[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]



# پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه استان گلستان

کاظم صابر چناری*، عبدالرضا بهره‌مند، واحد بردی شیخ، چوقی بایرام کمکی؛
دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۸/۱۵ پذیرش ۹۶/۰۳/۲۷

## چکیده

فرسایش خندقی، به‌عنوان عامل خطر اراضی، یکی از چالش‌های آسیب‌زای فرسایش آبی به‌شمار می‌رود که تأثیر به‌سزایی در تخریب اراضی دارد. هدف از این تحقیق پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه استان گلستان با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و روش پیشنهادی گوپتا و جوشی (GNRF) است. بدین‌منظور در ابتدا نقشهٔ پراکنش پهنه‌ای خندق‌های (متغیر وابسته) حوزهٔ آبخیز قرناوه با استفاده از بازدیدهای میدانی و تصاویر ماهواره‌ای، با مقیاس ۱:۷۵,۰۰۰ در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات مکانی تهیه شد. در ابتدا برای مدل‌سازی کل خندق های مشاهداتی به دو بخش تقسیم شد: ۷۰ درصد پهنه‌های خندقی برای کالیبراسیون مدل و ۳۰ درصد آن برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. در گام بعدی ۷ لایه اطلاعاتی از قبیل درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح، نوع سازند زمین‌شناسی، نوع کاربری اراضی، میزان فاصله از رودخانه، میزان فاصله از جاده به‌عنوان عوامل مؤثر (متغیر مستقل) بر ایجاد فرسایش خندقی انتخاب شدند. با مقایسهٔ متغیرهای مستقل با متغیر وابسته، مقدار تراکم خندق در هر کلاس عوامل مستقل محاسبه شد. سپس نرخ‌دهی طبقات براساس روابط موجود در مدل‌های نسبت فراوانی وGNRF انجامشد. در نهایت با روی‌هم‌گذاری نقشه‌های نرخ‌دهی شده، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی به‌دست آمد. نتایج مقایسه درصد فراوانی خندق‌ها در کلاسه‌های خطر نشان داد که در مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF از کل پهنه‌های خندقی مرحلهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب

*نویسنده مسئول k.saberchenari@gmail.com

۷۸/۱۱ و ۷٤/۵۲ درصد پهنه‌ها در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از روش جمع کیفی و ضریب کاپا نشان داد که مدل نسبت فراوانی با مقدار جمع کیفی و ضریب کاپای بیش‌تر (۳ و ۰/۸۹) نسبت به مدل GNRF (۱/۲۷ و ۰/۷٤) برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی منطقهٔ بررسی شده پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه‌بندی خطر، فرسایش خندقی، حوزهٔ آبخیز قرناوه، نسبت فراوانی، گوپتا و جوشی.

## مقدمه

طبق نظریهٔ ینی، خاک تحت تأثیر چند عامل از قبیل اقلیم، توپوگرافی، موجودات زنده، مواد مادری و زمان تشکیل می‌شود. بنابراین سرعت تشکیل آن بستگی به تعامل چهار عامل مؤثر با زمان دارد: به‌طوری‌که، سرعت تشکیل خاک در مقیاس جهانی با نرخ متوسط ۰/۱ میلی‌متر در سال بین ۰/۰۱ تا ۷/۷ میلی‌متر در سال است، اما این سرعت در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به حدود ۰/۰۱ میلی‌متر یا کم‌تر در سال می‌رسد. [۱].

یکی از معضلات اساسی حوزه‌های آبخیز استان گلستان، نرخ زیاد فرسایش و تخریب خاک است به‌گونه‌ای که توازن بین فرایند خاک‌سازی و تلفات خاک به‌هم خورده و میزان تلفات از غرب به شرق استان افزایش می‌یابد. در این میان فرسایش خندقی و پایپینگ بیش‌ترین نقش را به‌خود اختصاص داده است [۲]. خندق براساس تعریف یک کانال یا آبراهه با رأس فرسایشی فعال و پرشیب و دیواره‌های با شیب تند است که بر اثر تخریب ناشی از جریان سطحی (معمولاً هنگام یا پس از رویداد بارش)، حرکات انحلالی و حرکات توده‌ای کوچک ایجاد می‌شود [۳]. گسترش خندق‌ها در بخش‌های شرقی استان گلستان موجب تخریب ظاهری محیط طبیعی، تخریب اراضی زراعی و با افزایش هزینه حفاظتی آن، تغییر راندمان آبیاری و کاهش تولید بالقوه کشاورزی (از طریق تمرکز رواناب داخل کانال باریک خندق به‌جای پخش رواناب در تمام سطح اراضی)، تغییر الگوهای موزاییک بین اراضی کشت شده است [٤]. خندق‌ها به‌دلیل اتصال مناطق بالادست حوضه به مناطق پایین‌دست، فراهم آوردن امکان انتقال رسوب و آلاینده‌ها، قطع راه‌های ارتباطی و زیان‌های مالی فراوان

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]



برای اراضی زراعی، منابع طبیعی و تأسیسات زیربنایی اهمیت ویژه‌ای دارند [۵]. بنابراین به‌منظور اجرای اقدامات پیش‌گیرانه و کنترل توسعهٔ فرآیندهای خندقی شدن در مقیاس جغرافیایی کوچک تا بزرگ؛ شناسایی و پهنه‌بندی خطر مناطق حساس به فرسایش خندقی بسیار ضروری است [٦].

پژوهش‌های گسترده‌ای در داخل و خارج از کشور درباره فرسایش خندقی انجام شده است. به‌طوری‌که جعفری گرزین و کاویان (۱۳۸۸) با استفاده از تلفیق سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، اثر عوامل توپوگرافی، ادافیک و هیدرولوژیک را در ایجاد فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز سرخ‌آباد استان مازندارن بررسی کردند. نتایج نشان داد که ٤٨ درصد منطقه از نظر فرسایش خندقی، در طبقه بالای حساسیت قرار دارند [۷]. شادفر (۱۳۹۰) مناطق حساس به فرسایش خندقی منطقه رودبار استان گیلان را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تحلیل کرد. نتایج نشان داد که این روش، به‌دلیل اولویت‌بندی عوامل، مدل مناسبی برای پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی به‌شمار می‌رود [۸]. ملکی و همکاران (۱۳۹۱) مناطق مستعد خندق‌زایی در حوضه رودخانهٔ مرِگ، واقع در جنوب شهر کرمانشاه را با استفاده از روش شاخص قدرت رودخانه و عوامل محیطی مؤثر بر ایجاد خندق شبیه‌سازی کردند [۹]. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی قابلیت مدل منطق فازی در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه‌چای در استان گلستان پرداختند. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر نشان داد که ۳۸ درصد منطقه را زمین‌هایی با خطر زیاد و بسیار زیاد شامل می‌شوند[ ۱۰]. شادفر (۱۳۹۳) از عملگرهای منطق فازی در حوزهٔ آبخیز طرود با هدف مشخص کردن پهنه‌های مختلف خطر، به‌دست آوردن مساحت هریک از آن‌ها و ارائهٔ نقشهٔ خطر فرسایش خندقی بهره برد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری روش جمع جبری فازی دقت بیش‌تری نسبت به عملگرهای فازی در پیش‌بینی خطر فرسایش خندقی دارد [۱۱]. شادفر (۱۳۹۵)، برای تعیین پتانسیل فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز طرود از ساختار پرسپترون چندلایه و الگوریتم لونبرگ مارگوت شبکه عصبی و فاکتورهای خاک، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از شبکه آبراهه‌ها و طبقات

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

ارتفاعی بهره جست. نتایج پهنه‌بندی فرسایش خندقی نشان داد که ۷۰/۲۶ درصد از حوزهٔ آبخیز در طبقه خیلی‌کم، ۱/۷۱ درصد در طبقه کم، ۲/٤٥ درصد در طبقه متوسط، ۲/٦٥ درصد در طبقه زیاد و ۲۲/۹۳ درصد در طبقه خیلی زیاد قرار گرفته است [۱۲]. شهریور و همکاران (۱۳۹٦) از روش فازی و ٦ عامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی شامل سنگ‌شناسی، درصد شیب زمین، نوع خاک، متوسط بارندگی سالانه، نوع استفاده از زمین و پوشش زمین به‌منظور شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی در نواحی خشک و نیمه‌خشک استان کهگیلویه و بویراحمد استفاده کردند. نتایج نشان داد پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل شاخص هم‌پوشانی و عملگرهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و گامای فازی نشان داد که مدل گامای فازی ۰/۸ با توجه به مساحت پهنه‌های مختلف و میزان خندق‌های رخ‌داده، مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضهٔ بررسی شده است [۱۳]. رحمتی و همکاران (۲۰۱٦) کارایی دو مدل وزن نشان‌گر و نسبت فراوانی را در تهیهٔ نقشه مناطق حساس به فرسایش خندقی منطقه چاور استان ایلام بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل نسبت فراوانی در مقایسه با مدل وزن نشان‌گر کارایی بهتری در تهیهٔ نقشهٔ مناطق حساس به فرسایش خندقی منطقهٔ بررسی شده دارد [۱٤]. از پژوهش‌های خارج از کشور بروی مناطق حساس به فرسایش خندقی می‌توان به این تحقیقات اشاره کرد: لسچن و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهش‌های خود با هدف شناخت مناطق آسیب‌پذیر تحت فرسایش خندقی در منطقه نیمه‌خشک در جنوب شرقی اسپانیا به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش خندقی در زمین‌های رها شده، نسبت به زمین‌های تحت کشت بیش‌تر است [۱۵]. لوکا و همکاران (۲۰۱۱) پهنه‌بندی فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز توربولو در ایتالیا را با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام دادند [ ۱٦]. از دیگر تحقیقات می‌توان به پژوهش اگبوما (۲۰۱۲) در نیجریه با استفاده مدل نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک؛ کونسکنتی و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱٤) در ایتالیا و دوب و همکاران (۲۰۱٤) در زیمباوه با استفاده از مدل وزن نشان‌گر و وایت و همکاران (۲۰۱۵) در شمال الجزایر با استفاده از رگرسیون لجستیک اشاره کرد[ ۱۷]، [ ۱۸]، [ ۱۹]، [ ۲۰]، [۲۱].

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

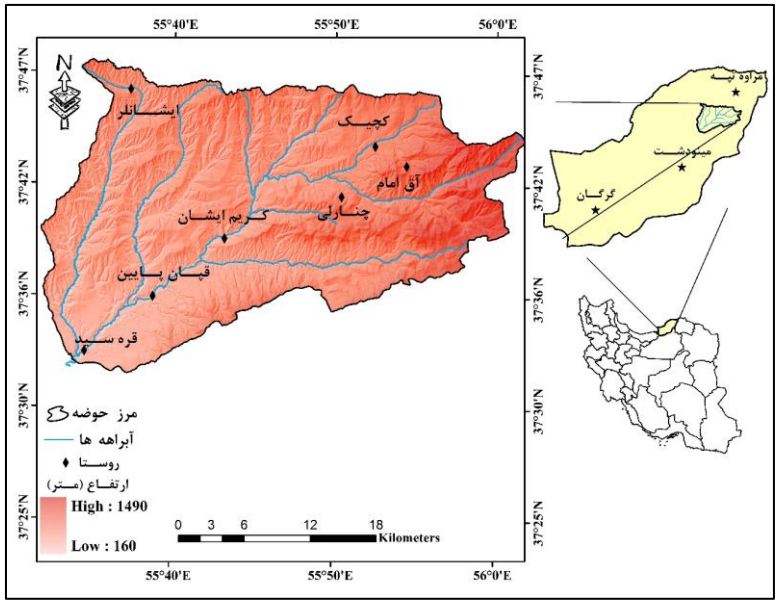
به‌دلیل شدت زیاد فرسایش خندقی و رشد فزاینده آن در حوزهٔ آبخیز قرناوه استان گلستان و با توجه به تحقیقات ذکر شده، هدف از این تحقیق شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر آن و عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی در منطقهٔ بررسی شده است. برای این منظور از مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF[1] استفاده و نتایج دو مدل با یک‌دیگر مقایسه شد. لازم بذکر است که برای اولین بار از مدل GNRF در بررسی پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ بررسی شده

حوزهٔ آبخیز قرناوه با مساحت ۷۸٤/۳۰ کیلومترمربع در شرق استان گلستان و در شهرستان کلاله واقع شده است. این حوضه از نظر جغرافیایی (UTM) در محدودهٔ طول شرقی ۳۷۰۳٦۰ تا ٤۱٤٤۷۲ و عرض شمالی ٤۱۸۳۸۱۹ تا ٤۱٥٥۲٦۷ قرار دارد. این حوضه روی سرشاخه‌های گرگان‌رود بسته شده است. مهم‌ترین رودخانه‌های این حوضه، قرناوه و شوردره است که پس از اتصال این انشعابات و پیوستن رودخانه مادرسو و چهل چای در پائین‌دست حوضه، گرگان‌رود را تشکیل داده که در نهایت این رودخانه به خلیج گرگان تخلیه می‌رسد. ارتفاع متوسط وزنی حوضه ۵۹۰ متر است. شیب متوسط حوضه ۲٦ درصد که به‌سمت پایین‌دست حوضه از شیب آن کاسته شده و به ۲ الی۳ درصد می‌رسد. کاربری عمده حوضه شامل مرتع و زراعت است. خاک حوضه عمدتاً سیلتی لومی و از نظر زمین‌شناسی نیز عمدتاً به‌وسیلهٔ رسوبات بادی یخچالی مثل لس و رسوبات جدید و قدیم آبرفتی پوشیده شده است. بنابراین این منطقه به‌طور ذاتی دارای فرسایش‌پذیری زیادی است. رودخانه قرناوه به‌صورت یک گالی ناپایدار و بسیار فرسایشی بوده و در برخی مناطق دارای عمق زیاد و دیواره های جانبی عمودی است [۲۲]. از این‌رو در این تحقیق, حوزه آبخیز قرناوه به‌منظور تهیهٔ پهنه‌های خطر فرسایش خندقی انتخاب شد. شکل ۱ موقعیت منطقهٔ بررسی شده را در استان گلستان نشان می‌دهد.

1. Gully Nominal Risk Factor




**شکل ۱. موقعیت حوزهٔ آبخیز قرناوه در استان گلستان و ایران**

## روش تحقیق

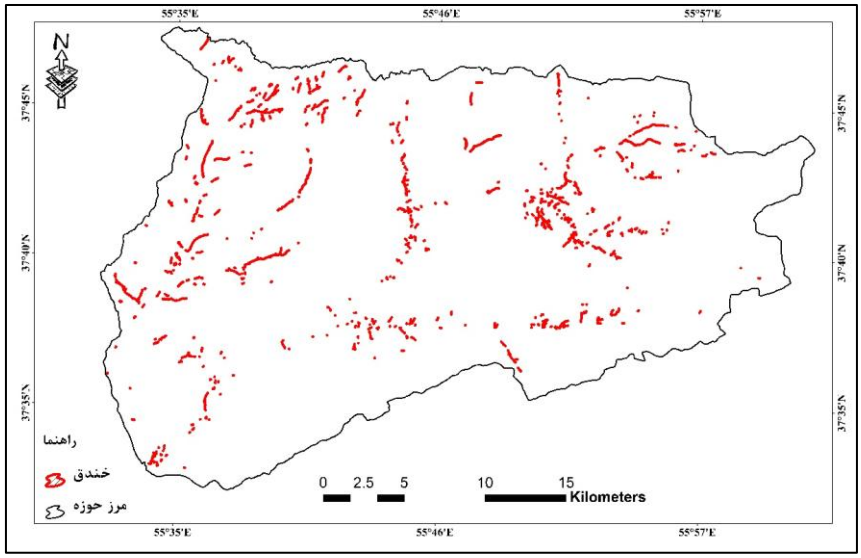
برای تهیه نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه در ابتدا نقشهٔ پراکنش خندق‌های موجود در منطقه با بازدید میدانی گسترده و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای پهنه‌های خندقی حوضه تهیه و وارد نرم‌افزار ArcGIS شد (شکل۲).

سپس با توجه به بررسی‌های انجام شده در داخل و خارج از کشور در زمینه فرسایش خندقی و شرایط منطقهٔ بررسی شده ۷ عامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی شامل شیب، جهت شیب، انحنای سطح، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه انتخاب شد [۲]، [٤]، [۵]، [۸]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۲۲].

نقشهٔ عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروی مسلح، نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشهٔ کاربری اراضی منطقه از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

(سنجنده ETM) در محیط ArcGIS با فرمت رستری تهیه شد. از کل پهنه‌های خندقی موجود در منطقه (۳۲/۸ هکتار) به‌صورت تصادفی با استفاده از ابزار Random Selection در محیط ArcGIS ۷۰٪ خندق‌ها برای تهیهٔ مدل نقشه پهنه‌بندی خطر و ۳۰٪ خندق‌ها نیز برای ارزیابی آن در نظر گرفته شد [۱۲]، [۲۰] و [۲۳]. در مرحلهٔ بعد نقشه هر یک از عوامل مؤثر با نقشه پراکنش خندق‌ها تلفیق و تراکم خندق‌ها در هر طبقه از عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی تعیین شد. نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

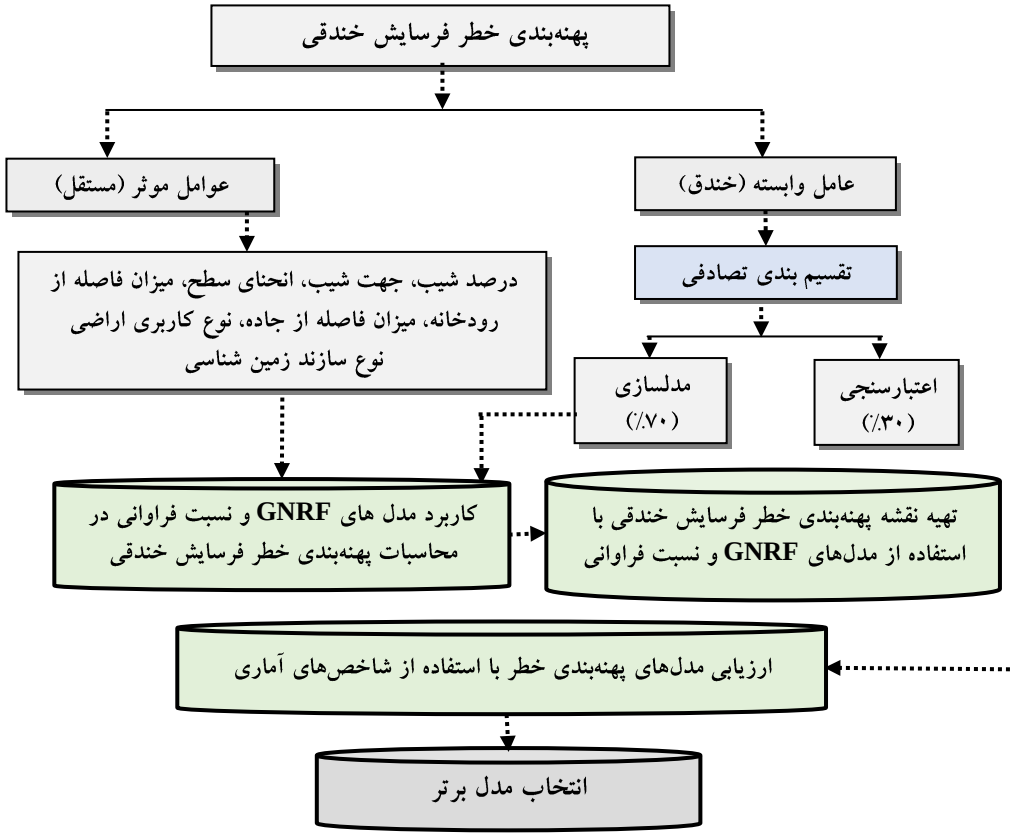



**شکل ۲. موقعیت خندق‌ها در حوزهٔ آبخیز قرناوه**

## روش نسبت فراوانی (FR)

پس از بررسی عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خندقی و تهیهٔ نقشه‌های مربوط؛ نرخ‌دهی عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از روش نسبت فراوانی تعیین شد. روش **نسبت** فراوانی یک تکنیک آماری دو متغیره و ابزار ارزیابی ژئومکانی ساده‌ای است که برای محاسبهٔ رابطهٔ احتمالی بین متغیرهای مستقل و وابسته (فرسایش خندقی) در نقشه‌های با کلاس‌های متعدد استفاده می‌شود تا روابط بین خندق‌ها و عوامل مختلف مؤثر در منطقهٔ بررسی شده

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]




**شکل ۳. نمودار جریانی تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزه آبخیز قرناوه**

**روش نسبت فراوانی (FR)**

آشکار شود [۲٤]. در حقیقت نسبت فراوانی به‌عنوان احتمال وقوع یک صفت مشخص تعریف شده است که بیان‌گر نسبت احتمال رخداد یک پدیده مشخص (فرسایش خندقی) به عدم رخداد آن پدیده است [۲۵]. برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی مشخص، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی درصد پیکسل‌های دارای فرسایش خندقی و فاقد فرسایش منطقهٔ بررسی شده تعیین و نهایتاً نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس مرتبط با آن از تقسیم نسبت مناطق دارای فرسایش (درصد پیکسل‌هایی که در آن فرسایش رخ‌داده) به مناطق فاقد فرسایش (درصد پیکسل‌های فاقد فرسایش)

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

محاسبه می‌شود [۲۶]. محاسبهٔ نسبت فراوانی برای هر یک از کلاس‌های عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی براساس رابطهٔ (۱) است:

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (۱)$$

که در آن A: پهنه‌های خندقی هر کلاس مربوط به هر عامل، B: مساحت کل پهنه‌های خندقی در منطقهٔ بررسی شده، C: مساحت هر کلاس مربوط به هر عامل، D: مساحت کل منطقهٔ بررسی شده است. به‌عبارت دیگر، نسبت بین پهنه‌های دارای فرسایش خندقی به مساحت کل منطقه، بیان‌گر نسبت فراوانی است. از این رو $Fr<1$ نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی ضعیف بین خندق‌های رخ‌داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن و $Fr>1$ نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی زیاد بین خندق‌های رخ‌داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن است. $Fr$ نزدیک به یک نشان می‌دهد که هم‌بستگی معنی‌داری بین خندق‌های رخ‌داده و عوامل مؤثر بر وقوع آن وجود ندارد. به‌طورکلی هم‌بستگی مثبت نشان‌دهندهٔ احتمال فرسایش بیش‌تر و در حالی که هم‌بستگی منفی نشان‌دهندهٔ احتمال فرسایش کم‌تر است [۲۷]. برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی فرسایش خندقی مقادیر نسبت فراوانی هر عامل در دورهٔ آموزش با یک‌دیگر با استفاده از رابطهٔ (۲) جمع شده است [۲۵]:

$$GEHZM = \sum (FR)_i \ (i = 1,2,...,n) \quad (۲)$$

که در آن GEHZM: نشان‌دهندهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی، FR: نسبت فراوانی هر عامل و n تعداد کل عوامل است. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی به‌دست آمده بر اساس روش شکستگی‌های طبیعی (Natural Break) در پنج کلاس خطر خیلی‌کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. این نوع طبقه‌بندی براساس گروه‌بندی‌های طبیعی موجود در ذات داده‌ها انجام می‌شود. نقاط شکستگی بین دسته‌ها به گونه‌ای معین می‌شود که به بهترین وجه ممکن مقادیر مشابه در یک گروه جای داده شوند و تفاوت مابین کلاس‌ها بیشینه شود [۲۸].

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

## روش گوپتا- جوشی (GNRF)

این مدل را اولین بار گوپتا و جوشی (۱۹۹۰) ارائه کردند که به‌روش پیشنهادی گوپتا و جوشی معروف است [۲۹]. پس از رقومی کردن و طبقه‌بندی کردن متغیرهای مؤثر بر ایجاد فرسایش در قالب سامانه اطلاعات جغرافیایی، مقادیر کلاس‌های هر یک از عوامل براساس رابطهٔ (۳) محاسبه شد [۳۰]:

$$GNRF = \frac{\text{پهنه‌های خندقی رخ داده در هر طبقه از نقشه عامل}}{\text{میانگین خندق‌های رخ داده در کل طبقات نقشه عامل}} \quad (۳)$$

مقادیر به‌دست آمده با استفاده از رابطهٔ (۳) براساس جدول ۱ نرخ‌دهی می‌شوند بدین‌صورت که برای کلاس‌های با GNRF کم‌تر از ۱ امتیاز صفر، کلاس‌های با مقدار بین ۲-۱ امتیاز ۱؛ و برای کلاس‌های با مقدار بیش‌تر از ۲ امتیاز ۲ را در نظر بگیریم [۲۸] و [۳۱].

**جدول۱. وزن مربوط به مدل GNRF**

| ردیف | مقدار GNRF | امتیاز |
|---|---|---|
| ۱ | GNRF<1 | ۰ |
| ۲ | 1<GNRF< 2 | ۱ |
| ۳ | GNRF>2 | ۲ |

پس از امتیازدهی به طبقات عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی، نقشه‌های امتیاز عوامل مؤثر در محیط ArcGIS ایجاد شد. از جمع جبری این نقشه‌ها، نقشه پهنه‌بندی خطر فراسایش خندقی تهیه شد. نقشه تهیه شده بر اساس روش شکستگی‌های طبیعی در پنج کلاس خطر خیلی‌کم، خطرکم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی‌زیاد طبقه‌بندی شد [۲۸].

## اعتبارسنجی مدل‌های پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه

برای اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی تهیه شده با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF از دو روش جمع کیفی[1] و ضریب کاپا استفاده شد. برای این منظور پهنه‌های خندقی در نظر گرفته شده برای دورهٔ اعتبارسنجی (۳۰ درصد پهنه‌های

1. Quality of Sum

خندقی) به‌کار گرفته شد [۱۲]، [۲۰]، [۲۳]. تراکم خندق‌ها یا نسبت تراکمی[1] نیز با تقسیم نمودن تراکم خندق در ردهٔ خطر خاص به تراکم متوسط خندق‌ها بر مبنای تراکم سطحی و مساحت خندق‌ها محاسبه می‌شود (رابطهٔ ٤).

$$Dr = \frac{S_i / A_i}{\sum_1^n S_i \Big/ \sum_1^n A_i} \qquad (٤)$$

که در آن که در آن، Dr: تراکم خندق‌ها در هر کلاس خطر، Ai: مساحت i مین کلاس خطر در یک نقشه پهنه‌بندی، Si: مجموع مساحت خندق‌های رخ داده در هر کلاس خطر و n: تعداد کلاس‌های خطر است. در صورتی‌که در منطقه چند نقشه خطر تهیه شده باشد با استفاده از مقدار جمع کیفی نقشه‌های صحیح‌تر و با دقت بیش‌تر را می‌توان شناسایی کرد. یک نقشه خطر خوب نقشه‌ای است که بهترین جدایش را بین مناطق با تراکم زیاد فرسایش خندقی و مناطق با تراکم اندک فرسایش ایجاد کند. جمع کیفی بیش‌تر بیان‌گر جدایش بهتر بین رده های خطر مختلف است. جمع کیفی به‌صورت رابطهٔ (٥) تعریف می‌شود:

$$Qs = \sum_{i=1}^{n} (Dr - 1)^2 \times s \qquad (٥)$$

که در آن Qs: جمع کیفی مدل، n: تعداد رده‌های خطر در یک نقشهٔ پهنه‌بندی خطر و s: مساحت رده خطر به درصد در منطقه است. از نظر تئوری حد فوقانی خاصی را برای جمع کیفی نمی‌توان در نظر گرفت ولی معمولاً مقدار آن بین صفر تا هفت است. هر نقشه پهنه‌بندی که دارای جمع کیفی بیش‌اتر باشد دارای صحت و دقت بیش‌تری است [۳۲]، [۳۳].

در ادامه به‌منظور ارزیابی نتایج خروجی مدل‌های استفاده شده در برآورد خطر فرسایش خندقی از ضریب آماری کاپا نیز استفاده شد. این ضریب میزان تطـابق نتایج مدل پهنه‌بندی با واقعیت زمینی را نشان مـی‌دهـد و فرمول آن بدین‌صورت است [٣٤].

$$\text{ضریب کاپا} = \frac{\text{مقدار توافق مورد نظر} - \text{مقدار توافق مشاهده شده}}{\text{مقدار توافق مورد نظر} - ۱} \qquad (۶)$$

1. Density ratio (Dr)

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

مقدار کاپا می‌تواند عددی بین ۱- تا ۱+ باشد. لندیس و کوچ (۱۹۷۷) نوعی طبقه‌بندی را برای تفسیر مقادیر ضریب کاپا ارائه کردند جدول ۲. هر چقدر مقدار کاپا بزرگ‌تر باشد نشان دهنده تطابق بهتر و دقت بیش‌تر است [ ۳۵].

**جدول ۲.میزان تطابق بر اساس مقایر ضریب کاپا**

| کلاس | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مقدار کاپا | <۰ | ۰-۰/۲ | ۰/۲۱-۰/٤ | ۰/٤۱-۰/٦ | ۰/٦۱-۰/۸ | ۰/۸۱-۱ |
| میزان تطابق | ضعیف | خیلی‌ضعیف | کم | متوسط | قابل توجه | تقریباً کامل |

برای این منظور بعد از کلاسه‌بندی نقشهٔ نهایی، با استفاده از پهنه‌های خندقی در نظر گرفته شده برای مرحلهٔ ارزیابی ۲٤٥ نقطه خندقی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید و وزن‌دهی شد (وجود خندق). به‌همین تعداد نیز نقاطی را به‌صورت تصادفی در مناطق دیگر انتخاب و وزن آن‌ها را نیز یادداشت شد (عدم وجود خندق). سپس ماتریس خطا مشاهده‌ای و پیش‌بینی هر کدام از دو مدل GNRF و نسبت فراوانی تشکیل شد. سرانجام مقدار ضریب کاپا با استفاده از رابطهٔ (٦) محاسبه شد [۳٦].

## نتایج و بحث

نقشهٔ پراکندگی خندق‌ها، با نقشه‌های عامل‌های مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی تلفیق شده و تراکم خندق‌ها در هر یک از طبقات عوامل تأثیرگذار محاسبه شد. پس از محاسبه نرخ‌های طبقات هر عامل با استفاده از روابط مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF، این نرخ ها در محیط ArcGIS به نقشه اضافه و نقشه فاکتورهای مؤثر بر فرسایش خندقی تهیه شد. نتایج تراکم طبقات عوامل مؤثر و نرخ‌دهی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

بررسی عوامل تأثیرگذار بر رخ‌داد فرسایش خندقی نشان داد که سازند نهشته‌های رسوبی لسی بیش‌ترین حساسیت به فرسایش خندقی را دارد که دلیل این امر به انحلال‌پذیری زیاد این نوع سازند بر می‌گردد. از طرف دیگر فراوانی زیاد (۷۷/۵۳ درصد) آن در منطقه، آن را جزء عوامل عمده ایجاد فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه قرار می‌دهد. این نتایج با

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

نتایج تحقیقات [۲]، [٤]، [۸]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹] هم‌خوانی دارد. طبقه کاربری مرتع با بیش‌ترین مقادیر نسبت فراوانی و GNRF (٤/۲۹ و۲) بیش‌ترین سهم در وقوع فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه را دارد که با نتایج پژوهش‌های [۱۰] و [۱۱] هم‌خوانی دارد. به‌طورکلی اراضی بدون پوشش و لخت نسبت به اراضی دارای پوشش نقش بیش‌تری در ایجاد فرسایش دارند [٤۰]. عوامل فاصله از آبراهه و جاده با استفاده از روش چارک[1] طبقه‌بندی شدند. در این روش تعداد مساوی از سلول در هر کلاس قرار می‌گیرد. این روش در پژوهش‌های متعددی استفاده شده و کارایی بسیار خوبی داشته است [۱۲]، [٤۱]، [٤۲].

بررسی میزان فاصله از آبراهه نشان می‌دهد که مناطق با فاصلهٔ کم‌تر از ۱٤۲/۲ متر از آبراهه بیش‌ترین مقدار نسبت فراوانی وGNRF (۳/۵۵ و ۲) را به‌خود اختصاص داده است. هم‌چنین درصد فراوانی خندق‌ها نیز با افزایش فاصلهٔ از آبراهه کاهش می‌یابد. براساس بررسی‌های انجام شده با عمل آب‌شویی و فرسایش کناری دامنه‌های مشرف به آبراهه، تعادل این دامنه‌ها برهم خورده و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی در کنار آبراهه‌ها افزایش می‌یابد [۱۱]، [۲۰]، [۳۷]. بررسی نقشهٔ فاصله از جاده نیز نتایج مشابهی مانند فاصله از آبراهه نشان داد. بیش‌ترین درصد فراوانی (۵۵/٤۹) خندق‌ها در فاصلهٔ کم‌تر از ۱۵۱/۱ از جاده به‌دست آمده و با افزایش فاصله از جاده این مقدار کاهش می‌یابد، که با نتایج پژوهش‌های [۸] و [۳۷] در تأثیر جاده بر ایجاد فرسایش خندقی مطابقت دارد. مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF نیز در طبقه فاصله از جاده کم‌تر از ۱۵۱/۱ متر دارای بیش‌ترین مقدار (۲/۸۷ و ۲) هستند. بررسی نقشه درصد شیب حوزهٔ آبخیز قرناوه براساس طبقه‌بندی مخدوم [٤۳] نتایج بررسی‌های انجام شده رواناب در شیب‌های پایین فرصت تمرکز و نفوذ بیش‌تری دارد بنابراین احتمال ایجاد حفره و تبدیل شدن به خندق افزایش می‌یابد [٤]، [۱۰] و [۱۱]. در بررسی نقشه جهت شیب حوضه، جهت شمال غربی با بیش‌ترین درصد فراوانی خندق‌ها، حساسیت بیش‌تری در وقوع فرسایش خندقی دارد که با نتایج تحقیقات [۹] مطابقت دارد.

1. Quantile Classification

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

## جدول۳. مقادیر حاصل از ارتباط عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی

| عامل | طبقه | پهنه‌های خندقی | | نسبت فراوانی | GNRF | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | مساحت | درصد | | امتیاز | نرخ |
| سنگ شناسی | نهشته‌های رسوبی لسی | ۱۸/۹۰ | ۷۷/۵۳ | ۱/۰۳ | ۷/۷۵ | ۲ |
| | رسوبات آبرفتی عهد حاضر | ۱/۲۱ | ٤/۹۵ | ۰/۸۰ | ۰/۵۰ | ۰ |
| | آبرفت های پادگانه‌های کهن | ۰/۰۲ | ۰/۰۸ | ۰/۰٤ | ۰/۰۱ | ۰ |
| | سازند تیرگان | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | سازند سرچشمه | ۱/۰٤ | ٤/۲۸ | ۰/۹٦ | ۰/٤۳ | ۰ |
| | سازند سنگانه | ۲/٤۲ | ۹/۹۱ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ۰ |
| | سازند آتامیر | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | سازند مزدوران | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | سازند پستلیق | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | سازند خانگیران | ۰/۷۹ | ۳/۲٦ | ۲/۳۰ | ۰/۳۳ | ۰ |
| درصد شیب | ۰-۲ | ۲/۳۷ | ۹/۷۳ | ۳/۲۷ | ۰/۸۸ | ۰ |
| | ۲-۵ | ۲/۲۱ | ۹/۰۵ | ۲/۱۱ | ۰/۸۱ | ۰ |
| | ۵-۸ | ۲/۳۱ | ۹/٤۸ | ۱/۹۲ | ۰/۸۵ | ۰ |
| | ۸-۱۲ | ۳/۵۳ | ۱٤/٤۷ | ۱/۷۱ | ۱/۳۰ | ۱ |
| | ۱۲-۱۵ | ۲/٤۱ | ۹/۸۸ | ۱/۲۹ | ۰/۸۹ | ۰ |
| | ۱۵-۲۰ | ۳/۲۹ | ۱۳/٤۹ | ۱ | ۱/۲۱ | ۱ |
| | ۲۰-۳۰ | ٤/۵٤ | ۱۸/٦٤ | ۰/۸۱ | ۱/٦۸ | ۱ |
| | ۳۰-٦۵ | ۳/٦۲ | ۱٤/۸٤ | ۰/٤٤ | ۱/۳٤ | ۱ |
| | ٦۵< | ۰/۱۱ | ۰/٤٤ | ۰/۲٤ | ۰/۰٤ | ۰ |
| فاصله از رودخانه (متر) | ۱٤۲/۲> | ۱۷/۰٦ | ٦۹/۹۷ | ۳/۵۵ | ۳/۵۰ | ۲ |
| | ۱٤۲/۲-۳۲۰/۲ | ۳/٦۸ | ۱۵/۰۸ | ۰/۷۱ | ۰/۷۵ | ۰ |
| | ۳۲۰/۲-۵۲٤/۷ | ۲/۲٤ | ۹/۱۸ | ۰/٤۷ | ۰/٤٦ | ۰ |
| | ۵۲٤/۷-۸۰۹/۲ | ۱/۰۸ | ٤/٤۳ | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ | ۰ |
| | ۸۰۹/۲< | ۰/۳۳ | ۱/۳۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ | ۰ |

**ادامه جدول ۳**

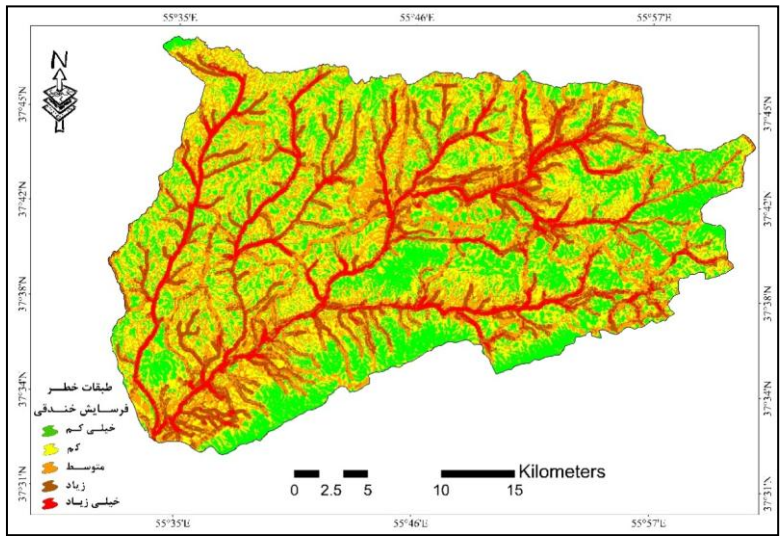
| عامل | طبقه | پهنه‌های خندقی | | نسبت فراوانی | GNRF | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | مساحت | درصد | | نرخ | امتیاز |
| کاربری اراضی | برونزد سنگی | ۰/۲۱ | ۰/۸۷ | ۰/۸۶ | ۰/۰۵ | ۰ |
| | جنگل طبیعی | ۰/۷۵ | ۳/۰۷ | ۰/۲۱ | ۰/۱۸ | ۰ |
| | جنگل کاری | ۰/۰۶ | ۰/۲۴ | ۰/۲۳ | ۰/۰۱ | ۰ |
| | زراعت | ۵/۸۳ | ۲۳/۹۳ | ۰/۵۳ | ۱/۴۴ | ۱ |
| | مرتع | ۱۷/۴۳ | ۷۱/۵۱ | ۱/۹۳ | ۴/۲۹ | ۲ |
| | مناطق مسکونی | ۰/۱۰ | ۰/۴۰ | ۰/۶۳ | ۰/۰۲ | ۰ |
| انحنای سطح | صاف | ۰/۷۴ | ۳/۰۲ | ۰/۷۰ | ۰/۰۹ | ۰ |
| | مقعر | ۱۸/۱۳ | ۷۴/۳۶ | ۱/۶۳ | ۲/۲۳ | ۲ |
| | محدب | ۵/۵۲ | ۲۲/۶۴ | ۰/۴۵ | ۰/۶۸ | ۰ |
| جهت شیب | صاف | ۰/۰۳ | ۰/۱۴ | ۰/۸۰ | ۰/۰۱ | ۰ |
| | شمال | ۳/۰۳ | ۱۲/۴۲ | ۱/۰۴ | ۱/۱۲ | ۱ |
| | شمال شرقی | ۲/۶۷ | ۱۰/۹۴ | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰ |
| | شرق | ۲/۷۹ | ۱۱/۴۶ | ۰/۷۹ | ۱/۰۳ | ۱ |
| | جنوب شرقی | ۳/۸۰ | ۱۵/۵۷ | ۱/۲۴ | ۱/۴۰ | ۱ |
| | جنوب | ۲/۷۵ | ۱۱/۲۷ | ۰/۹۷ | ۱/۰۱ | ۱ |
| | جنوب غربی | ۲/۱۵ | ۸/۸۴ | ۰/۷۹ | ۰/۸۰ | ۰ |
| | غرب | ۳/۳۰ | ۱۳/۵۵ | ۰/۹۷ | ۱/۲۲ | ۱ |
| | شمال غربی | ۳/۸۶ | ۱۵/۸۳ | ۱/۲۴ | ۱/۴۲ | ۱ |
| فاصله از جاده (متر) | <۱۵۱/۱ | ۱۳/۵۳ | ۵۵/۴۹ | ۲/۸۷ | ۲/۷۷ | ۲ |
| | ۱۵۱/۱-۳۷۰/۸ | ۴/۳۱ | ۱۷/۶۸ | ۰/۸۶ | ۰/۸۸ | ۰ |
| | ۳۷۰/۸-۶۵۹/۲ | ۲/۲۰ | ۹/۰۳ | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۰ |
| | ۶۵۹/۲-۱۰۹۸/۶ | ۲/۸۰ | ۱۱/۴۷ | ۰/۵۷ | ۰/۵۷ | ۰ |
| | >۱۰۹۸/۶ | ۱/۵۵ | ۶/۳۴ | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰ |

نشان داد که بیش‌ترین فراوانی مساحتی خندق‌ها در طبقات زیر ۲۰ درصد است. براساس بررسی نشان داده است که جهت شیب نقش مستقیم روی رواناب و فرسایش ندارد. نقش اصلی آن در میزان رواناب و ایجاد فرسایش، به‌سبب تفاوت در میکروکلیمای موجود در

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

طبقات مختلف شیب است [٤٤]. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از انحنای سطح در ارتباط با وقوع فرسایش خندقی حاکی از این است که بیش‌تر خندق‌ها (۷٤/۳٦ درصد) در دامنه‌های مقعر اتفاق افتاده‌اند. هم‌چنین این طبقه بیش‌ترین مقادیر نسبت فراوانی و GNRF (۲/۲۳ و ۲) رو به‌خود اختصاص داده است. موفولوژی مقعر با تمرکز جریان آب و رطوبت می‌تواند مناطق مستعدی برای ایجاد فرسایش خندقی باشد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های [۸] و [۱۲] در تأثیر موفولوژی مقعر در ایجاد فرسایش خندقی مطابقت دارد.

در ادامه از روی هم‌گذاری نقشه فاکتورهای مؤثر، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزه آبخیز قرناوه با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF تهیه شد. این نقشه‌ها براساس شکستگی‌های طبیعی در پنج کلاس خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ٤ و ٥).

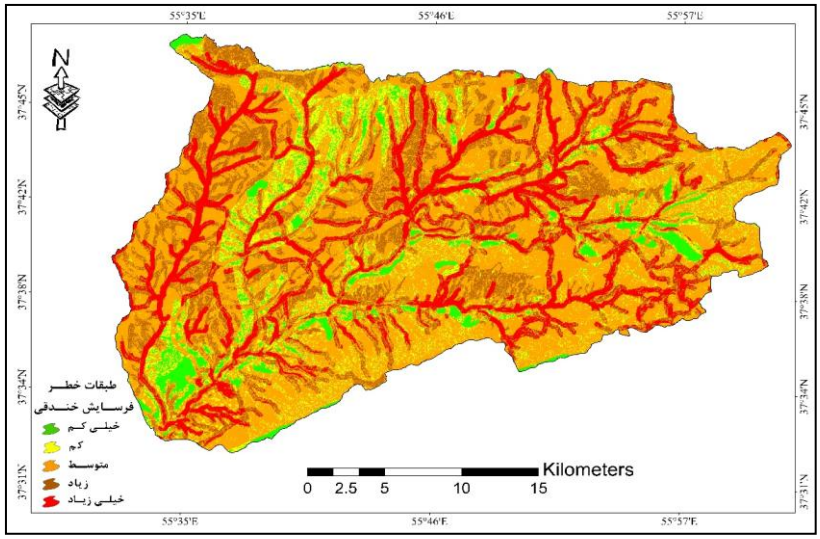



**شکل٤. نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه با استفاده از مدل نسبت فراوانی**

نتایج نشان داد که در مدل نسبت فراوانی از کل پهنه‌های خندقی مرحلهٔ اعتبارسنجی ۰/۸۵ درصد در طبقه خطر خیلی‌کم، ۷/٤٤ درصد در طبقهٔ خطر کم، ۱۳/۸ درصد در طبقه خطر متوسط،۲۸/۲۲ در طبقهٔ خطر زیاد و٤۹/۸۸ درصد منطقهٔ بررسی شده در طبقه خیلی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

زیاد قرار دارند. اما در مدل GNRF ۰/۵۸ درصد در طبقه خطر خیلی‌کم، ۱/٦ درصد در طبقه خطر کم، ۲۳/٤۸ درصد در طبقه خطر متوسط، ۱۵/٦٤ در طبقه خطر زیاد و ۵۸/۸۸ درصد منطقه بررسی شده در طبقه خیلی زیاد قرار دارند (جدول٤).




**شکل۵. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزه آبخیز قرناوه با استفاده از مدل GNRF**

**جدول٤. مساحت و درصد طبقات خطر فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه با استفاده از مدل نسبت فراوانی و GNRF**

| مدل / طبقه‌بندی خطر | نسبت فراوانی | | | GNRF | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | کل مساحت(هکتار) | مساحت (درصد) | خندق (درصد) | کل مساحت (هکتار) | مساحت (درصد) | خندق (درصد) |
| خیلی کم | ۱۷۵۸۹/۱۰ | ۲۲/٤٦۳ | ۰/۸۵ | ٤۱۹۲/٤۱ | ۵/۳۵٤ | ۰/۵۸ |
| کم | ۲۳۵٤۸/۳۰ | ۳۰/۰۷٤ | ۷/٤٤ | ۷٦۵۲/۸٦ | ۹/۷۷٤ | ۱/٦۰ |
| متوسط | ۱۹۰۳۰/٤۰ | ۲٤/۳۰٤ | ۱۳/۸۰ | ۳۷۸٦۵/٤۳ | ٤۸/۳۵۹ | ۲۳/٤۸ |
| زیاد | ۱۲٤۱٤/۲۰ | ۱۵/۸۵٤ | ۲۸/۲۲ | ۱۵۲۲۱/۸۸ | ۱۹/٤٤۰ | ۱۵/٦٤ |
| خیلی زیاد | ۵۷۲۰/٤٦ | ۷/۳۰٦ | ٤۹/۸۸ | ۱۳۳٦۸/۸٤ | ۱۷/۰۷٤ | ۵۸/۸۸ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

نقشه‌های پهنه‌بندی خطر با استفاده روش‌های جمع کیفی و ضریب کاپا ارزیابی شد (جدول۵). مقدار جمع کیفی در مدل نسبت فراوانی ۳ درصد محاسبه شد. اما برای مدل GNRF مقدار آن ۱/۲۷ درصد به‌دست آمده است.

نتایج حاصل از ماتریس خطای مشاهده‌ای و پیش‌بینی هر کدام از دو مدل GNRF و نسبت فراوانی در جدول ٦ و ۷ نشان داده شده است.

**جدول۵. اعتبارسنجی مدل‌های پهنه‌بندی خطر با استفاده از روش‌های جمع کیفی و دقت مدل**

| نوع مدل | طبقات خطر | درصد مساحت | مساحت خندق‌ها(هکتار) | درصد مساحت | نسبت تراکمی | جمع کیفی |
|---|---|---|---|---|---|---|
| نسبت فراوانی | خیلی کم | ۲۲/٤٦۳ | ۰/۰۷ | ۰/۸۵ | ۰/۰٤ | ۳ |
| | کم | ۳۰/۰۷٤ | ۰/٦۲ | ۷/٤٤ | ۰/۲۵ | |
| | متوسط | ۲٤/۳۰٤ | ۱/۱۵ | ۱۳/۸۰ | ۰/۵۷ | |
| | زیاد | ۱۵/۸۵٤ | ۲/۳٦ | ۲۸/۲۲ | ۱/۷۸ | |
| | خیلی زیاد | ۷/۳۰٦ | ٤/۱۷ | ٤۹/۸۸ | ٦/۸۳ | |
| GNRF | خیلی کم | ۵/۳۵٤ | ۰/۰۵ | ۰/۵۸ | ۰/۱۱ | ۱/۲۷ |
| | کم | ۹/۷۷٤ | ۰/۱۳ | ۱/٦۰ | ۰/۱٦ | |
| | متوسط | ٤۸/۳۵۹ | ۱/۹٦ | ۲۳/٤۸ | ۰/٤۹ | |
| | زیاد | ۱۹/٤٤۰ | ۱/۳۱ | ۱۵/٦٤ | ۰/۸۰ | |
| | خیلی زیاد | ۱۷/۰۷٤ | ٤/۹۲ | ۵۸/۸۸ | ۳/٤۵ | |

**جدول ٦.ماتریس مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل نسبت فراوانی**

| مشاهده‌ای / پیش‌بینی | تعداد نقاط خندقی | تعداد نقاط فاقدخندق |
|---|---|---|
| تعداد نقاط خندقی | ۲٤۲ | ۲۳ |
| تعداد نقاط فاقد خندق | ۳ | ۲۲۲ |
| ضریب کاپا | ۰/۸۹ | |
| صحت کلی (درصد) | ۹٤/۷ | |

براساس نتایج جدول ٦ صحت کلی مدل نسبت فراوانی ۹٤/۷ درصد و ضریب کاپای آن ۰/۸۹ محاسبه شده است. از این رو براساس طبقه‌بندی لندیس و کوچ ضریب کاپا در طبقه عالی قرار می‌گیرد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

**جدول ۷.ماتریس مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل GNRF**

| مشاهده‌ای / پیش‌بینی | تعداد نقاط خندقی | تعداد نقاط فاقدخندق |
|---|---|---|
| تعداد نقاط خندقی | ۲۳۳ | ۵۲ |
| تعداد نقاط فاقد خندق | ۱۲ | ۱۹۳ |
| ضریب کاپا | ۰/۷٤ | |
| صحت کلی (درصد) | ۸٦/۹ | |

براساس جدول ۷ صحت کلی مدل GNRF ۸٦/۹ درصد و ضریب کاپای آن مقدار ۰/۷٤ را محاسبه شده است. بنابراین براساس طبقه‌بندی کاپا، دارای تطابق قابل توجه است.

نتایج مربوط به اعتبارسنجی دو مدل نسبت فراوانی و GNRF با استفاده از روش جمع کیفی و مقایسه درصد فراوانی خندق‌ها در کلاسه‌های خطر زیاد (زیاد و خیلی زیاد) نشان داد که مدل نسبت فراوانی نسبت به مدل GNRF در تفکیک کلاسه‌های خطر نتایج بهتری به‌دست می‌دهد. هم‌چنین مدل نسبت فراوانی با مقدار صحت کلی ۹٤/۷ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۹ نسبت به مدل GNRF با مقدار صحت کلی ۸٦/۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۷٤ از دقت بیش‌تری به‌منظور شناسایی مناطق حساس به خطر فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه برخوردار است. از این رو می‌توان مدل نسبت فراوانی به‌عنوان روشی مناسب برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قرناوه پیشنهاد داد. پیشنهاد می‌شود پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوضه با مدل‌هایی مانند شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصادفی و شانون آنتروپی انجام و نتایج آن با مدل‌های به‌کار رفته در این تحقیق به‌منظور دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر مقایسه شود.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مناطق حساس به فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه شناسایی و پهنه‌بندی شد. برای این منظور از دو مدل آماری نسبت فراوانی و GNRF (برای اولین بار) و ۷ عامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی استفاده شد. پهنه‌های خندقی منطقه بررسی شده

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

با استفاده از برداشت‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای ثبت و در محیط ArcGIS رقومی شد. با ترکیب نقشه پراکنش خندق‌های حوزهٔ آبخیز قرناوه و فاکتورهای مؤثر بر رخداد خندق، تراکم خندق تعیین شد. سپس با استفاده از روابط مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF نرخ فاکتورهای مؤثر بر فرسایش خندقی تعیین و این فاکتورها نقشه‌بندی شدند. از جمع جبری نقشه‌های فاکتورها، نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوزهٔ آبخیز قرناوه با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF به‌دست آمد. نتایج اولیه مقایسه درصد فراوانی خندق‌ها در کلاسه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد نشان داد که در مدل‌های نسبت فراوانی و GNRF از کل پهنه‌های خندقی مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب ۷۸/۱۱ و ۷٤/۵۲ درصد پهنه‌ها در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. هم‌چنین اعتبارسنجی دقیق‌تر دو مدل با استفاده از دو روش جمع کیفی و ضریب کاپا نشان داد که مدل نسبت فراوانی با مقدار جمع کیفی، ضریب کاپای و صحت کلی بالاتر نسبت به مدل GNRF، کارایی بهتری در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی و پهنه‌بندی آن در حوزهٔ آبخیز قرناوه دارد.

## قدردانی

از معاونت آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و بخش آبخیزداری اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان کلاله برای مساعدت‌های فراوان تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

۱. احمدی ح.، " ژئومورفولوژی کاربردی"، جلد ۱ فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۵) ٦٨٨ .

۲. دماوندی م. ز.، "بررسی عارضه‌های مورفولوژیکی نهشته‌های لسی در بخش غربی شهر گرگان"، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (۱۳۸۵) ٤٥.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

3. Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin, C., "Gully eosion and environmental change: importance and research needs", Catena. Vol.50 (2003) 91-133.

٤. تجری ع.، "تأثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در فرسایش خندقی و مورفولوژی خندق‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کال‌شور کلاله استان گلستان)"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. (۱۳۹۱) ۱۲۲.

۵. راهی غ. ر.، نظری‌سامانی ع. ا.، احمدی ح.، سلاجقه ع. "تأثیر ویژگی‌های خاک در نوع سازوکار ایجاد خندق و مورفولوژی آن در منطقه گناوه"، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، دورهٔ ٦۲، شمارهٔ ٤ (۱۳۸۸) ٤۷۲-٤۵۹.

6. Gómez Gutiérrez A., Schnabel S., Lavado, C., "Use of two nonparametric methods (CART and MARS) to model the potential distribution of gullies in Spanish rangelands", International Congress on Environmental Modeling and Software. (2008) 1398-1405.

۷. جعفری گرزین ب، کاویان ع.، "ارزیابی وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سرخ‌آباد مازندران با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی"، مجلهٔ علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شمارهٔ ۱۷ (۱۳۸۸) ۵۸-۵۵.

۸. شادفر ص.، "بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شهرستان رودبار استان گیلان"، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شمارهٔ ۳ (۱۳۹۰) ١٦-۳۰.

۹. ملکی ا.، احمدی م.، میلادی ب.، "شبیه‌سازی مناطق مستعد خندق‌زایی با استفاده از روش SPI در رودخانه مرگ"، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دورهٔ ۱، شمارهٔ ۳ (۱۳۹۱) ۲۳-۳۸.

۱۰. اسفندیاری درآباد ف.، بهشتی جاوید ا.، فتحی م. ح.، "بررسی قابلیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل منطق فازی مطالعهٔ موردی، حوضهٔ سد گلستان- رودخانه قرناوه"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی مخاطرات محیطی، دانشگاه خوارزمی (۱۳۹۲).

۱۱. شادفر ص.، "کاربرد منطق فازی در بررسی فرسایش خندقی با استفاده ازسیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه طرود)، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی"، شماره ۹۲ (۱۳۹۳) ۳۵-٤۲.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

۱۲. طهماسبی‌پور ن.، رحمتی الف.، قربانی‌نژاد، س.، "پیش‌بینی حساسیت به فرسایش خندقی منطقه سیمره براساس مدل عامل قطعیت و تعیین اهمیت عوامل مؤثر بر آن"، مجلهٔ اکوهیدرولوژی، دورهٔ ۳، شمارهٔ ۱ (۱۳۹۵) ۸۳-۹۳.

۱۳. شهریور ع.، شادفر ص.، خزایی م.، عادلی ب.،"ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبخیز آبگندی)"، مجلهٔ اکوهیدرولوژی، دورهٔ ٤، شمارهٔ ۱ (۱۳۹٦) ۱۱۹-۱۳۲.

14. Rahmati O., Haghizadeh A., Pourghasemi H. A., Noormohamadi F., "Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison", Natural Hazards, Vol.82 (2016) 1231-1258 .

15. Lesschen J. P., Kok K., Verburg P. H., Cammeraa L. H., "Identification of Vulnerable Areas for Gully Erosion under Different Scenarios of Land Abandonment in Southeast Spain", Catena, Vol.71 (2007) 110-121.

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

17. Ogbonna J. U., "Understanding Gully Erosion Vulnerability in Old ImoState Using Geographic Information System and Geostatistics", American Journal of Geographic Information System, Vol.1 (2012) 66-71.

18. Conoscenti C., Agnesi V., Angileri S., Cappadonia C., Rotigliano E., Marker M., "A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy", Environtal Earth Science, Vol.70 (2013) 1179-1195.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]



19. Conoscenti C., Angileri S., Cappadonia C., Rotigliano E., Agnesi V., Marker M., "Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy)", Geomorphology, 204 (2014) 399-411.

20. Dube F., Nhapi I., Murwira A., Gumindoga W., Goldin J., Mashauri D.A., "Potential of weight of evidence modeling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe", Physics and Chemistry of the Earth, Vol.67 (2014) 145-152.

21. Dewitte O., Daoudi M., Bosco C. Eeckhaut, M.V.D., "Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions", Geomorphology, Vol.228 (2015)101-115.

۲۲. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان.، "مطالعات طراحی سازه‌های کنترل سیل و رسوب حوزه آبخیز قرناوه"، شرکت مشاور کاوش پی مشهد، (۱۳۹۰) ۲-۱۰.

23. Andrew O., Ian P. Prosser., "Gully erosion prediction across a large region: Murray–Darling Basin, Australia"، Soil Research, Vol.4 (2012) 267-277.

24. Ozdemir A., Altural T., "A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey", Journal of Asian Earth Sciences, Vol.64 (2013)180-197.

25. Ozdemir A., "GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison", Journal of Hydrology, Vol.411(2011) 290-308.

26. Lee S., "Application and verification of fuzzy algebraic operators' landslide susceptibility mapping", Environmental Geology, Vol.52 (2007) 615-623.

27. Pradhan B., Lee S., "Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling", Environmental Modelling & Software. Vol.25 (2010) 747-759.

۲۸. صابرچناری ک.، سلمانی ح.، محمدی م.، "ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و LNRF"، نشریهٔ اکوهیدرولوژی، شمارهٔ ۲ (۱۳۹٤) ۱۰۵-۱۱٦.

۲۹. گرایی پ.، کریمی ح.، "تعیین مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضهٔ آبخیز سد ایلام"، دورهٔ ۲۵، شمارهٔ ۹٦ (۱۳۸۹) ۱۲۸-۱۰۱.

30. Gupta R. P., Joshi B. C., "Landslide hazard zonation using the GIS approach- a case study from the Ramganga Catchment, Himalayas", Engineering Geology. Vol.28 (1990) 119-131.

۳۱. طولابی س؛ عابدینی م.، علی‌بخشی الف.، "مقایسه و ارزیابی مدل‌های LNRF و AHP در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز نوژیان"و فصلنامهٔ بین‌المللی پژوهشی تحلیلی زمین پویا. دورهٔ ۲، شمارهٔ ۲ (۱۳۹۳) ٤۱-۳۱.

۳۲. شیرانی ک.، سیف ع.، "پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری (منطقهٔ پیشکوه، شهرستان فریدون شهر)"، مجلهٔ علوم زمین. دورهٔ ۲۲، شمارهٔ ۸ (۱۳۹۰) ۱۵۸-۱٤۹.

33. Gee M.D., "Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability", Landslides, Bell (ed.), Balkema, Rotterdam (1991) 947-952.

34. Baeza C., Lantada N., Moya J., "Validation and evaluation of two multivariate statistical models for predictive shallow landslide

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

susceptibility mapping of the Eastern Pyrenees (Spain)", Environtal Earth Science. Vol. 61 (2010) 507-523.

35. Landis J. R., Koch G. G., "The measurement of observer agreement for categorical data", Biometrics, Vol. 33 (1977) 159-174.

36. Mandal S., Maiti R., "Semi-quantitative Approaches for Landslide Assessment and Prediction, Chapter 7, Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Frequency Ratio (FR) Model in Assessing Landslide Susceptibility and Risk", Natural Hazards (2014) 191-226.

۳۷. انتظاری م.، ملکی الف.، مرادی خ.، الفتی س.، "پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضهٔ آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی"، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، شمارهٔ ۱۷، (۱۳۹۲) ۶۳-۸۶.

۳۸. یمانی م.، زمان‌زاده س. م.، احمدی م.، "تحلیل عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه دشت کهور در استان فارس)"، مجلهٔ کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، شمارهٔ ۱، (۱۳۹۲) ۵۳-۸۴.

39. Conforti M., Aucell C., Robustelli G., Scarciglia F., "Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy)", Natural Hazards, Vol. 58 (2011) 881-898.

40. Dai F. C., Lee C. F., Xu Z. W., "Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantua sland, Hong Kong", Environment Geology, Vol. 40 (2001) 381-391.

41. Umar Z., Pradhan B., Ahmad A., Jebur M. N., Tehrany M. S., "Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia", Catena.Vol. 118 (2014) 124-135.

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]

42. Tehrany M. S, Pradhan B, Jebur M. N., "Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weightsof-evidence and support vector machine models in GIS", Journal of Hydrology. Vol. 512 (2014) 332-343.

٤٣. مخدوم فرخنده م.، "شالوده آمایش سرزمین"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۹) ۲۸۹.

٤٤. قهرودی م.، "مدل پهنه‌بندی خطر ناشی از گسترش فرسایش آبکندی در حوزه آبکند کلوچه بیجار با استفاده از GIS و RS"، طرح تحقیقاتی وزارت نیرو (۱۳۸۲) ۵۲-۵۳.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.1.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.69 ]