.R., Alinejad, M., Behbahani, A.M., & Tiefenbacher, J.P. (2019). Spatial modelling of gully headcuts using UAV data and four best-first decision classifier ensembles (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree, and RF-BFTree). *Geomorphology*, 329, 184-193. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.01.006
- Hossini, H., Karimi, H., Mustafa, Y.T., & Fadhil Al-Quraishi, A.M. (2022). Role of Effective Factors on Soil Erosion and Land Degradation: A Review. In book: *Environmental Degradation in Asia Land Degradation. Environmental Contamination, and Human Activities*, 221-235. doi: 10.1007/978-3-031-12112-8_11
- Hemati Daiv, A., Zare Garizi, A., Sheikh, V., & Mohammadian Behbahani, A. (2023). Effects of biological soil crust on surface runoff quality. *Water and soil management and modeling*, 3(4), 93-106. doi: 10.22098/mmws.2022.11617.1151 [In Persian]
- Jalalifard, A., Hosseinalizadeh M., Komaki C.B., & Azimmohseni M. (2019). Modeling of piping erosion in loess soils. *Environmental Erosion Research*, 8 (4), 1-18. doi: 20.1001.1.22517812.1397.8.4.1.4 [In Persian]
- Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. (2021). Change detection in piping, gully head forms, and mechanisms. *Catena*, 206, 105550. doi: 10.1016/j.catena.2021.105550
- Kariminejad, N., Kazemi Garajeh, M., Hosseinalizadeh, M., Golkar, F., & Pourghasemi, H. R. (2023a). Harnessing the power of remote sensing and unmanned aerial vehicles: A comparative analysis for soil loss estimation on the Loess Plateau. *Drones*, 7(11), 659. doi: 10.3390/drones7110659
- Kariminejad, N., Rossi, M., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H. R., & Santosh, M. (2020). Gully head modelling in Iranian Loess Plateau under different scenarios. *Catena*, 194, 104769. doi: 10.1016/j.catena.2020.104769
- Kariminejad, S., Sepehr, A., Poesen, J., & Hassanli, A. (2023b). Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion. *Geoderma*, 429, 116267. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.116267
- Koci, J., Jarihani, B., Leon, J. X., Sidle, R. C., Wilkinson, S. N., & Bartley, R. (2017). Assessment of UAV and ground-based

- Structure from Motion with multi-view stereo photogrammetry in a gullied savanna catchment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 328. doi: 10.3390/ijgi6110328
- Krenz, J., Greenwood, P. & Kuhn, N.J. (2019). Soil degradation mapping in drylands using unmanned aerial vehicle (UAV) data. *Soil Systems*, 3(2), 33. doi: 10.3390/soilsystems3020033
- Llena, M., Carreras, S., Bernatek-Jakiel, A., Ollero, A., & Nadal-Romero, E. (2024). Agricultural land abandonment linked to pipe collapse and gully development: Reconstruction from archival SfM and LiDAR datasets. *Geoderma*, 449, 116995. doi: 10.1016/j.geoderma.2024.116995
- Liu, Y., Hou, X., Qiao, J., Zhang, W., Fang, M., & Lin, M. (2023). Evaluation of soil erosion rates in the hilly-gully region of the Loess Plateau in China in the past 60 years using global fallout plutonium. *Catena*, 220, 106666. doi: 10.1016/j.catena.2022.106666
- Li, D., Li, P., Hu, J., Bai, X., Latifi, H., Liu, L., & Yao, W. (2025a). Mapping catchment-scale soil erosion and deposition using an improved DoD method based on multi-temporal UAV-borne laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63(1), 5701113. doi: 10.1109/TGRS.2025.3531495
- Li, P., Li, D., Hu, J., Fassnacht, F. E., Latifi, H., Yao, W., Gao, J., Chan, F., Dang, T., & Tang, F. (2024). Improving the application of UAV-LiDAR for erosion monitoring through accounting for uncertainty in DEM of difference. *Catena*, 234, 107534. doi: 10.1016/j.catena.2023.107534
- Li, D., Li, P., Hu, J., Yao, W., Yan, L., Fassnacht, F. E., Latifi, H., Dan, Y., Liu, L., Gao, J., & Dang, T. (2025c). Comparing methods of assessing uncertainty in DEM of difference for soil erosion detection based on UAV laser scanning data. *Geomorphology*, 491, 110034. doi: 10.1016/j.geomorph.2025.110034
- Li, W., Li, p., Yan, L., Hu, J., Wang, L., Li, D., Dan, Y., Huang, L., & Zhao, G. (2025b). Impacts of spatial resolutions of UAV-LiDAR-derived DEMs on erosion modelling in the hilly and gully Loess Plateau. *Catena*, 225, 109059. doi: 10.1016/j.catena.2025.109059
- Mlambo, R., Woodhouse, I., Gerard, F. & Anderson, K. (2017). Structure from motion (SfM) Photogrammetry with drone data: A low-cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*, 8(3), 68. doi: 10.3390/f8030068
- Niculiță, M., Mărgărint, M.C., & Tarolli, P. (2020). Using UAV and LiDAR data for gully geomorphic changes monitoring. *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 271-315. doi: 10.1016/B978-0-444-64177-9.00010-2
- Poesen J. (2017). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Surface Processes and Landforms*, 43(1), 64-84. doi: 10.1002/esp.4250
- Pereyra, M.A., Fernández, D.S., Marcial, E.R., & Puchulu, M.E. (2020). Agricultural land degradation by piping erosion in Chaco Plain, Northwestern Argentina. *Catena*, 189, 104295. doi: 10.1016/j.catena.2019.104295
- Rabiu, A., & Ahmad, A. (2023). Unmanned aerial vehicle photogrammetric products accuracy assessment: A review. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W6, 279-288. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-279-2023
- Rodzik, J., Kołodyńska-Gawrysiak, R., Franczak, Ł., Zgłobicki, W., & Poesen, J. (2024). Impact of Land Use Changes on Collapsed Pipes Development in the Loess Gully (Lublin Upland, East Poland). *Quaestiones Geographicae*. 43(4), 17-33. doi: org/10.14746/quageo-2024-0042
- Rafaeli, O., Nahlieli, A., & Svoray, T. (2023). Dynamics of subsurface soil erosion in a semiarid region: A time-series study of sinkhole area and morphology. *Catena*, 233, 107511. doi: 10.1016/j.catena.2023.107511
- Szypuła, B. 2024. Accuracy of UAV-based DEMs without ground control points. *GeoInformatica*, 28(1), 1-28. doi: 10.1007/s10707-023-00498-1
- Stocker, 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
- Sartori, M., Ferrari, E., M'Barek, R., Philippidis, G., Boysen-Urban, K., Borrelli, P., Montanarella, L., & Panagos, P. (2024). Remaining loyal to our soil: A prospective integrated assessment of soil erosion on global food security. *Ecological Economics*, 219, 108103. doi: 10.1016/j.ecolecon.2023.108103
- Verachtert, E., Maetens, W., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., & Deckers, J. (2011). Soil loss rates due to piping erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(13), 1715-1725. doi: 10.1002/esp.2186
- Vega, F., Ramírez, F., Siaz, M. & Rosua, F. (2015). Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosystems Engineering*, 132: 19-72. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.01.008
- Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Deckers, J. 2010. Factors controlling the spatial distribution of soil

- pipings erosion on loess-derived soils: a case study from central Belgium. *Geomorphology*, 195, 28-39. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.001
- Vaze, J., Teng, J., Spencer, G. 2010. *Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices*. *Environmental Modelling & Software* 25(10), 1086-1098. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.014
- Wang, J., Yang, J., Li, Zh., Ke, L., Li, Q., Fan, J., & Wang, X. (2025). Research on soil erosion based on remote sensing technology: A review. *Agriculture*, 15(1), 18. doi: 10.3390/agriculture15010018
- Wang, Z., Zeng, R., & Ma, P. (2024). Determining of gully erosion susceptibility based on UAV and machine learning in Loess Plateau. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). doi: 10.1080/19475705.2024.2421382
- Yaghobi, S., Hosseinalizadeh, M., Komaki, C.B., Najafinejad, A., & Pourghasemi, H. (2024). Evaluation of the efficiency of three data mining models in zoning areas prone to gully erosion (Case study: Upper Watershed of Boustan Dam). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 219-238. doi: 10.22098/mmws.2023.13511.1343 [In Persian]
- Zeng, Y., Jing, T., Xu, B., Yang, X., Jian, J., Zong, R., Wang, B., Dai, W., Deng, L., Fang, N., & Shi, Z. (2024). Vectorized dataset of silted land formed by check dams on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Data*, 11, 348. doi: 10.1038/s41597-024-03198-z.
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79(1), 25-50. doi: 10.1007/s11069-015-1700-3.
- Zhu, T.X. (2012). Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. *Geomorphology*, 153, 144-155. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.02.019.
- Zhuang, J., Peng, J., Du, Ch., Zhu, Y., & Kong, J. (2024). Hallow-landslide stability evaluation in loess areas according to the Revised Infinite Slope Model: a case study of the 7.25 Tianshui sliding-flow landslide events of 2013 in the southwest of the Loess Plateau, China. *Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 2615-2631. doi: 10.5194/nhess-24-2615-2024.