

The role of vegetation cover and morphometry of gully in creating the walls tensile cracks

Moslem Borji Hassan Gavyar¹, Mohsen Farzin^{2*} and Ali Akbar Nazari Samani³

¹ Postdoctoral Researcher, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

² Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

³ Professor, Department of Reclamation pf Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 19 April 2026

Accepted: 11 July 2026

Extended abstract

Introduction

Gully erosion is one of the most important and destructive forms of soil degradation in arid and semi-arid regions of the world, playing a significant role in reducing agricultural land productivity, increasing sediment load in watersheds, and decreasing the useful life of dam reservoirs. Among the different stages of gully evolution, tensile cracks in the gully wall act as early indicators of instability and play a key role in initiating wall collapse, lateral gully expansion, and accelerating erosion processes. Despite the high importance of this phenomenon in geomorphology and erosion management, quantitative and multivariate investigations of the factors controlling the occurrence and location of these cracks at the gully wall scale remain limited, and few field studies have specifically addressed the development of tensile cracks. The aim of this study is to identify the factors affecting the formation of tensile cracks and to determine the critical slope threshold in the gullies of the Kaloocheh Bijar watershed.

Materials and methods

In this study, 47 gullies (including 25 gullies with longitudinal cracks and 22 gullies without cracks) were surveyed and analyzed using UAV imagery with a vertical accuracy of 2 cm. The measured variables included wall slope, bank height, crack distance from the gully edge, bottom and top channel width, channel bed slope, gully planform curvature (outer, straight, inner), and vegetation cover status. The statistical analyses included independent t-test, Mann–Whitney U test, Kruskal–Wallis test, Fisher’s exact test, Spearman’s correlation, cluster analysis, and ROC curve analysis, all of which were performed using R and SPSS software.

Results and discussion

The results showed that wall slope is the most important factor controlling the occurrence of tensile cracks, such that the mean slope in cracked gullies (86.7 degrees) was significantly higher than in non-cracked gullies (50 degrees). Furthermore, outer curvature and lack of vegetation cover, with odds ratios of 4.2 and 4.57 respectively, were identified as the most important factors increasing the likelihood of crack occurrence. The crack distance from the gully edge (mean: 2.67 m) was mainly influenced by the geometric dimensions of the gully and showed a statistically significant positive correlation only with the bottom channel width. ROC analysis determined the critical wall slope threshold as 78.4 degrees (AUC = 0.835), with model sensitivity and specificity of 80% and 86.4%, respectively. Additionally, cluster analysis revealed three distinct patterns of cracked gullies, indicating different stages of instability evolution.

Conclusions

The findings of this study have direct implications for gully erosion management. First, wall slope can be used as a rapid and field-measurable indicator for prioritizing conservation measures. Gullies with a slope exceeding the critical threshold of 78.4 degrees should be prioritized for stabilization, as the probability of crack formation and failure propagation is significantly higher in these gullies. Second, volumetric measures without attention to slope reduction or stress concentration control have limited stability effects; therefore, engineering interventions should focus on reducing the effective wall slope or dissipating flow energy in outer curves. Third, although the role of vegetation cover was statistically weaker, mechanical

* Corresponding author: m.fartzin@yu.ac.ir

evidence suggests that its removal can accelerate the failure threshold; thus, biological stabilization of walls should be considered as a complementary tool in gully management.

Keywords: Biological stabilization, Critical slope threshold, Gully erosion, Gully management, Koloucheh Bijar

Cite this article: Borji Hassan Gavyar., M, Farzin, M., Nazari Samani, A.K., 2026. The role of vegetation cover and morphometry of gully in creating the walls tensile cracks. Water. Eng. Manag.18(3), 358-377.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



نقش پوشش گیاهی و مورفومتری آبکند در ایجاد شکاف کششی دیواره

مسلم برجی حسن گاویار^۱، محسن فرزین^{۲*} و علی اکبر نظری سامانی^۳

^۱ پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۳ استاد، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

چکیده مبسوط

مقدمه

فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین شکل‌های تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که نقش قابل توجهی در کاهش بهره‌وری اراضی کشاورزی، افزایش بار رسوبی حوزه‌های آبخیز و کاهش عمر مفید مخازن سدها ایفا می‌کند. در میان مراحل مختلف تکامل آبکندها، شکاف‌های کششی در دیواره، به‌عنوان شاخص‌های پیش‌ران ناپایداری عمل کرده و نقش کلیدی در آغاز ریزش دیواره، گسترش جانبی آبکند و تسریع فرایندهای فرسایشی دارند. با وجود اهمیت بالای این پدیده در ژئومورفولوژی و مدیریت فرسایش، بررسی کمی و چندمتغیره عوامل کنترل‌کننده وقوع و موقعیت این شکاف‌ها در مقیاس دیواره آبکند همچنان محدود بوده و مطالعات میدانی لندکی به‌طور خاص به توسعه ترک‌های کششی پرداخته‌اند. هدف این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر بر تشکیل شکاف‌های کششی و تعیین آستانه بحرانی شیب دیواره در آبکندهای حوزه آبخیز کلوچه بیجار است.

مواد و روش

در این مطالعه، ۴۷ آبکند (شامل ۲۵ آبکند دارای شکاف طولی و ۲۲ آبکند بدون شکاف) با استفاده از تصاویر پهپادی با دقت ارتفاعی دو و تفکیک مسطحاتی 11×11 سانتی‌متر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. این دقت توسط ۸۳ نقطه کنترل زمینی ارزیابی شده است. متغیرهای اندازه‌گیری شده شامل شیب دیواره، ارتفاع دیواره، فاصله شکاف از لبه، عرض پایین و بالای آبکند، شیب کف کانال، نوع قوس آبکند (خارجی، مستقیم و داخلی) و وضعیت پوشش گیاهی بودند. تحلیل‌های آماری شامل آزمون t مستقل، من-ویتنی کروسکال والیس، آزمون فیشر، همبستگی اسپیرمن، تحلیل خوشه‌ای و منحنی ROC بود که همگی در نرم‌افزار R و SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که شیب دیواره مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده وقوع شکاف‌های کششی است، به‌طوری‌که میانگین شیب در آبکندهای دارای شکاف (۸۶/۷ درجه) به‌طور معنی‌داری بیشتر از آبکندهای بدون شکاف (۵۰ درجه) است. همچنین، قوس خارجی و عدم وجود پوشش گیاهی به‌ترتیب با نسبت شانس ۴/۲ و ۴/۵۷، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تقویت‌کننده احتمال وقوع شکاف شناسایی شدند. فاصله شکاف از لبه آبکند (میانگین ۲/۶۷ متر) عمدتاً تحت تأثیر ابعاد هندسی آبکند بوده و فقط با عرض آبراهه در پایین همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد. تحلیل ROC آستانه بحرانی شیب

* مسئول مکاتبات: m.farzin@yu.ac.ir

دیواره را ۷۸/۴ درجه ($AUC=0.835$) تعیین کرد که در آن حساسیت و ویژگی مدل به ترتیب ۸۰ و ۸۶/۴ درصد است. همچنین، تحلیل خوشه‌ای سه الگوی متمایز از آبکندهای دارای شکاف را نشان داد که بیانگر مراحل مختلف تکامل ناپایداری است.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش، کاربردهای مستقیمی در مدیریت فرسایش آبکندی دارد. نخست، شیب دیواره به‌عنوان شاخصی سریع و قابل‌اندازه‌گیری میدانی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی قابل استفاده است. آبکندهایی با شیب بالاتر از آستانه بحرانی ۷۸/۴ درجه باید در اولویت تثبیت قرار گیرند، زیرا احتمال تشکیل شکاف و گسترش شکست در آنها به‌طور معنی‌داری بیشتر است. دوم، اقدامات حجمی بدون توجه به کاهش شیب یا کنترل تمرکز تنش، تأثیر پایداری محدودی دارند. بنابراین عملیات مهندسی باید بر کاهش شیب مؤثر دیواره یا استهلاک انرژی جریان در قوس‌های خارجی متمرکز شود. سوم، هرچند نقش پوشش گیاهی از نظر آماری ضعیف‌تر بود، اما شواهد مکانیکی نشان می‌دهد که حذف آن می‌تواند آستانه شکست را تسریع کند. از این‌رو، تثبیت بیولوژیک دیواره‌ها باید به‌عنوان ابزاری مکمل در مدیریت آبکندها در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آستانه بحرانی شیب، تثبیت بیولوژیکی، فرسایش خندقی، کلوجه بیجار، مدیریت خندق

مقدمه

فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین شکل‌های فرسایش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به شمار می‌رود. این پدیده می‌تواند در مدت کوتاهی منجر به تخریب گسترده خاک، کاهش قابلیت تولید اراضی کشاورزی و افزایش چشمگیر بار رسوبی در سیستم‌های رودخانه‌ای و پرشدن مخازن سدها شود (Bayat et al., 2016; Shadfar, 2016; Soufi et al., 2022). ترکیب تغییرات اقلیمی، افزایش رخداددهای بارش‌های حدی و تغییر کاربری اراضی، موجب تشدید فرایندهای فرسایش آبکندی در بسیاری از مناطق جهان شده است، به‌طوری که آبکندها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ناپایداری سطح زمین در مقیاس حوزه‌های آبخیز شناخته می‌شوند (Poesen, 2018; Castillo and Gómez, 2016). فرسایش آبکندی در ایران طی دهه اخیر نسبت به دهه ۱۳۳۰ حدوداً پنج برابر افزایش یافته است (Agharezi et al., 2014).

رشد و تکامل آبکندها شامل سه فرایند اصلی شامل فرسایش کف^۱، پیش‌روی سرآبکند^۲ و گسترش

جانبی^۳ (Bocco, 1991; Bull and Kirkby, 1997; Sidorchuk, 1999) است. در میان این فرایندها، گسترش جانبی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. فرسایش کف آبکند عمده‌تاً توسط انرژی جریان ورودی کنترل می‌شود، در حالی که گسترش جانبی حاصل ترکیب پیچیده‌تری از فرایندها در مقیاس‌های زمانی مختلف است. طی رویدادهای فرسایشی، گسترش جانبی می‌تواند به‌دلیل ناپایداری ژئوتکنیکی دیواره و/با فرسایش متمرکز جریان در پنجه دیواره رخ دهد. برخلاف فرسایش کف، گسترش جانبی می‌تواند حتی در غیاب بارندگی و در نتیجه چرخه‌های خیس و خشک شدن نیز اتفاق بیفتد (Oostwoud Wijdenes, 2001; Marzolf et al., 2011).

گسترش جانبی فرایندی است که در آن جداسازی ذرات خاک از دیواره جانبی در نتیجه عملکرد ترکیبی نیروهای هیدرولیکی و گرانشی در برابر مقاومت خاک رخ می‌دهد. فرایندهای درگیر در گسترش جانبی آبکند به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) فرسایش ناشی از جریان آب^۴ و (۲) ریزش دیواره ناشی از گرانش^۵ که در منابع علمی انگلیسی با عناوینی مانند

^۴ Flow-driven erosion

^۵ Gravity-driven bank collapse

^۱ Incision

^۲ Headcut retreat

^۳ Widening

Langendoen and Simon, 2008). به همین دلیل، شکاف‌های کششی در بسیاری از مطالعات اخیر به‌عنوان شاخص‌های پیش‌رو^۳ در شکست دیواره و گسترش آبکند مورد توجه قرار گرفته‌اند (Soleimanpour et al., 2020). با این حال، پژوهش‌های میدانی ناچیزی با تمرکز ویژه بر توسعه شکاف‌های کششی منتشر شده است (Thomas et al., 2004؛ Istanbuluoglu et al., 2005؛ Dong et al., 2011) و عدم قطعیت‌های قابل توجهی نیز در رابطه با عوامل کنترل‌کننده مکانی و هندسی ایجاد این شکاف‌ها وجود دارد.

از طرف دیگر، رفتار آبکندها و مکانیسم‌های ناپایداری آنها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک قرار دارد. هندسه آبکند، شامل شیب دیواره، عرض مقطع و شکل قوس، نقش مهمی در توزیع تنش و تمرکز جریان ایفا می‌کند. به‌ویژه در قوس‌های خارجی، افزایش سرعت جریان و تمرکز تنش برشی می‌تواند موجب تشدید فرسایش کناری و تسریع ناپایداری دیواره شود. در مقابل، قوس‌های داخلی معمولاً شرایط رسوبگذاری و کاهش انرژی جریان را فراهم می‌کنند و اثر محافظتی نسبی دارند (Vanmaercke et al., 2016).

علاوه بر عوامل هندسی، ویژگی‌های سطحی مانند پوشش گیاهی نیز نقش مهمی در کنترل فرسایش آبکندی دارند. پوشش گیاهی از طریق افزایش مقاومت برشی خاک، کاهش سرعت رواناب سطحی و تثبیت ساختار خاک توسط سیستم ریشه‌ای، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش احتمال تشکیل ترک‌های کششی ایفا کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حذف پوشش گیاهی نه‌تنها موجب افزایش حساسیت سطح خاک به فرسایش می‌شود، بلکه می‌تواند آستانه آغاز شکست را نیز کاهش دهد (Vannoppen et al., 2015).

ازمنظر مکانیکی، ناپایداری دیواره آبکندها را می‌توان به‌عنوان یک فرایند آستانه‌ای در نظر گرفت که در آن تغییرات کوچک در شرایط هندسی یا هیدرولوژیکی می‌تواند منجر به تغییرات ناگهانی در وضعیت پایداری شود. در این چارچوب، شکاف‌های

bank failure، wall collapse یا slab failures شناخته می‌شود (Thorne and Tovey, 1981؛ Istanbuluoglu et al., 2005).

در میان مراحل مختلف تکامل آبکندها، تشکیل و گسترش شکاف‌های کششی^۱ در دیواره‌ها یکی از مراحل کلیدی آغاز ناپایداری محسوب می‌شود (Shahbazi et al., 2019). این ترک‌ها معمولاً در ناحیه بالادست دیواره و به‌صورت موازی با لبه آبکند شکل می‌گیرند و نشان‌دهنده تمرکز تنش‌های کششی در توده خاک هستند. از دیدگاه ژئومکانیکی، این شکاف‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که تنش‌های کششی ناشی از وزن توده خاک و وضعیت هندسی شیب از مقاومت کششی خاک فراتر رود، وضعیتی که می‌تواند منجر به آغاز شکست تدریجی یا ناگهانی در دیواره آبکند شود (Michalowski, 2013).

ریزش کششی^۲ شامل فروپاشی بلوک‌های خاک هنگامی است که تنش کششی ناشی از وزن قسمت پایینی یک بلوک طره‌ای از مقاومت کششی بحرانی خاک دیواره فراتر می‌رود (Thorne and Tovey, 1981). در این حالت، شکاف‌های کششی در دیواره جانبی آبکند ایجاد می‌شوند و سطح گسیختگی ممکن است تقریباً افقی یا قوسی شکل باشد (شکل ۲).

مطالعات نشان داده‌اند که این شکاف‌ها نه‌تنها شاخصی از ناپایداری موجود هستند، بلکه می‌توانند به‌عنوان عامل تسریع‌کننده در گسترش فرسایش آبکندی نیز عمل کنند. ایجاد شکاف موجب کاهش پیوستگی خاک، افزایش نفوذ آب در ناحیه تاج شیب و تشدید کاهش مقاومت برشی در توده خاک می‌شود. فرایندی که در نهایت به گسترش جانبی آبکند و افزایش نرخ عقب‌نشینی دیواره منجر می‌شود (Vanmaercke et al., 2016). از این رو، شکاف‌های کششی عامل کلیدی در ریزش دیواره‌ها است. مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که آنها نقش مهمی در تعادل بین نیروهای مقاوم و محرک و همچنین گشتاور از طریق هندسه بلوک دارند (Fox et al., 2006؛ Collison, 2001؛ Qin et al., 2018؛ Momm et al., 2015؛ Fox and Wilson, 2010).

³ Precursors

¹ Tensile cracks

² Tensile failure

شرقی و 40° و 35° تا 15° و 35° عرض شمالی در محدوده مرزهای استان‌های همدان و کردستان واقع شده است. برخی از روستاهای واقع در حوضه عبارتند از روستاهای ایلان لو، جگن لو، خانباقی، داریلوچو و دارقشلاق و برخی از رودخانه‌های آن شامل چمن، قوری چای، علی آباد، قشلاق، چم ره کاریز، آقا میر و سراب می‌شود.

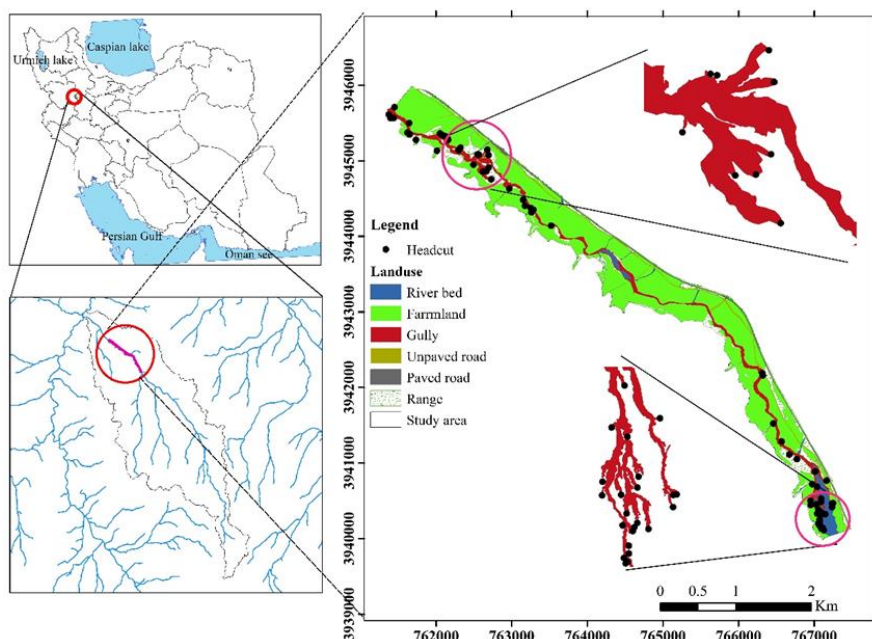
اقلیم منطقه براساس ضریب دومارتن خشک و میانگین بارندگی کل حوضه برابر با $289/16$ میلی‌متر است. همچنین بیشترین بارش ماهانه مربوط به فروردین $59/52$ میلی‌متر، اسفند به میزان $28/495$ میلی‌متر و کمترین بارش ماهانه مربوط به تیر $9/55$ و شهریور به میزان $12/76$ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان داده است. در حدود 20 کیلومتری خروجی حوضه تراس آبرفتی به مساحت 432 هکتار وجود دارد که دچار فرسایش آبکندی شدید شده است و در سال‌های اخیر موجب ایجاد خسارت زیاد به بخش کشاورزی، تخریب راه‌ها و پرشدن سد تلوار شده است. شکل ۱ نماهای مختلفی از این آبکندها را نشان می‌دهد.

خاک منطقه دارای بافت لوم رسی با میانگین 25 درصد رس، 35 درصد سیلت و 40 درصد شن است. ضریب یکنواختی برابر 160 محاسبه شده است که نشان‌دهنده دانه‌بندی بسیار ناهمگن خاک است. ضریب انحنای $(Cc = 0.1)$ نیز تأییدکننده عدم وجود دانه‌بندی خوب است (Detailed and Executive Studies, 2022). مناطق زراعی با $293/44$ هکتار معادل 67 درصد از کل محدوده مورد مطالعه، بزرگترین کاربری منطقه را شامل می‌شوند. مساحت اراضی دارای آبکند نیز $58/43$ هکتار معادل 10 درصد از کل محدوده در سال 1401 است.

کششی نه تنها نشانه‌ای از آغاز ناپایداری هستند، بلکه می‌توانند به عنوان عامل بازخورد مثبت در تشدید فرایند شکست نیز عمل نمایند (Michalowski, 2013; Van Beek et al., 2016). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در درک فرایندهای فرسایش آبکندی، بسیاری از مطالعات پیشین بر تحلیل کلی فرسایش یا نرخ توسعه آن تمرکز داشته‌اند، در حالی که بررسی کمی و چندمتغیره عوامل مؤثر بر تشکیل شکاف‌های کششی در مقیاس دیواره آبکند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، ارتباط بین هندسه آبکند و موقعیت فضایی شکاف‌ها هنوز به طور دقیق تبیین نشده است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر تعیین عوامل کنترل‌کننده تشکیل شکاف‌های کششی در دیواره آبکندها با استفاده از داده‌های دقیق پهنپای و تحلیل‌های آماری چندمتغیره در حوزه آبخیز کلوچه بیجار است. در این راستا، نقش متغیرهای هندسی (شیب دیواره، ارتفاع دیواره و ابعاد مقطع)، ویژگی‌های ژئومورفولوژیک (نوع قوس: خارجی، مستقیم و داخلی) و وضعیت سطح زمین (پوشش گیاهی) در کنترل وقوع و موقعیت این شکاف‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مطالعه تلاش دارد با ارائه یک تحلیل کمی و مبتنی بر داده، درک مکانیسم‌های آغاز ناپایداری در آبکندها را افزایش دهد و آستانه بحرانی قابل استفاده در مدیریت فرسایش آبکندی را ارائه نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز کلوچه بیجار با مساحت $49756/06$ هکتار در فاصله حدود 30 کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بیجار و 26 کیلومتری غرب شهرستان سریش آباد قرار دارد. این حوضه یکی از سرشاخه‌های رودخانه تلورچای با طول آبراهه اصلی $66/75$ کیلومتر است. کلوچه بیجار با مختصات 10° و 48° تا 50° و 47° طول جغرافیایی



شکل ۱- محدوده آبکند مورد مطالعه با نمایش نقاط پیشروی
Fig. 1. The studied gully area with the display of the headcuts

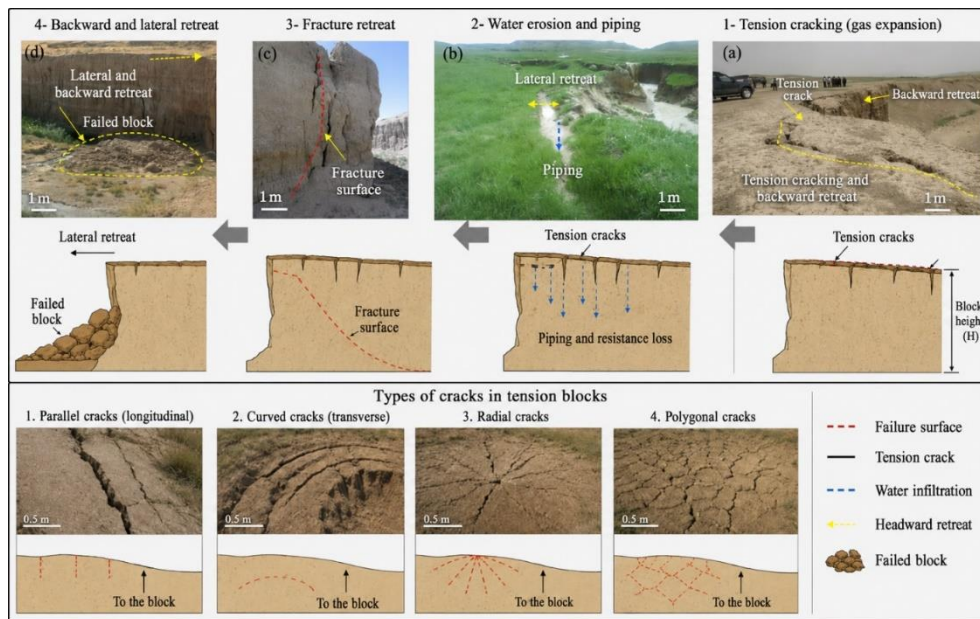
گزارش شده است (Fox et al., 2007؛ Michalowski, 2013؛ Thorne and Tovey, 1981).

بر اساس این چارچوب، شکاف‌های مشاهده‌شده در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان ترک‌هایی تعریف شدند که در تاج دیواره و تقریباً موازی با لبه آبکند تشکیل شده و بیانگر آغاز ناپایداری توده خاک هستند. پس از تشکیل شکاف، نفوذ آب از طریق آن موجب افزایش رطوبت، کاهش مکش ماتریک و افت مقاومت برشی خاک شده و در نهایت شرایط لازم برای توسعه سطح گسیختگی و ریزش دیواره را فراهم می‌کند (Van Beek et al., 2008؛ Langendoen and Simon, 2016).

همچنین بر اساس الگوی هندسی مشاهده‌شده در سطح زمین، شکاف‌ها در چهار گروه شامل شکاف‌های موازی (طولی)، شکاف‌های قوسی، شکاف‌های شعاعی و شکاف‌های شبکه‌ای طبقه‌بندی شدند (شکل ۲). با این حال، تمرکز این پژوهش بر شکاف‌های طولی موازی با لبه آبکند بود، زیرا این نوع شکاف‌ها بیشترین ارتباط را با فرایند ریزش بلوکی و گسترش جانبی آبکند دارند.

فرایند توسعه شکاف‌های طولی: عمدتاً سازوکار تشکیل و توسعه آبکندهای این ناحیه به سه نوع انحلالی، سیلابی یا ترکیبی از این دو است. پیشروی طولی و هم‌راستا با جهت جریان اصلی توسط سیلاب‌های فصلی رخ می‌دهد. اما، پیشروی کناری این آبکندها عمدتاً انحلالی و بر اثر توسعه ترک‌های کششی است. این ترک‌ها باعث ایجاد بلوک‌های بزرگی شده که در فصل تر و حتی در فصل خشک هم در بستر آبکند سقوط کرده و موجب توسعه کناری آن می‌شوند.

در این پژوهش، شناسایی شکاف‌های کششی بر اساس مدل مفهومی ناپایداری دیواره آبکند انجام شد (شکل ۲). بر این اساس، توسعه جانبی آبکند شامل چهار مرحله اصلی است: (۱) تشکیل شکاف کششی در نزدیکی تاج دیواره بر اثر تمرکز تنش‌های کششی، (۲) گسترش تدریجی شکاف و نفوذ آب به درون توده خاک، (۳) توسعه سطح گسیختگی و کاهش مقاومت برشی خاک و (۴) ریزش بلوک و عقب‌نشینی دیواره آبکند. این توالی فرایندی یکی از رایج‌ترین مکانیسم‌های گسترش جانبی آبکندها در خاک‌های ریزدانه محسوب می‌شود و در مطالعات متعددی



شکل ۲- مراحل تشکیل شکاف کششی، توسعه سطح گسیختگی و ریزش دیواره در آبکندها
 Fig. 2. Stages of tensile crack formation, failure surface development, and wall collapse in gullies

شکاف‌های کششی توسعه‌یافته و دارای پتانسیل ریزش دیواره، تنها شکاف‌هایی وارد تحلیل شدند که فاصله آنها از لبه آبکند حداقل ۰/۵ متر و عمق آنها بیش از یک متر بود. این حدود به‌عنوان معیارهای اجرایی برای حذف ترک‌های سطحی، کم‌عمق و موضعی که لزوماً بیابانگر ناپایداری مؤثر دیواره نیستند، در نظر گرفته شد. موقعیت هر شکاف طولی و فاصله آن از لبه آبکند با روش RTK و توسط گیرنده GNSS چندفرکانسه مدل RayMAX در حالت فیکس شده برداشت شد.

برداشت داده‌ها با پهپاد: برای تولید مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر پهپادی با استفاده از یک کوادکوپتر برقی (مدل Phantom 4 Professional) تهیه شد. این سکو مجهز به دوربین FC6310 با فاصله کانونی ۸/۸ میلی‌متر و اندازه پیکسل سنسور $2/41 \times 2/41$ میکرومتر بود. مأموریت‌های پروازی با دقت و با تعریف پارامترهایی نظیر ارتفاع پرواز، مسیر پرواز، سرعت، همپوشانی تصاویر و جهت‌گیری دوربین طراحی شدند تا جمع‌آوری دقیق و پایدار داده‌های ژئومورفولوژیک آبکندها تضمین شود. به‌منظور دستیابی به پوشش مکانی کافی، همپوشانی طولی ۸۰ درصد و همپوشانی عرضی ۷۰ درصد تنظیم شد. دوربین همواره در وضعیت نادیر (۹۰ درجه) نگهداری شد تا هندسه دید عمودی یکنواختی حاصل شود.

شکاف‌های کششی، ترک‌هایی هستند که به موازات لبه آبکند و در فاصله معینی از آن در دیواره آبکند تشکیل می‌شوند. این پدیده نتیجه تمرکز تنش‌های کششی در دیواره آبکند است و زمانی رخ می‌دهد که نیروهای وارده از سوی توده خاک به لبه آبکند، از مقاومت کششی خاک فراتر رود (Terzaghi, 1943). وجود این شکاف‌ها معمولاً مقدمه‌ای برای ریزش قریب‌الوقوع دیواره آبکند و گسترش فرسایش است (Michalowski, 2013). همانطور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، این ترک‌ها موجب توسعه جانبی آبکند و پهن‌تر شدن کانال می‌شوند. نمونه‌ای دیگر از شکاف کششی طولی در یکی از آبکندهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که شکاف موازی با لبه آبکند در فاصله مشخصی از آن قرار گرفته است (شکل ۲-۱). عمق و عرض این شکاف‌ها بسته به جنس خاک، ارتفاع دیواره، وضعیت قرارگیری در قوس، پوشش گیاهی در لبه یا پای دیواره، شیب دیواره، شیب کف آبراهه، هندسه کانال آبکند و شرایط رطوبتی متفاوت است.

روش اجرای پژوهش-انتخاب آبکند: در پژوهش حاضر، ۴۷ آبکند شامل ۲۵ آبکند با شکاف طولی در لبه‌ها و ۲۲ آبکند بدون شکاف برای مراحل بعدی انتخاب شد. در پژوهش حاضر، به منظور تمرکز بر

مشخصات دقیق مأموریت‌های پروازی در جدول ۱ ارائه شده است. تمام برداشت‌ها بین ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ انجام شد تا شرایط نوری نسبتاً یکنواخت حفظ شود. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های زمینی پروفیل با استفاده از قابلیت پیاده‌سازی خط^۱ دستگاه RTK انجام شد تا نقاط مرجع شناسایی زمینی برای ارزیابی دقت داده‌های توپوگرافی حاصل از پهپاد تولید شود. در مجموع ۸۳ نقطه کنترل زمینی مستقل برای

ارزیابی دقت مدل فتوگرامتری مورد استفاده قرار گرفت. دقت افقی با مقایسه مختصات X و Y استخراج شده از مدل با مختصات برداشت شده زمینی و دقت ارتفاعی با مقایسه مقادیر Z ارزیابی شد. بر این اساس، مقادیر RMSE در راستاهای X، Y و Z به ترتیب برابر با ۲/۱۶، ۲/۲۶ و ۲/۰۹ سانتی‌متر به‌دست آمد.

جدول ۱- پارامترهای دقت پردازش فتوگرامتری (MRE: میانگین ریشه خطا، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا)

Table 1. Accuracy parameters of photogrammetric processing (MRE: Mean Reprojection Error, RMSE: Root Mean Square Error)

Flight height (m)	No. images calibrated	RMSE/X (cm)	RMSE/Y (cm)	RMSE/Z (cm)	MRE (pixels)
70	38576	2.16	2.26	2.09	0.145

پارامترهای مورفومتری آبکندها از مدل رقومی ارتفاع و تصویر عمودی حاصل از پردازش تصاویر پهپادی استخراج شدند. ارتفاع دیواره به‌صورت اختلاف ارتفاع بین تاج دیواره و کف آبکند در محل برداشت اندازه‌گیری شد. شیب دیواره نیز از نسبت تغییرات ارتفاع به فاصله افقی در مقطع عمود بر دیواره محاسبه شد. عرض پایین آبکند به‌عنوان فاصله بین دو پای دیواره و عرض بالای آبکند به‌عنوان فاصله بین دو لبه فوقانی دیواره‌ها در هر مقطع تعریف و اندازه‌گیری شد. وضعیت قرارگیری شکاف کشتی بر اساس موقعیت آن نسبت به هندسه پلان آبکند در سه کلاس قوس خارجی، قوس داخلی و مسیر مستقیم طبقه‌بندی شد. همچنین وضعیت پوشش گیاهی به‌صورت دودویی (وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی مؤثر در مجاورت شکاف) از روی ارتوفتو و بازدید میدانی تعیین شد.

تحلیل آماری: تحلیل‌های آماری پژوهش حاضر، در نرم‌افزار R Studio انجام شد. برای مقایسه میانگین متغیرهای کمی بین دو گروه آبکند ابتدا تست نرمالیت انجام شد و سپس از آزمون t مستقل و من ویتنی استفاده شد. برای کنترل نرخ خطای نوع اول ناشی از انجام مقایسه‌های چندگانه، از روش اصلاح Bonferroni استفاده شد (Bonferroni, 1936). سطح معنی‌داری اولیه ($\alpha = 0/05$) بر اساس تعداد مقایسه‌های انجام‌شده ($k = 5$) تعدیل شد و سطح معنی‌داری تصحیح‌شده

($\alpha/k = 0/01$) در نظر گرفته شد. همچنین برای هر آزمون، اندازه اثر^۲ محاسبه شد. برای آزمون t-test مستقل، اندازه اثر با استفاده از ضریب تفاوت استاندارد شده کوهن (Cohen's d) (Cohen, 1988) و برای آزمون Mann-Whitney با استفاده از رتبه‌بینی دوطرفه ($r = Z/\sqrt{N}$) گزارش شد. فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای تفاوت میانگین‌ها (در آزمون t) و تفاوت رتبه‌های میانگین (در آزمون Mann-Whitney) محاسبه و ارائه شده است.

برای بررسی ارتباط بین متغیرهای کیفی (نوع قوس آبکند و وضعیت پوشش گیاهی) با وقوع شکاف‌های کشتی، از نسبت شانس^۳ استفاده شد. دلیل انتخاب نسبت شانس، قابلیت تفسیر مستقیم آن به‌عنوان نسبت شانس وقوع رویداد (وجود شکاف) در گروه مواجهه (مانند قوس خارجی یا عدم وجود پوشش گیاهی) نسبت به گروه مرجع بود.

گروه مرجع برای متغیر نوع قوس (با سه سطح بیرونی، مستقیم، داخلی)، قوس مستقیم در نظر گرفته شد، زیرا این گروه دارای فراوانی میانی وقوع شکاف بود و به‌عنوان حالت پایه و معمول در منطقه محسوب می‌شود. برای متغیر پوشش گیاهی (دو سطح با پوشش و بدون پوشش)، گروه وجود پوشش گیاهی به‌عنوان مرجع انتخاب شد.

بحرانی شیب دیواره برای پیش‌بینی وقوع شکاف تعیین شد (Montgomery et al., 2012).

نتایج و بحث

بر اساس جدول ۲، میانگین شیب دیواره در آبکندهای شکاف‌دار (۸۶/۶۸ درجه) به‌طور چشمگیری بیشتر از بدون شکاف (۵۰/۰۴ درجه) است. آبکندهای دارای شکاف، میانه شیب (۹۹/۹۴ درجه) نزدیک به حداکثر است که نشان می‌دهد بیش از نیمی از این آبکندها، دیواره‌های تقریباً قائم دارند. در مقابل، میانگین ارتفاع دیواره بین دو گروه تفاوت چندانی ندارد (۵/۸۷ در مقابل ۵/۲۶ متر) که نشان می‌دهد ارتفاع به تنهایی نمی‌تواند پیش‌بینی‌کننده خوبی برای وقوع شکاف باشد. فاصله شکاف از لبه در آبکندهای دارای شکاف، دامنه وسیعی از ۰/۹۸ تا ۹/۰۳ متر دارد که حاکی از تأثیر عوامل محلی متعدد بر موقعیت دقیق شکاف است.

عمدتاً شکاف‌های طولی در فاصله ۱/۳ متری از لبه دیواره آبکند قرار دارند. آبکندهای بدون شکاف به‌طور میانگین دارای عرض پایین (۱۵/۳۹) در مقابل ۱۲/۷۶ (متر) و عرض بالای (۳۴/۱۸) در مقابل ۲۷/۲۴ (متر) بیشتری نسبت به آبکندهای دارای شکاف هستند. با این حال، حداکثر عرض بالا در گروه دارای شکاف (۸۵ متر) بسیار بیشتر از گروه بدون شکاف (۶۳ متر) است که نشان می‌دهد برخی آبکندهای بسیار پهن نیز می‌توانند شکاف داشته باشند. میانگین شیب کف در هر دو گروه نزدیک به هم است (۴/۵۹ در گروه بدون شکاف و ۴/۲۸ در گروه دارای شکاف). میانه شیب کف در هر دو گروه حدود یک درجه است که نشان می‌دهد بیشتر آبکندها دارای کف نسبتاً هموار هستند و مقادیر بالای شیب مربوط به نقاط پرت محدود می‌شود.

نسبت شانس (OR) برای هر جدول توافقی ۲×۲ از رابطه (۱) محاسبه شد (Szumilas, 2010).

$$OR = \frac{a \times d}{c \times b} \quad (1)$$

که در آن، a تعداد نمونه‌های دارای شکاف در گروه مواجهه، b تعداد نمونه‌های بدون شکاف در گروه مواجهه، c تعداد نمونه‌های دارای شکاف در گروه مرجع و d تعداد نمونه‌های بدون شکاف در گروه مرجع فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای نسبت شانس با استفاده از روش والد بر اساس لگاریتم طبیعی OR محاسبه شد (Hosmer et al., 2013).

$$CI_{95\%} = \exp \left[\ln(OR) \pm 1.96 \times \sqrt{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}} \right] \quad (2)$$

سطح معنی‌داری (P-value) با استفاده از آزمون دقیق فیشر محاسبه شد. دلیل انتخاب این آزمون، وجود سلول‌هایی با فراوانی کمتر از پنج در برخی جداول توافقی (به‌ویژه برای قوس داخلی) بود که آزمون کای دو را نامعتبر می‌سازد. آزمون دقیق فیشر، توزیع فوق‌هندسی تمام جدول‌های توافقی ممکن با مجموع حاشیه‌ای ثابت را محاسبه و P-value دو دامنه را گزارش می‌کند (Fisher, 1922). سطح معنی‌داری (آلفا) برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. کلیه محاسبات در نرم‌افزار R و با استفاده از تابع fisher.test() و oddsratio() انجام پذیرفت.

از ماتریس همبستگی اسپیرمن نیز برای بررسی همبستگی بین متغیرهای مورفومتری و فاصله شکاف از لبه آبکند استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای به روش سلسله مراتبی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و روش وارد برای شناسایی الگوهای پنهان در آبکندهای دارای شکاف انجام شد (Kaufman and Rousseeuw, 2009; Nekouiemehr et al., 2011). همچنین با استفاده از منحنی ROC، بر اساس شاخص Youden، آستانه

جدول ۲- ویژگی‌های آماری آبکندهای مورد بررسی

Table 2. Statistical characteristics of the studied gullies

Crack	Statistic	Crack distance (m)	Wall slope (°)	Bank height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
0	Mean	-	50.04	5.26	15.39	34.18	4.59
	Median	-	42.67	5.2	11	32	1.08
	Mode	-	100	5	25	35	0.89
	Minimum	-	21.25	1.6	1	6.5	0.565
	Maximum	-	100	9.2	45	63	33.44
	Std. deviation	-	22.98	1.96	12.63	16.64	9.16

Crack	Statistic	Crack distance (m)	Wall slope (°)	Bank height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
1	Mean	2.67	86.68	5.87	12.76	27.24	4.28
	Median	2.00	99.94	6.14	10.00	26.00	0.95
	Mode	1.30	100.00	5.00	14.00	35.00	1.0
	Minimum	0.98	26.50	1.30	2.00	5.30	0.56
	Maximum	9.03	100.00	9.30	45.00	85.00	40.53
	Std. deviation	1.89	22.05	2.09	10.78	19.31	10.35

بزرگ بود ($r = 0.63$) که حاکی از تأثیر عملی قوی این متغیر است. برای سایر متغیرها، تفاوت میانگین‌ها پس از تصحیح فاقد معنی‌داری آماری بود و اندازه اثر آنها در دامنه کوچک تا ناچیز قرار گرفت (جدول ۴).

نتایج این پژوهش نشان داد که تشکیل شکاف‌های کششی در دیواره آبکندها عمدتاً یک پاسخ مکانیکی به شرایط هندسی شیب است. اختلاف معنی‌دار شیب بین آبکندهای دارای شکاف و بدون شکاف بیانگر آن است که افزایش زاویه دیواره موجب افزایش تمرکز تنش‌های کششی در ناحیه تاج شیب شده و آستانه شکست را کاهش می‌دهد. این یافته با دیدگاه‌های مکانیک شیب که نقش شکاف‌ها را در کاهش پایداری کلی شیب و تغییر مسیر گسیختگی تأیید می‌کند، هم‌راستا است (Michalowski, 2013).

در مقابل، عدم معنی‌داری ارتفاع دیواره نشان می‌دهد که کنترل ناپایداری در این مقیاس بیشتر وابسته به هندسه زاویه‌ای است. این نتیجه با مطالعات فرسایش آبکندی که نشان داده‌اند فرایند آغاز شکست بیشتر به شرایط تنش موضعی وابسته است تا صرفاً اندازه آبکند، همخوانی دارد (Castillo and Gómez, 2016). به عبارت دیگر، افزایش ارتفاع تنها زمانی اثرگذار است که همراه با افزایش شیب یا تغییر شرایط مرزی تنش باشد.

نتایج آزمون کولموگراف-اسمرینف نشان داد که عرض بالای مقطع و ارتفاع دیواره دارای توزیع نرمال و سایر متغیرها غیرنرمال هستند (جدول ۳). به‌منظور بررسی معنی‌داری تفاوت میانگین متغیرهای کمی بین دو آبکندهای دارای شکاف و بدون شکاف، از آزمون t مستقل با فرض برابری واریانس‌ها (بر اساس آزمون لون) برای متغیرهای نرمال و از آزمون من-ویتنی برای متغیرهای غیرنرمال استفاده شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که از بین متغیرهای کمی اندازه‌گیری شده، تنها شیب دیواره تفاوت معنی‌داری بین دو گروه آبکند داشت (جدول ۴).

میانگین شیب دیواره در آبکندهای دارای شکاف به‌طور معنی‌داری بیشتر از گروه بدون شکاف است. در مقابل، تفاوت میانگین ارتفاع دیواره، عرض پایین آبراهه، عرض بالای آبراهه و شیب کف کانال بین دو گروه از نظر آماری معنی‌دار نیست. این یافته حاکی از آن است که شیب دیواره مهم‌ترین عامل کمی تأثیرگذار بر وقوع شکاف‌های کششی در آبکندهای منطقه مورد مطالعه است.

نتایج آزمون‌های آماری پس از اعمال اصلاح Bonferroni نشان داد که از بین پنج متغیر کمی، تنها شیب دیواره تفاوت معنی‌داری بین دو گروه آبکند دارد (P-value تصحیح‌شده = 0.0008 ، سطح معنی‌داری جدید: $\alpha = 0.01$). اندازه اثر برای شیب دیواره بسیار

جدول ۳- آزمون نرمال بودن متغیرها
Table 3. Test for normality of variables

	Wall slope (°)	Bank height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
Z index	0.191	0.093	0.169	0.128	0.414
Sig. (2-tailed)	.000c	.200c,d	.002c	.053c	.000c
Distribution	UnNormal	Normal	UnNormal	Normal	UnNormal

جدول ۴- مقایسه میانگین متغیرها در دو گروه آبکند دارای شکاف و بدون شکاف

Table 4. Comparison of mean variables between cracked and non-cracked gully groups

Variable	Group	Mean $\pm$ SD	Test statistic	Raw P-value	Bonferroni P-value	Effect size (95% CI)
Wall slope (°)	No crack	50.04 $\pm$ 22.98	U = 90.5	0	0	r = 0.63 (CI: -42.8 to -30.5)*
	Crack	86.68 $\pm$ 22.05				
Bank height (m)	No crack	5.26 $\pm$ 1.96	t = -1.01	0.32	1	d = -0.29 (CI: -1.65 to 0.55)
	Crack	5.87 $\pm$ 2.09				
Bottom width (m)	No crack	15.39 $\pm$ 12.63	U = 256.0	0.685	1	r = 0.07 (CI: -5.84 to 9.12)*
	Crack	12.76 $\pm$ 10.78				
Top width (m)	No crack	34.18 $\pm$ 16.64	t = 1.28	0.21	1	d = 0.37 (CI: -3.87 to 17.42)
	Crack	27.24 $\pm$ 19.31				
Channel bed slope (°)	No crack	4.59 $\pm$ 9.16	U = 241.5	0.475	1	r = 0.11 (CI: -5.55 to 6.15)*
	Crack	4.28 $\pm$ 10.35				

*CI for difference in medians (for Mann-Whitney) or difference in means (for t-test). d: Cohen's d, r: rank-biserial correlation. Bonf.: Bonferroni-corrected alpha = 0.01

خارجی حدود ۴/۲ برابر قوس مستقیم است و این ارتباط از نظر آماری معنی دار است (جدول ۵).

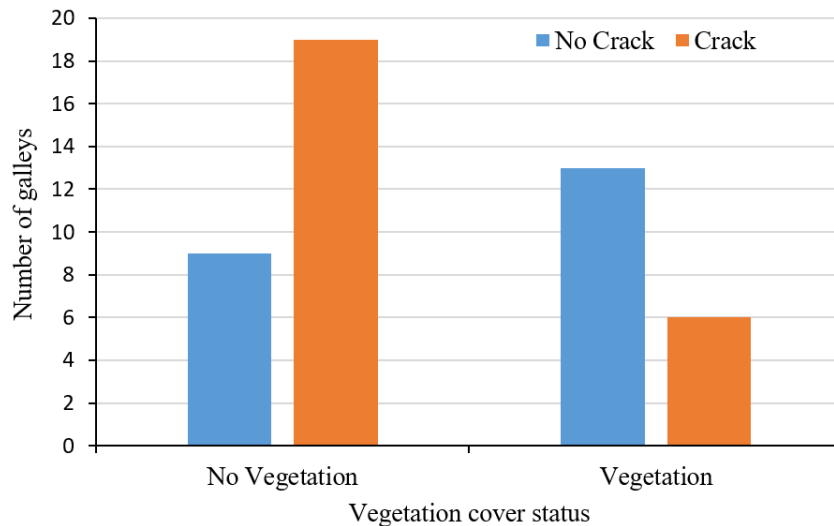
در قوس داخلی تنها چهار درصد آبکندهای دارای شکاف و ۲۷ درصد آبکندهای بدون شکاف مربوط به قوس داخلی بودند. نسبت شانس برای قوس داخلی در مقایسه با قوس مستقیم برابر ۰/۲ (فاصله اطمینان ۰/۹۵ تا ۱/۹۵، $P = 0.090$) محاسبه شد. اگرچه این نسبت شانس کمتر از یک بوده و کاهش عددی شانس را نشان می‌دهد، اما به دلیل اینکه فاصله اطمینان شامل عدد یک می‌شود و سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است، این ارتباط از نظر آماری معنی‌دار نیست. بنابراین نقش محافظتی قوس داخلی را نمی‌توان با اطمینان آماری تأیید کرد و این یافته صرفاً به‌عنوان یک روند قابل گزارش است.

بر اساس یافته‌های فوق، قوس خارجی (با نسبت شانس ۴/۲ نسبت به قوس مستقیم) و عدم وجود پوشش گیاهی (با نسبت شانس ۴/۵۷ نسبت به وجود پوشش گیاهی) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل خطر برای ایجاد شکاف‌های کششی در دیواره آبکندها شناسایی شدند. در مقابل، قوس داخلی به‌عنوان یک عامل محافظتی عمل می‌کند (نسبت شانس ۰/۲ نسبت به قوس مستقیم).

از نظر پوشش گیاهی، ۷۶ درصد آبکندهای دارای شکاف فاقد پوشش گیاهی بودند، در حالی که این نسبت در گروه بدون شکاف ۴۱ درصد بود (شکل ۳). گروه مرجع، وضعیت وجود پوشش گیاهی در نظر گرفته شد، زیرا این وضعیت به‌عنوان حلت پایه و محافظت‌کننده در نظر گرفته می‌شود. نسبت شانس برای وضعیت «عدم وجود پوشش گیاهی» برابر ۴/۵۷ (فاصله اطمینان ۰/۹۵ تا ۱/۳۱، $P = 0.02$) محاسبه شد (جدول ۵). این نتیجه نشان می‌دهد که حذف پوشش گیاهی، شانس وقوع شکاف کششی را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد.

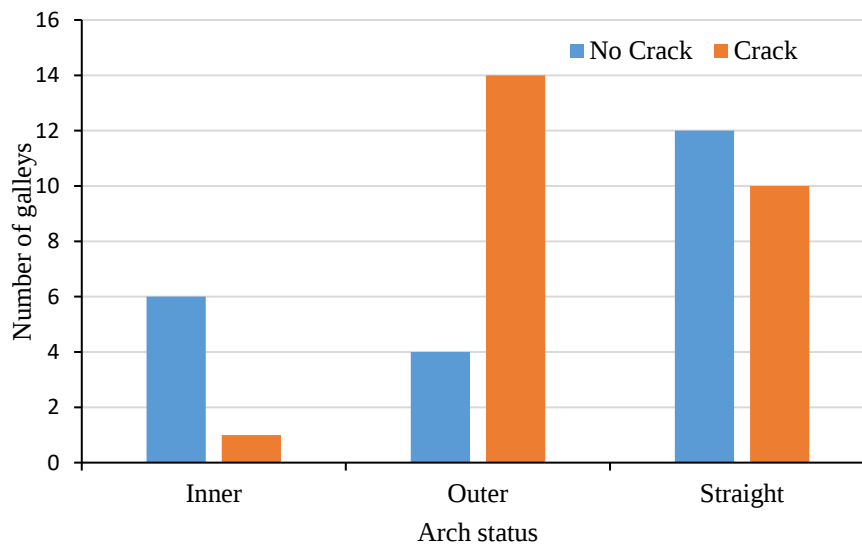
متغیر نوع قوس دارای سه سطح (خارجی، مستقیم، داخلی) است. گروه مرجع، قوس مستقیم (R) انتخاب شد، زیرا این وضعیت دارای فراوانی میانی وقوع شکاف (۴۰ درصد در گروه دارای شکاف و ۵۵ درصد در گروه بدون شکاف) بوده (شکل ۴) و به‌عنوان حالت پایه و معمول در منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شود. نتایج تحلیل به شرح زیر است.

در قوس خارجی ۵۶ درصد آبکندهای دارای شکاف و ۱۸ درصد آبکندهای بدون شکاف مربوط به قوس خارجی بودند. نسبت شانس برای قوس خارجی در مقایسه با قوس مستقیم برابر ۴/۲ (فاصله اطمینان ۰/۹۵ تا ۱/۰۴، $P = 0.018$) محاسبه شد. این بدان معناست که شانس وقوع شکاف کششی در قوس



شکل ۳- مقایسه فراوانی آبکندهای دارای و بدون شکاف بر اساس وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی

Fig. 3. Comparison of the frequency of gullies with and without cracks based on the presence or absence of vegetation cover



شکل ۴- فراوانی آبکندهای دارای و بدون شکاف بر اساس نوع قوس آبکند

Fig. 4. Frequency of gullies with and without cracks based on gully planform curvature

جدول ۵- نتایج تحلیل نسبت شانس، فاصله اطمینان ۹۵ درصد و سطح معنی‌داری برای متغیرهای کیفی (نوع قوس و پوشش گیاهی) در ارتباط با وقوع شکاف کششی

Table 5. Odds ratios (OR), 95% confidence intervals (CI), and P-values for qualitative variables (planform curvature and vegetation cover) associated with tensile crack occurrence

Comparison	Reference Category	OR	CI 95%	P-value	Interpretation
Outer	Straight	4.2	(1.04 - 16.89)	0.018	Meaningful
Inner	Straight	0.2	(0.02 - 1.95)	0.09	Non-meaningful*
No Vegetation	Vegetation	4.57	(1.31 - 15.95)	0.028	Meaningful

بیرونی قوس نسبت داد. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که هندسه قوس با تغییر الگوی تنش برشی و تمرکز جریان، یکی از محرک‌های اصلی توسعه ناپایداری در سیستم‌های آبکندی است

نتایج مربوط به متغیرهای کیفی نشان داد که قوس خارجی آبکند به‌طور معنی‌داری احتمال ایجاد شکاف را افزایش می‌دهد. این الگو را می‌توان به تمرکز جریان و افزایش نرخ فرسایش کناره‌ای در بخش

همبستگی معنی‌دار و مثبتی با فاصله شکاف از لبه آبکند دارد. این بدان معناست که با افزایش عرض کف کانال، فاصله شکاف از لبه دیواره به‌طور معنی‌داری بیشتر می‌شود.

ارتفاع دیواره با ضریب همبستگی 0.392 در آستانه معنی‌داری قرار داشت ($P = 0.053$) که نشان‌دهنده یک روند مثبت است، اما برای نتیجه‌گیری قطعی نیاز به بررسی با حجم نمونه بیشتر است. سایر متغیرها شامل شیب دیواره، عرض بالای آبراهه و شیب کف کانال همبستگی معنی‌داری با فاصله شکاف نشان ندادند. این یافته حاکی از آن است که اگرچه شیب دیواره مهم‌ترین عامل در وقوع شکاف است، اما پس از تشکیل شکاف، موقعیت دقیق آن (فاصله از لبه) عمدتاً تحت تأثیر ابعاد هندسی کف کانال (عرض پایین) قرار دارد.

(Vanmaercke et al., 2016). در مقابل، قوس داخلی به‌دلیل کاهش سرعت جریان و نقش رسوبگذاری نسبی، اثر محافظتی نسبی دارد.

اثر پوشش گیاهی، از نظر آماری در سطح 0.05 معنی‌دار بود، همچنین نسبت شانس بالای آن نشان می‌دهد که حذف پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور مکانیکی مقاومت برشی سطح خاک را کاهش داده و شرایط را برای آغاز ترک‌های کششی فراهم کند. این موضوع با یافته‌های مربوط به نقش ریشه‌ها در افزایش مقاومت خاک و کنترل فرسایش متمرکز هم‌راستا است که نشان می‌دهد پوشش گیاهی نه‌تنها یک عامل پوششی بلکه یک عنصر مکانیکی در پایداری شیب محسوب می‌شود (Vannoppen et al., 2015).

نتایج همبستگی اسپیرمن (جدول ۶) نشان داد که از بین متغیرهای کمی، تنها عرض پایین آبراهه

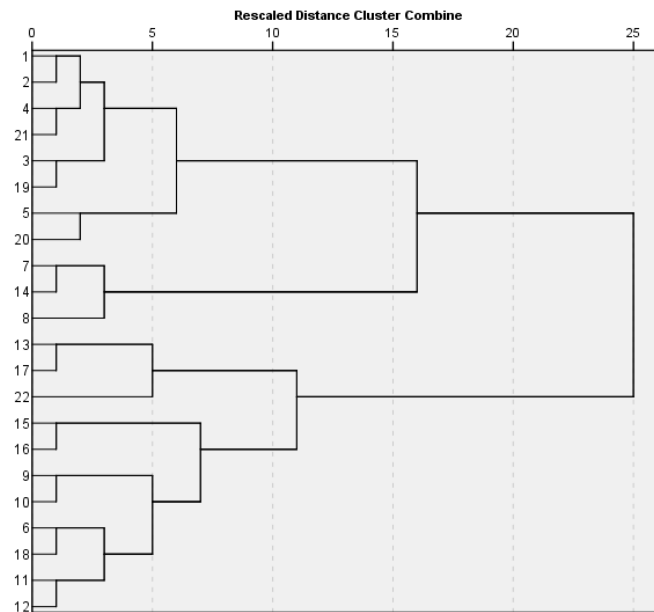
جدول ۶- همبستگی اسپیرمن بین مقدار فاصله شکاف از لبه آبکند با متغیرهای کمی اندازه‌گیری شده و شاخص VIF

Table 6. Spearman correlation between crack distance from gully edge and measured quantitative variables and VIF Factor

	Wall slope (°)	Bank height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
Spearman's rho	0.02	0.392	.490*	0.31	-0.326
Sig. (2-tailed)	0.925	0.053	0.013	0.132	0.112
VIF	1.53	2.464	2.883	2.513	1.527

نتایج آمار توصیفی سه خوشه نشان می‌دهد که آبکندهای دارای شکاف طولی از نظر ویژگی‌های هندسی دارای تفاوت‌های مشخصی هستند (جدول ۷). خوشه یک با شیب بسیار زیاد ($92/48$ درجه)، ارتفاع متوسط ($5/86$ متر) و عرض کم در کف ($5/04$ متر) مشخص می‌شود. در مقابل، خوشه دو کمترین مقدار شیب ($38/42$ درجه) و ارتفاع ($3/27$ متر) را داشته و در عوض بیشترین عرض بالایی ($29/9$ متر) را نشان می‌دهد. خوشه سه بیشترین مقادیر ارتفاع ($64/84$ متر)، عرض کف ($18/23$ متر) و عرض بالایی ($36/64$ متر) را به همراه شیب بسیار زیاد ($93/2$ درجه) داراست.

برای انجام تحلیل خوشه‌ای ابتدا داده‌های پرت که شامل سه خندق کنار گذاشته شدند. سپس با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به روش Ward و بر پایه فاصله اقلیدسی تحلیل خوشه‌ای انجام شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که آبکندهای دارای شکاف کششی در سه گروه اصلی قابل طبقه‌بندی هستند. تعداد خوشه‌ها بر اساس بررسی دندروگرام و محل جهش در فاصله ادغام تعیین شد. نتایج بیانگر وجود الگوهای متفاوت مورفومتری و هندسی در آبکندهای دارای شکاف بوده و نشان می‌دهد که تشکیل شکاف‌های کششی می‌تواند تحت شرایط متفاوتی از هندسه آبکند رخ دهد.



شکل ۵- دندروگرام طبقه‌بندی آبکندهای دارای شکاف کششی بر اساس ویژگی‌های مورفومتری و هندسی

Fig. 5. Hierarchical clustering dendrogram of gullies with tensile cracks based on morphometric and geometric characteristics

جدول ۷- مشخصات خوشه‌ای آبکندهای دارای شکاف

Table 7. Cluster characteristics of gullies with cracks

Cluster	Statistic	Crack distance (m)	Slope (°)	Height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
1	Mean	2.18	92.48	5.86	5.04	11.55	1.92
	Std. Deviation	1.16	8.02	1.34	3.83	4.18	1.01
	Variance	1.34	64.34	1.78	14.66	17.51	1.02
2	Mean	1.95	38.42	3.27	8.67	29.90	1.10
	Std. Deviation	0.25	19.97	1.70	5.13	4.62	0.63
	Variance	0.07	398.86	2.90	26.33	21.33	0.40
3	Mean	2.86	93.20	6.84	18.23	36.64	0.83
	Std. Deviation	1.81	16.81	1.73	8.27	13.83	0.31
	Variance	3.28	282.51	3.00	68.37	191.26	0.10

شکاف کششی از لبه آبکند تفاوت معنی‌داری بین خوشه‌ها نشان نداد. این نتایج بیانگر آن است که تفکیک خوشه‌ها عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی و مورفومتری آبکند قرار داشته و فاصله شکاف نقش کمتری در تمایز گروه‌های شناسایی‌شده ایفا کرده است.

به‌منظور بررسی تفاوت ویژگی‌های مورفومتری بین خوشه‌های استخراج‌شده، از آزمون ناپارامتری Kruskal-Wallis استفاده شد. نتایج نشان داد که بین خوشه‌ها از نظر شیب دیواره، ارتفاع دیواره، عرض پایین آبراهه، عرض بالای آبراهه و شیب کف کلنال تفاوت معنی‌داری وجود دارد (جدول ۸). در مقابل، فاصله

جدول ۸- نتایج آزمون کروسکال-والیس برای بررسی تفاوت ویژگی‌های هندسی آبکندهای دارای شکاف طولی بین سه خوشه

Table 8. Kruskal-Wallis test results for assessing differences in geometric characteristics of longitudinally fissured gullies among three clusters

	Crack distance (m)	Slope (°)	Height (m)	Bottom width (m)	Top width (m)	Channel bed slope (°)
Kruskal-Wallis H	1.04	9.58	7.96	12.05	14.38	11.69
Asymp. Sig.	0.59	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00

نتایج حاصل از خوشه‌بندی نشان می‌دهد که آبکندهای دارای شکاف طولی از نظر ویژگی‌های هندسی در سه گروه متمایز قابل تفکیک هستند که هر کدام بیانگر یک وضعیت مورفودینامیکی متفاوت در فرایند تکامل آبکندها است. این الگو با دیدگاه‌های مطرح‌شده در ادبیات فرسایش آبکندی مبنی بر چندمرحله‌ای بودن و غیرخطی بودن تکامل آنها همخوانی دارد (Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005).

خوشه یک با شیب بسیار زیاد و عرض کم در کف، نمایانگر تیپ غالب بر فرسایش عمقی است. در این مرحله، انرژی جریان عمدتاً صرف برش عمقی بستر شده و توسعه جانبی محدود است. این وضعیت معمولاً در مراحل اولیه تشکیل آبکندها یا در شرایطی با تمرکز بالای رواناب سطحی مشاهده می‌شود، جایی که فرسایش عمقی بر فرسایش جانبی غلبه دارد (Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005).

خوشه دو با شیب کمتر، ارتفاع پایین‌تر و افزایش قابل توجه عرض بالایی، نشان‌دهنده مرحله‌ای است که در آن فرسایش جانبی و گسترش عرضی نقش غالب‌تری پیدا می‌کنند. در این حالت، کاهش توان برشی جریان و افزایش ناپایداری دیواره‌ها موجب توسعه جانبی و عقب‌نشینی دیواره‌ها می‌شود. چنین وضعیتی در مطالعات گذشته به‌عنوان مرحله انتقالی در مدل‌های تکاملی آبکندها توصیف شده است (Poesen, 2011; Nachtergaele et al., 2002).

خوشه سه پیچیده‌ترین وضعیت مورفولوژیک را نشان می‌دهد که در آن هم ارتفاع و هم عرض مقطع به مقادیر بالایی می‌رسند. این امر بیانگر هم‌زمانی فرسایش عمقی و جانبی است. در این مرحله، فرایندهایی نظیر ریزش دیواره‌ای، جریان‌های شدید و ناپیوسته و حساسیت بالای مصالح نقش مهمی در توسعه هم‌زمان عمق و عرض دارند (Bocco, 1991; Torri and Poesen, 2014). این نوع مورفولوژی معمولاً به‌عنوان مرحله پیشرفته شناخته می‌شود.

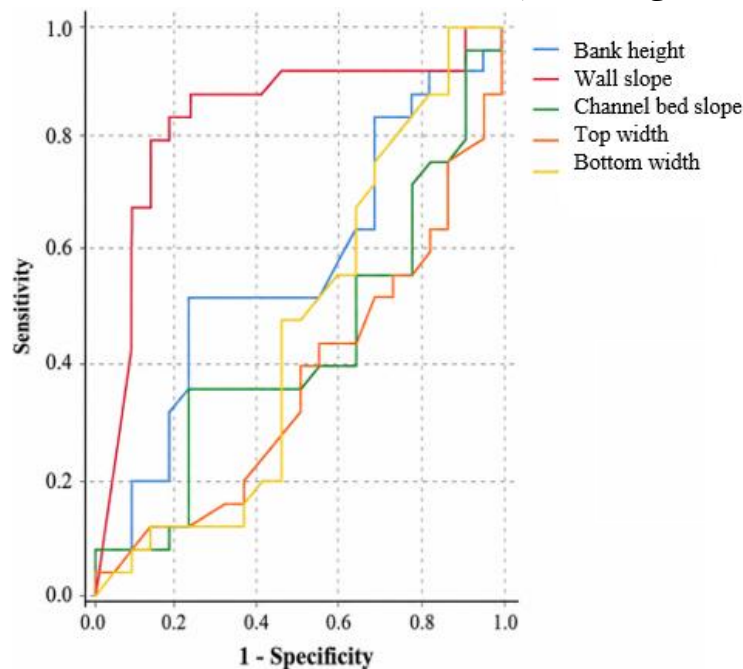
سه آبکند که قبل از انجام خوشه‌بندی کنار گذاشته شدند نیز در شیب کف کانال و فاصله شکاف تفاوت بسیار زیادی با سایر آبکندها داشتند. حضور این مقادیر پرت در داده‌های هندسی نشان‌دهنده وجود

ناهمگنی شدید در رفتار ژئومورفولوژیک آبکندها است. فاصله شکاف بیش از نه متر احتمالاً بیانگر گسترش غیرمعمول ترک‌های کششی و ادغام آن‌ها در اثر ریزش‌های پیشین دیواره است که منجر به افزایش غیرعادی پهنای شکست شده است. در مقابل، مقادیر بالای شیب کف کانال ($< 30^\circ$ درجه) در دو آبکند دیگر نشان‌دهنده شرایط ناپایدار و مرحله هدکات فعال است که در آن بستر کانال هنوز به تعادل مورفولوژیک نرسیده و فرایندهای ریزش و عقب‌نشینی دیواره غالب هستند. بنابراین، این مقادیر پرت به جای خطای آماری، بیانگر حلت‌های حدی در طیف تکامل آبکندها بوده و نشان‌دهنده وجود رژیم‌های مورفودینامیکی متفاوت در سیستم مورد مطالعه هستند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تکامل آبکندهای دارای شکاف طولی در منطقه مطالعه یک فرایند خطی و یکنواخت نیست، بلکه تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای از عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی و مکانیکی قرار دارد. بر این اساس، می‌توان سه رژیم مورفودینامیکی شامل فرسایش عمقی غالب، فرسایش جانبی غالب و فرسایش ترکیبی را برای این سیستم‌ها شناسایی کرد که با مدل‌های مفهومی ارائه‌شده در مطالعات پیشین همخوانی دارد (Poesen et al., 2011; Valentin et al., 2005). برای تعیین آستانه بحرانی متغیرهای مورفومتری در پیش‌بینی وقوع شکاف کششی، از تحلیل منحنی ROC استفاده شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که فقط در متغیر شیب دیواره دارای توان تفکیک مناسب برای پیش‌بینی وقوع شکاف کششی است (جدول ۹). مساحت زیر منحنی برای این متغیر (AUC) برابر 0.835 است که بر اساس طبقه‌بندی Hosmer et al., (2013)، نشان‌دهنده قدرت تشخیص عالی مدل است. آستانه بهینه بر اساس شاخص Youden ($J = \text{Sensitivity} + \text{Specificity} - 1$) تعیین شد. در این روش، نقطه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین مجموع حساسیت و ویژگی را دارد. بهترین آستانه شیب دیواره $78/4$ درجه تعیین شد. در این آستانه، حساسیت مدل (درصد تشخیص صحیح آبکندهای شکافدار) 80 درصد و ویژگی (درصد تشخیص صحیح آبکندهای بدون شکاف) $86/4$ درصد و دقت کلی مدل $83/2$ درصد محاسبه شد. این یافته

معرض ریزش مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، از این شیب به عنوان یک آستانه برای پایداری دیواره‌های جانبی براساس روش شکست شیب استفاده خواهد شد.

نشان می‌دهد که آبکندهایی با شیب دیواره بیشتر از ۷۸/۴ درجه، با احتمال ۸۰ درصد دارای شکاف کششی هستند. این آستانه می‌تواند به عنوان یک معیار سریع میدانی برای شناسایی آبکندهای ناپایدار و در



شکل ۶- منحنی ROC برای پیش‌بینی وقوع شکاف کششی بر اساس متغیرهای مورفومتری

Fig. 6. ROC curve for predicting the occurrence of tensile cracking based on morphometric variables

جدول ۹- عملکرد تشخیصی آستانه بحرانی متغیرهای مورفومتری آبکند برای پیش‌بینی شکاف کششی

Table 9. Diagnostic performance of critical wall slope threshold for predicting tensile crack occurrence

Test Result Variable(s)	Area	Std. Errora	Asymptotic Sig.b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Slope (°)	0.835	0.065	0.000	0.708	0.963
Height (m)	0.571	0.085	0.406	0.404	0.738
Bottom width (m)	0.465	0.089	0.696	0.292	0.639
Top width (m)	0.371	0.082	0.114	0.211	0.531
(°) Channel bed slope	0.439	0.086	0.477	0.271	0.607

این نوع آستانه‌ها در مطالعات پایداری شیب نیز به عنوان نقاط بحرانی شکست شناخته شده‌اند (Michalowski, 2013). در مقابل، سایر متغیرهای هندسی شامل ارتفاع دیواره، عرض پایین و بالای آبراهه و شیب کف کانال دارای AUC نزدیک یا کمتر از ۰/۵ بوده و از نظر آماری توان پیش‌بینی معنی‌داری نشان ندادند. این امر نشان می‌دهد که این متغیرها به تنهایی قادر به تفکیک شرایط پایدار و ناپایدار نیستند و نقش آنها احتمالاً غیرمستقیم یا وابسته به تعامل با سایر عوامل است.

از منظر پیش‌بینی، تحلیل ROC نشان داد که شیب دیواره با مقدار AUC برابر ۰/۸۳۵ دارای قدرت تشخیص بالا برای تفکیک آبکندهای ناپایدار است. این نتیجه نشان می‌دهد که یک پارامتر ساده هندسی می‌تواند اطلاعات قابل توجهی درباره وضعیت پایداری سیستم ارائه دهد. آستانه ۷۸/۴ درجه به دست آمده بر اساس شاخص Youden، یک نقطه گذار مکانیکی را نشان می‌دهد که در آن تعادل نیروهای مقاوم و محرک به نفع ناپایداری تغییر می‌کند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش به‌طور روشن نشان می‌دهد که تشکیل شکاف‌های کششی در دیواره آبکندها یک پدیده تصادفی یا چندعاملی هم‌وزن نیست، بلکه عمدتاً توسط یک کنترل‌کننده غلب یعنی شیب دیواره هدایت می‌شود. نتایج ROC و آزمون‌های مقایسه‌ای نشان داد که تنها شیب دیواره توان تفکیک معنی‌دار بین شرایط دارای شکاف و بدون شکاف را دارد و با مقدار AUC برابر ۰/۸۳۵، نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی ناپایداری دیواره ایفا می‌کند. بر اساس این نتایج، آستانه بحرانی ۷۸/۴ درجه به‌عنوان نقطه گذار مکانیکی بین وضعیت پایدار و ناپایدار قابل تعریف است. نقطه‌ای که در آن، افزایش تنش‌های کششی در تاج دیواره موجب غلبه نیروهای محرک بر مقاومت خاک و آغاز شکست می‌شود.

در مقابل، متغیرهایی مانند ارتفاع دیواره، عرض مقطع و شیب کف کانال اگرچه در توصیف هندسی آبکندها اهمیت دارند، اما در این مطالعه فاقد توان پیش‌بینی مستقل برای وقوع شکاف بودند. این موضوع نشان می‌دهد که مکانیسم آغاز شکست بیش از آنکه تابع ابعاد کلی سیستم باشد، به هندسه زاویه‌ای و شرایط تمرکز تنش در دیواره وابسته است. بنابراین، کنترل ناپایداری در این نوع سیستم‌ها باید بر پارامترهای مؤثر بر شیب و کاهش تمرکز تنش نه صرفاً تغییر ابعاد هندسی مقطع متمرکز شود.

در سطح عوامل کیفی، نتایج نشان داد که قوس خارجی و نبود پوشش گیاهی نقش تقویتی قابل توجهی در افزایش احتمال تشکیل شکاف دارند. قوس خارجی با ایجاد تمرکز جریان و افزایش تنش برشی در دیواره، شرایط را برای آغاز ترک‌های کششی تسهیل می‌کند، در حالی که پوشش گیاهی با تقویت مقاومت برشی خاک و کاهش حساسیت سطحی، نقش حفاظتی مهمی ایفا می‌کند. هرچند اثر قوس داخلی از نظر آماری قطعی نبود، اما روند کاهش احتمال شکست در این موقعیت قابل توجه است و از نظر مکانیکی قابل توجیه است.

تحلیل خوشه‌ای نیز نشان داد که آبکندهای دارای شکاف در قالب سه الگوی متمایز مورفودینامیکی قرار

می‌گیرند که بیانگر مراحل مختلف تکامل سیستم از غلبه فرسایش عمقی، گذار به فرسایش جانبی، تا حالت ترکیبی و پیشرفته ناپایداری است. این نتایج تأیید می‌کند که شکاف‌های کششی می‌توانند در شرایط کاملاً متفاوت هندسی و تکاملی ظاهر شوند، اما همچنان تحت کنترل یک منطق مکانیکی مشترک یعنی حساسیت سیستم به افزایش شیب دیواره هستند.

یافته‌های این پژوهش پیامدهای مستقیمی برای مدیریت فرسایش آبکندها دارد. نخست، شیب دیواره می‌تواند به‌عنوان یک شاخص سریع و قابل اندازه‌گیری میدانی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی استفاده شود. آبکندهایی با شیب بالاتر از آستانه بحرانی ۷۸/۴ درجه باید در اولویت اقدامات تثبیت دیواره قرار گیرند، زیرا احتمال تشکیل شکاف و گسترش شکست در آنها به‌طور معنی‌دار بالاتر است. دوم، نتایج نشان می‌دهد که اقدامات حجمی (مانند تغییر هندسه آبکند) بدون توجه به کاهش شیب یا کنترل تمرکز تنش، اثر پایداری محدودی دارند. بنابراین عملیات مهندسی باید بر کاهش شیب مؤثر دیواره یا ایجاد شکست انرژی جریان در قوس‌های خارجی متمرکز شوند. سوم، نقش پوشش گیاهی هرچند از نظر آماری ضعیف‌تر بود، اما از نقطه نظر مکانیک خاک نشان داد که حذف آن می‌تواند آستانه شکست را تسریع کند. بنابراین تثبیت بیولوژیک دیواره‌ها باید به‌عنوان یک ابزار مکمل در مدیریت آبکندها در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است نتایج این پژوهش بر پایه متغیرهای مورفومتری و هندسی استخراج شده از آبکندها به‌دست آمده است و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در تحلیل وارد نشده‌اند. ورود متغیرهای ژئوتکنیکی خاک در مطالعات آینده می‌تواند توان تبیین مدل و ارزیابی دقیق‌تر سازوکار تشکیل شکاف‌های کششی را بهبود بخشد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش از طرح پسا دکتری دانشگاه یاسوج با شماره قرارداد ۱۴۰۴د/۸۹/۲۸ استخراج شده است. بدین‌وسیله نویسندگان کمال قدردانی را از مسئولین دانشگاه جهت همکاری‌های انجام شده در انجام این

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

پژوهش اعلام می‌دارند. همچنین نویسندگان از شرکت فنی و مهندسی سبز اندیش پایش و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان جهت همکاری‌های انجام شده تشکر می‌نمایند.

منابع مورد استفاده

- Agharezi, H., Davudirad, A., Mardian M., Sofi, M., 2014. Investigation of the surface slope threshold of gully in Zahirabad Watershed, Shazand, Markazi Province. *Water. Engin. Manage.* 6, 1-9 (in Persian).
- Bayat, R., Alinejadian-Bidabadi, A., Soufi, M., Maleki, A., Akbarpour, O., 2024. Identifying effective factors on morphology of South West of Nazar Abad gullies using UAV. *Iran. J. Soil Res.* 38, 61-76 (in Persian).
- Bocco, G., 1991. Gully erosion: Processes and models. In Anderson, M.G., Brooks, S.P., (Eds.). *Advances Hillslope Process.* (1–20).
- Bonferroni, C.E., 1936. Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità. *Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze.* 8, 3-62.
- Castillo, C., Gómez, J.A., 2016. A century of gully erosion research: Perspectives, trends and challenges. *Catena* 145, 49–64.
- Cohen, J., 1988. *Statistical Power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Collison, A.J.C., 2001. The cycle of instability: stress release and fissure flow as controls on gully head retreat. *Hydrol. Process.* 15, 3–12. <https://doi.org/10.1002/hyp.150>.
- Detailed and executive studies., 2022. Review of detailed and executive studies of natural resources and watershed management of the Kolocheh basin of Bijar city. Sabz Andish Payesh Engineering Company, Volume 1 of Basin Physiography (in Persian).
- Dong, Y., Wu, Y., Yin, J., Wang, Y., Gou, S., 2011. Investigation of soil shear-strength parameters and prediction of the collapse of gully walls in the black soil region of Northeastern China. *Phys. Geogr.* 32, 161–178. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.32.2.161>.
- Fisher, R.A., 1922. On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P. *J. Royal Statistic. Soci.* 85, 87-94.
- Fox, G.A., Wilson, G.V., Simon, A., Langendoen, E.J., Akay, O., Fuchs, J.W., 2007. Measuring streambank erosion due to ground water seepage: Correlations to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. *Earth Surf. Process. Landform.* 32, 1558–1573. <https://doi.org/10.1002/esp.1490>
- Fox, G.A., Wilson, G.V., 2010. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: A review. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 717–733. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0319>.
- Fox, G.A., Wilson, G.V., Periketi, R.K., Cullum, R.F., 2006. Sediment transport model for seepage erosion of streambank sediment. *J. Hydrol. Eng.* 11, 603–611. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(603)).
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S., Sturdivant, R.X., 2013. *Applied logistic regression* (3rd ed.). John Wiley and Sons.
- Istanbulluoglu, E., Tarboton, D.G., Pack, R.T., Luce, C., 2003. A sediment transport model for incision of gullies on steep topography. *Water Resour. Res.* 39(4) <https://doi.org/10.1029/2002WR001467>.
- Kaufman, L., Rousseeuw, P.J., 2009. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons.
- Langendoen, E.J., & Simon, A., 2008. Modeling the evolution of incised streams. II: Streambank erosion. *J. Hydraulic Engine.* 134, 905–915. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:7\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:7(905))
- Langendoen, E.J., Simon, A., 2008. Modeling the evolution of incised streams. II: streambank erosion. *J. Hydraul. Engin.* 134, 905–915. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:7\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:7(905)).
- Marzolf, I., Ries, J.B., Poesen, J., 2011. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment: short-term versus medium-term gully-erosion variability. *Earth Surf. Process. Landf.* 36, 1604–1623. <https://doi.org/10.1002/esp.2172>.
- Michalowski, R.L., 2013. Stability charts for uniform slopes. *J. Geotechnic. Geoenviron. Engin.* 139, 958–968. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000828)
- Michalowski, R.L., 2013. Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis. *Canad. Geotechnic. J.* 50, 1011–1021.
- Momm, H.G., Wells, R.R., Bingner, R.L., 2015. GIS technology for spatiotemporal measurements of gully channel width evolution. *Nat. Hazards.* 79, 97–112. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1615-z>.

- Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., 2012. Introduction to linear regression analysis (5th ed.). John Wiley and Sons.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Oostwoud Wijdenes, D., Roxo, M., 2002. Gully erosion in a mediterranean environment: The role of land use and topography. *Earth Surf. Process. Landform.* 27, 1127–1142. <https://doi.org/10.1002/esp.401>
- Nekouiemehr, M., Emami, S.N., Raisian, R., Soufi, M., Goodarzi, M., 2011. Investigation of morpho-climatic characteristics of gullies in order to classify regions affected by gully erosion in Chaharmahal and Bakhtiary Province. *Water. Engin. Manage.* 3, 49-57 (in Persian).
- Oostwoud Wijdenes, D.J., Bryan, R., 2001. Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: A case study into temporal variation and sediment budgeting. *Earth Surf. Process. Landf.* 26, 911–933.
- Poesen, J., 2003. Gully erosion in dryland environments. In *Encyclopedia of soil science* (602–607). Marcel Dekker.
- Poesen, J., 2011. Challenges in gully erosion research. *Landform Analysis* 17, 5–9.
- Poesen, J., 2018. Soil erosion in the anthropocene: research needs. *Earth Surf. Process. Landform.* 43, 64–84.
- Qin, C., Zheng, F., Wells, R.R., Xu, X., Wang, B., Zhong, K., 2018. A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows. *Soil Tillage Res.* 178, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.008>.
- Shadfar, S., 2016. Determining the potential of gully erosion using artificial neural networks, case study: Toroud watershed. *Water. Engin. Manage.* 8, 256-263 (in Persian).
- Shahbazi, K., Khosrowshahi, M., Heshmati, M., Ghaituri, M., 2019. The effect of geological and topographic factors on determining gully erosion thresholds. *J. Water. Manage.* 11, 259-268 (in Persian).
- Soleimanpour, S.M., Soufi, M., Rousta, M.J., Shadfar, S., Jowkar, L., Keshavarzi, H., 2020. Investigation of permanent gullies extension trend in Khorrambid Watershed, Fars Province. *Water. Engin. Manage.* 12, 318-329 (in Persian).
- Soufi, M., Bayat, R., Partovi, A., 2022. Methods of gully control and reclamation in different provinces of Iran. *Water. Engin. Manage.* 14, 1-16 (in Persian).
- Szumilas, M., 2010. Explaining odds ratios. *J. Canad. Academy Child Adolesc. Psychiat.* 19, 227-229.
- Terzaghi, K., 1943. Stability of Slopes. In *Theoretical Soil Mechanics* (231–316). John Wiley and Sons, Inc.
- Thomas, J.T., Iverson, N.R., Burkart, M.R., Kramer, L.A., 2004. Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 995–1009. <https://doi.org/10.1002/esp.1084>.
- Thorne, C.R., Tovey, N.K., 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surf. Process. Landform.* 6, 469–484. <https://doi.org/10.1002/esp.3290060508>
- Thorne, C.R., Tovey, N.K., 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surf. Process. Landf.* 6, 469–484. <https://doi.org/10.1002/esp.3290060507>.
- Torri, D., Poesen, J., 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Sci. Review.* 130, 73-85.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Van Beek, L.P.H., Wint, J., Cammeraat, E.L.H., Edwards, J.P., 2016. Observation and simulation of root reinforcement on unstable slopes. *Catena* 147, 817–829.
- Van Beek, L.P.H., Wint, J., de Vente, J., 2016. Hydrological controls on slope stability and landslide occurrence. *Hydrol. Earth System Sci.* 20, 1–22.
- Vandaele, K., Poesen, J., Van den Heuvel, W., Muys, B., 1996. Factors controlling erosion in agricultural catchments. *Catena* 26, 1–19.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., 2016. Recent advances in understanding gully erosion processes and controlling factors. *Earth-Sci. Review.* 154, 33–55.