مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۹، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱/ ص ۱۰۷-۸۹
DOI: 10.22059/jhsci.2022.348010.742

# پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی و مخاطرات آن در حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کنندهٔ مکانی

هیمن شهابی*
دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان
زانیار امیری
کارشناسی ارشد رشته مخاطرات محیطی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان
عطاالله شیرزادی
استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۰ – تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۵)

## چکیده

هدف این پژوهش، پیش‌بینی مکانی حساسیت فرسایش خندقی در حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار در استان کردستان است. به این منظور، ابتدا ۹۵۰ رأس خندق (هدکت) با نسبت ۷۰ به ۳۰ تفکیک و شناسایی شد. سپس بیست عامل مؤثر بر توسعهٔ فرسایش خندقی در منطقه شامل درجهٔ شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارندگی، فاصله از جاده، تراکم جاده، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، گروه هیدرولوژیکی خاک، ژئومورفولوژی و نفوذپذیری نسبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه و رقومی شدند. در این تحقیق از دو مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی استفاده شد. برای تعیین صحت نقشه‌های نهایی از درصد مساحت زیر منحنی (AUC) بهره گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد که فاکتورهای فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه و درجهٔ شیب به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در فرسایش خندقی داشتند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها براساس داده‌های صحت‌سنجی نیز نشان داد که مدل رگرسیون لجستیک (AUC=0.876) نسبت به مدل منطق فازی (AUC=0.815) در شناسایی مناطق مستعد به ایجاد فرسایش خندقی دارای قدرت پیش‌بینی بیشتری بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** حساسیت، حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار، رگرسیون لجستیک، عملکرد مدل، فرسایش خندقی، منطق فازی.

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۶۶۵۸۷۳۹
Email: h.shahabi@uok.ac.ir

**مقدمه**

فرسایش خاک توسط آب از مهم‌ترین فرایندهای تخریب سرزمین به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک به شمار می‌آید. از میان انواع مختلف فرسایش آبی، فرسایش خندقی از مهم‌ترین رخدادهای مؤثر در نابودی خاک، تغییر منظر زمین و منابع آب و پسرفت اراضی است [۱]. فرسایش خندقی مشهودترین شکل فرسایش خاک است که سبب کاهش توان تولید خاک و ایجاد محدودیت در کاربری اراضی می شود و خطری جدی برای راه‌ها، حصارها و سازه‌های مختلف است و همچنین سبب تلفات چشمگیر خاک و تولید مقادیر فراوان رسوب می‌شود [۱]. این فرسایش را فرسایش خندقی یا آبکند نیز می‌گویند. خندق آبراهه‌ای است به‌نسبت دائمی که جریان‌های موقت آب در هنگام بارندگی از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیاد رسوب در خود حمل می‌کند [۱۰]. شکل‌گیری خندق‌ها همواره با فرسایش و تغییر شکل ظاهری زمین همراه است و سبب تولید مقدار زیادی رسوب، تخریب اراضی، جاده‌ها، شبکه‌های آبیاری و پر شدن سدها می‌شود [۸]. خندق‌ها که در بیشتر موارد از شاخصه‌های مهم تغییرات محیطی در نظر گرفته می‌شوند، به لحاظ رشد سریع از اشکال عادی فرسایش به شمار نمی‌آیند [۷].

خندق‌ها آبگذرهای موقت اما با طول و عمق زیادند که پس از زایش و توسعه به تأسیسات انسانی خسارت وارد می‌آورند و با توسعه از سر و هجوم به محدوده‌های کشت‌شده، فعالیت کشت عادی را مختل می‌کنند. برپایهٔ گزارش‌های محققان، یک خندق مجزا ممکن است حتی تا ۹۳۷۵۰ تن در کیلومتر در سال رسوب تولید کند [۲۳]. این اشکال به هر علتی که پدید آیند می‌توانند بعد از شکل‌گیری در یک یا چند جهت رشد کنند و موجب گسیختگی مواد دامنه‌ای شوند. در ایجاد این شکل‌ها عوامل طبیعی و انسانی دخیل‌اند. این عوامل سرعت جابه‌جایی آنها را تشدید می‌کنند. کشت خطی، چرای مفرط، کشیدن جاده از کمرکش کوهستان‌ها، فشرده شدن خاک در اثر عبور وسایل نقلیهٔ کشاورزی و عبور مداوم دام از مسیری ویژه از عوامل انسانی محسوب می‌شوند [۶].

خندق‌های فعال اغلب روی مواد غیرمستحکم توسعه می‌یابند [۷]. بعضی محققان وجود آهن را شاخص مهمی در ممیزی محل تشکیل و توسعهٔ خندق‌ها در نظر می‌گیرند [۲۵]. تشکیل گودال‌ها در سه مرحلهٔ فرسایش آبشاری- کانالی، فرسایش ناشی از یخ بستن و ذوب متناوب صورت می‌گیرد و به‌طور معمول بیش از یک عامل دخیل است [۲۵]. سازوکار تشکیل به این صورت است که در نقاطی که آب بتواند در زمین نفوذ کند و به‌عبارتی فرصت نفوذ داشته باشد به‌تدریج در نتیجهٔ انحلال، حفرهٔ کوچکی ایجاد می‌شود که به‌تدریج به‌شکل جریان زیرزمینی و در جهت شیب گسترش می‌یابد. این

پدیده آن‌قدر ادامه می‌یابد که سقف کانال تخریب شود و ریزش کند. در این هنگام، راهرو زیرزمینی به شکل کانال روبازی نمایان می‌شود که خندق نام دارد [۴]. در اصطلاح مهندسی علت تشکیل خندق شکست حالت تعادل کم‌ثبات در نهرها و جوی‌هاست [۱۸]. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که سنگ‌شناسی اثر مهمی در فعالیت هدکت خندق دارد [۲۶].

فرسایش خندقی به‌منزلهٔ مخاطره‌ای طبیعی در ایران از این جهت حائز اهمیت است که در حدود ۹۰ درصد کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است و بارندگی در این مناطق از پراکنش زمانی مناسبی برخوردار نیست. در چنین شرایطی نبود یا کمبود پوشش گیاهی همراه با افزایش رواناب موجب از بین رفتن مقادیر بسیار زیادی خاک در سال می‌شود و خسارات فراوانی را از طریق هدررفت خاک و انباشت رسوبات در مخزن سدهای ذخیره‌ای، کانال‌های آب‌رسانی، بستر رودخانه و سطح اراضی کشاورزی به کشور وارد می‌آورد [۱]. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای ارزیابی و تهیهٔ نقشهٔ فرسایش وجود دارند که اطلاعات موجود در حوضهٔ آن را تعیین می‌کنند. همچنین عوامل متنوعی در گسترش فرسایش خندقی مؤثرند که تأثیر این عوامل از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. مهار فرسایش آبی یا مبارزه با آن، مستلزم شناخت مناطق بحرانی و سهم مشارکت هر یک از انواع فرسایش آبی در تخریب اراضی و تولید رسوب است. از این‌رو بررسی این موضوع از موارد مهمی است که پژوهش‌های علمی گسترده‌ای را در کشور طلب می‌کند. بنابراین شناسایی عوامل مؤثر در گسترش فرسایش خندقی و پهنه‌بندی آن از ابزارهای اساسی و مهم برای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینهٔ مؤثر در مقابله با آن است.

در پژوهش‌های داخلی و خارجی از روش‌های مختلفی برای ارزیابی پتانسیل فرسایش خندقی استفاده شده است مانند انواع مدل‌های رگرسیون [۳،۹،۱۴،۱۶،۱۹،۲۰]، مدل دانش‌مبنای تحلیل سلسله‌مراتبی [۲،۵،۱۹،۲۴]، منطق فازی [۱۱، ۱۲]، مدل دمپستر- شفر [۱۲]، شبکهٔ عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان [۲۷].

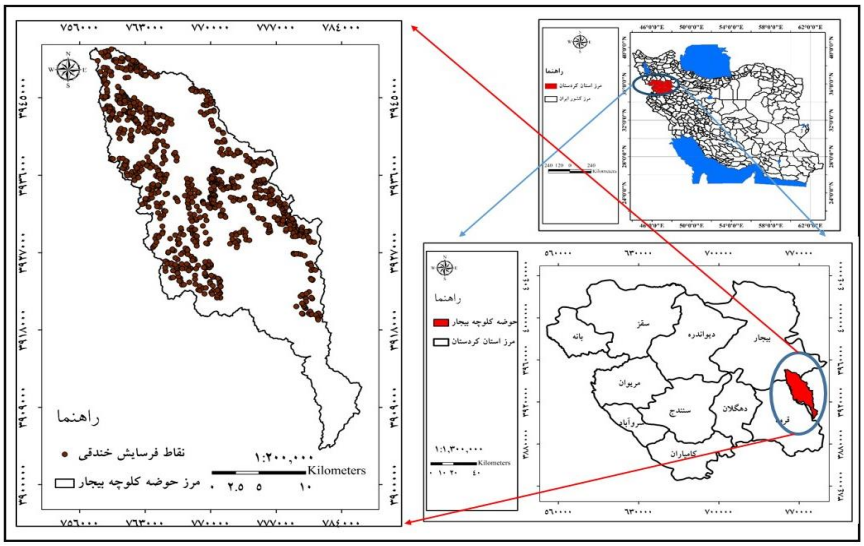
حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار به‌شدت تحت تأثیر فرسایش خندقی قرار دارد. نوسان زیاد بارش در دوره‌های مختلف، بارش‌های شدید رگباری در بعضی از فصول سال، ضعف یا نبود پوشش گیاهی سطح زمین و شیب زیاد در بعضی نقاط سبب ایجاد و توسعهٔ خندق‌های زیادی شده است. این وضعیت موجب تخریب زمین‌های کشاورزی می‌شود، راه‌های ارتباطی و سیستم آبیاری منطقه را از بین می‌برد، سالانه مقادیر زیادی از خاک این منطقه را فرسایش می‌دهد و از دسترس خارج می‌کند و از بازده کشاورزی منطقه می‌کاهد. با وجود گسترش زیاد خندق‌ها و حساسیت منطقه به چنین فرسایشی و همچنین تغییراتی که در بخش‌های مختلف منطقه

پدید آمده، تا کنون هیچ تحقیقی برای پیش‌بینی مکانی حساسیت فرسایش خندقی و عوامل تشکیل و توسعهٔ خندق‌ها صورت نگرفته است. از این‌رو پیش‌بینی مکانی حساسیت فرسایش خندقی حوضهٔ تحت بررسی با استفاده از مدل‌های لجستیک رگرسیون و منطق فازی بررسی شد و در نهایت پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در منطقهٔ پژوهش با استفاده از این دو مدل صورت گرفت و اعتبار هر دو مدل به‌کاررفته نیز صحت‌سنجی شد.

## منطقهٔ پژوهش

حوضهٔ کلوچه بیجار با مساحت ۴۹۷۵۶ هکتار در فاصلهٔ حدود ۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان بیجار در مختصات '۱۰ °۴۸ تا '۵۰ °۴۷ طول شرقی و '۴۰ °۳۵ تا '۱۵ °۳۵ عرض شمالی در محدودهٔ مرز استان‌های همدان و کردستان قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت حوضهٔ کلوچه بیجار در ایران و استان کردستان نشان داده شده است. با پیمایش میدانی در منطقه، تصاویری از خندق‌های ایجادشده در حوضه تهیه شد و نمونه‌های این تصاویر در شکل ۲ ارائه شده است. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۳۶۲ متر و حداقل ارتفاع در خروجی حوضه ۱۶۳۰ متر از سطح دریاست. شیب حداقل، حداکثر و متوسط حوضه به‌ترتیب صفر، ۲۳۶ و ۱۱ درصد (شیب برحسب درصد محاسبه شد) محاسبه شده است. از نظر هیدرولوژیکی حوضهٔ مطالعاتی کلوچه یکی از سرشاخه‌های رودخانهٔ سفیدرود از زیرحوضه‌های حوضه خزر است. مراکز جمعیتی حوضه شامل روستاهای سیف‌آباد، کلوچه، خانباغی، دارقشلاق، محمودآباد، قوری‌چای، علی‌آباد، کهریز باباحسینی، ایلانلو، جنگلو، سرایچوق، قطازقویی، قهوردعلیا، قهورد سفلی و دل یچو است [۲۸].

واحدهای لیتولوژی حوضه متشکل از واحدهای سنگی Js (شیت، ماسه سنگ و کوارتزیت)، JL (لایه‌های سنگی آهکی درون لایه‌ای)، Plt (تراکیت، تراکی آندزیت، داسیت) و Plb (بازالت، بازانیت) است که توسط نهشته‌های Mm (مارن‌های سبز روشن و قرمز)، Pcg (نهشته‌های کنگلومرایی سست)، Pl,m (سنگ آهک رسی، مارن، ماسه‌سنگ آهکی)، Qt1 (رسوبات آبرفتی مرتفع) و Qal (رسوبات بستر رودخانه) پوشیده شده‌اند. واحدهای سنگی حدود ۴/۹۳ درصد و واحدهای رسوبی ۹۵/۰۷ درصد حوضه را در بر می‌گیرند. واحدهای رسوبی و سنگی حوضه در قالب واحدهای با فرسایش‌پذیری کم شامل واحدهای سنگی JL، Plt، Js؛ متوسط شامل واحدهای سنگی Qt1، Qc، Pcg، Mm، Plb؛ زیاد شامل واحدهای رسوبی Qtr و Qt2 و بسیار زیاد شامل واحدهای رسوبی Pl,m و Qal قرار گرفته‌اند که به‌ترتیب ۴/۰۶، ۴۳/۸۲، ۲۰/۴۹ و ۳۱/۶ درصد حوضه را می‌پوشانند. انواعی از اشکال فرسایشی شامل بارانی، شیاری، سطحی و خندقی آبراهه‌ای روی واحدهای یادشده گسترش یافته‌اند که از شدت کمی در حوضه برخوردارند.




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضهٔ کلوچه بیجار در ایران و استان کردستان**

**شکل ۲. نمونه‌هایی از فرسایش خندقی حوضهٔ کلوچه بیجار**

## مواد و روش تحقیق

### نقشهٔ پراکنش فرسایش خندقی منطقهٔ پژوهش

در این پژوهش، ۹۵۰ نقطه در رأس خندق‌ها (هدکت ها) به‌عنوان نقشهٔ پراکنش فرسایش خندقی با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث و پیمایش صحرایی ثبت شده و سپس به دو بخش داده‌های آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. از داده‌های آموزشی در بخش یادگیری مدل با روش رگرسیون لجستیک و از داده‌های اعتبارسنجی برای تعیین صحت‌سنجی/ قدرت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شد.

### عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی

در این پژوهش بیست عامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی شامل، درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای عرضی شیب ، انحنای طولی شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارندگی، فاصله از جاده، تراکم جاده، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، گروه هیدرولوژیکی خاک، ژئومورفولوژی و نفوذپذیری نسبی استفاده شدند. در پژوهش حاضر، نقشه‌های درجهٔ شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای عرضی و مسطح شیب، TWI، SPI، STI، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵×۱۲/۵ از ماهوارهٔ ALOS PALSAR از سایت Alaska Satellite Facility (https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#) به‌کمک نرم‌افزارهای Arc GIS 10.7 و SAGA 6 و نقشه‌های فاصله از جاده و تراکم جاده از نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ به‌دست آمدند. نقشه‌های لیتولوژی، فاصله از گسل و تراکم گسل از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استخراج شدند. نقشهٔ بارندگی براساس آمار متوسط بارندگی طولانی‌مدت سالیانه در طول دورهٔ آماری بیست‌وپنج‌ساله (۱۳۹۵-۱۳۷۰) به‌کمک روش وزن‌دهی فاصلهٔ معکوس (IDW)[1] به‌دست آمد. در نهایت نقشه‌های کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، ژئومورفولوژی و نفوذپذیری نسبی از ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان تهیه شدند.

### مدل رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک چندگانه نوعی روش چندمتغیره است که چند پارامتر فیزیکی را که ممکن است بر احتمال تأثیر بگذارند، مورد توجه قرار می‌دهد. در این روش مقادیر متغیر مستقل را می‌توان به‌صورت باینری (۰ و ۱) و هم به‌صورت کمیت عددی بیان کرد. فرضیه‌های رگرسیون لجستیک عبارت‌اند از:

1. Inverse distance weighted

- متغیر وابسته (Y) دوحالتی است و فقط مقادیر صفر یـا یـک و بلـه و خیـر و غیـره را اختیـار می‌کند؛
- متغیر وابسته (Y) به K متغیر مستقل وابسته اسـت و رابطـهٔ بـین ایـن دو نـوع متغیـر غیرخطی است و از منحنی لجستیک تبعیت می‌کند؛
- داده‌ها از نمونه‌ای تصادفی با سایز N تولید شده‌اند، خطای هر مشاهده مستقل از خطای دیگر مشاهدات (نبود چندهمبستگی[1]) است. این فرض با انجام رگرسیون خطـی میـان متغیرهای مستقل و بررسی دو فاکتور VIF و TOL در دو ستون آخر جدول ضـرایب از خروجی نرم‌افزار SPSS، صورت می‌گیرد. زمانی کـه مقـدار VIF از ۱۰ بیشـتر و مقـدار TOL از ۰/۱ کمتر شود، آن متغیر به‌دلیل ایجـاد همبسـتگی شـدید از معادلـهٔ نهـایی حذف خواهد شد. زیرا در غیر این‌صورت معادلهٔ نهایی به‌دست‌آمده با وجود این متغیرها به‌دلیل دارا بودن ضرایب متغیر [β] بزرگ و حتی با وجود معنـی‌داری آمـاری بـه‌دلیـل خطای استاندارد زیاد، غیرمنطقی است.
- در رگرسیون لجستیک آنتی‌لگاریتم ضریب بتا [eβ] برابر با نسبت شانس[2] غیرمستقل است.

مدل عمومی رگرسیون لجستیک به‌شکل زیر است:

$$Y = \log it(P) = Ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n \qquad (۱)$$

$P$ احتمال این است که متغیر وابسته ۱ باشـد (در ایـن مطالعـه احتمـال ایجـاد فرسـایش خندقی)؛ $Odds\,ratio = P/1-P$ (شانس یا نسبت شانس ؛ $c_0$ عرض از مبدأ یا ضریب ثابـت؛ و $x_1, x_2, ..., x_n$ ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل $c_1, c_2, ..., c_n$ است.

به‌منظور تفسیر مناسب در رابطهٔ ۱ از ضرایبی بـا لگـاریتم طبیعـی در مبنـای عـدد نپـرین استفاده شد. اگر ضریب مثبت باشد، مقدار لگاریتم تغییریافته بزرگ‌تر از ۱ خواهـد شـد کـه در نتیجه احتمال وقوع حادثه بیشتر می‌شود. اگر ضریب منفی باشد این مقدار از ۱ کمتـر خواهـد شد و احتمال وقوع حادثه کاهش می‌یابد. برای ضریب مثبـت احتمـال ترسـیم‌شـده در مقابـل مقادیر متغیر مستقل به‌صورت منحنی S شکل، نمایان می‌شود. رگرسیون لجسـتیک بـا نسـبت شانس مرتبط است که عبارت است از نسبت احتمال رخ دادن حادثه (ایجاد فرسایش خنـدقی) به احتمال رخ ندادن آن، $P$ احتمال ایجاد فرسایش خندقی است که مقداری بین [۰ و ۱] دارد. با این توصیف Y پارامتر یا فاکتور خطی است و از رابطهٔ ۲ به‌دست می‌آید:

1. Multicollinearity
2. odds ratio

$$Y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + ... + c_n x_n \quad (۲)$$

$b_0$ ضریب ثابت مدل، $X_i \left(i = 1,2,...n\right)$ متغیرهای مستقل، $B_i \left(i = 0,1,2,...n\right)$ ضرایب متغیرهای مستقل و احتمال رخ دادن حادثه یا احتمال ایجاد فرسایش خندقی [P] برابر است با:

$$p = \frac{1}{1+e^{-Y}} \quad (۳)$$

کاهش معنی‌دار لگاریتم درست‌نمایی براساس آزمون مجذور خی (کای اسکور) معیاری باارزش است.

**مدل منطق فازی**

در تئوری کلاسیک مجموعه، یک عنصر یا عضو مجموعه است یا نیست (صفر و ۱). تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را گسترش می‌دهد و عضویت درجه‌بندی‌شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. به بیان دیگر، یک مجموعهٔ فازی، مجموعه‌ای از عناصری با ویژگی‌های مشابه است که در آن، مجموعه درجه‌ای مشخص از صفر تا ۱ دارد. صفر به‌معنای عضویت نداشتن و ۱ به‌معنای عضویت کامل است [۲۱]؛ بنابراین قبل از اجرای مدل فازی باید برای هر یک از لایه‌های اشاره‌شده در فوق توابع عضویت تعیین شود و ارزش لایه‌ها در دامنه‌ای بین صفر و ۱ قرار گیرد و سپس لایه‌ها وارد مدل فازی شوند. برای اجرای تکنیک فازی به عملگر گاما نیاز است. مقدار گامای تعدیل‌کننده بین صفر و ۱ است، گامای صفر معادل ضرب فازی و گامای ۱ معادل جمع فازی است. بر همین اساس وزن‌دهی به هر یک از این پارامترها بنابر تأثیر نسبی آنها در وقوع فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی انجام می‌گیرد و در هر نقشهٔ فاکتور فازی، ارزش هر یک از کلاس‌ها و واحدهای موجود با درجات عضویت فازی حد واسط بین صفر تا ۱ مشخص می‌شود. در نهایت لایه‌های فازی‌شده با استفاده از عملگر فازی گامای ۰/۸ با هم ترکیب می‌شوند. در منابع موجود، گامای ۰/۸ مناسب‌ترین سطح برای پهنه‌بندی فرسایش خندقی معرفی شده است [۱۷، ۱۱].

**بررسی عملکرد مدل‌ها**

عملکرد مدل‌های پیش‌بینی را می‌توان با استفاده از منحنی مشخصهٔ عملکرد سیستم (ROC)[1] و معیار مساحت زیر منحنی (AUC)[2] ارزیابی کرد [۲۲]. منحنی مشخصهٔ عملکرد سیستم که

1. Receiver Operatic Characteristic
2. Area Under the Curve

نخستین بار در جنگ جهانی دوم برای تحلیل سیگنال‌های راداری استفاده شد، نموداری توصیفی است که در آن مقادیر نرخ مثبت واقعی در مقابل مقادیر نرخ مثبت کاذب ترسیم می‌شوند. معیار مساحت زیر منحنی، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداده (فرسایش خندقی) و واقع نشدن رخداد (واقع نشدن فرسایش خندقی) است. مقادیر درصد مساحت زیر منحنی از صفر تا ۱ متغیر است. هرچه این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقیق بودن و برتری مدل پیش‌بینی است [۲۶]. در این پژوهش به‌منظور محاسبهٔ معیار AUC برای نقشهٔ حساسیت به فرسایش خندقی از نرم‌افزار SPSS 16 استفاده شد.

## نتایج و بحث

### مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خندقی

#### رگرسیون لجستیک

جدول ۱ مقادیر TOL و VIF عوامل اثرگذار بر وقوع فرسایش خندقی را نشان می‌دهد. بر این اساس، همهٔ عوامل مؤثر، مقدار TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ و VIF کمتر از ۱۰ دارند که نشان‌دهندهٔ نبود هم‌خطی چندگانه بین آنهاست و همهٔ آنها به‌عنوان ورودی برای مدل‌سازی با رگرسیون لجستیک مناسب شناخته شدند (جدول ۱).

**جدول ۱. شاخص‌های تشخیص هم‌خطی چندگانهٔ متغیرهای مستقل در تحقیق حاضر**

| عامل مؤثر | TOL | VIF | عامل مؤثر | TOL | VIF |
|---|---|---|---|---|---|
| تراکم رودخانه | ۰/۶۲ | ۱/۶ | انحنای طولی شیب | ۰/۷۲ | ۱/۳۸ |
| تراکم جاده | ۰/۵۱ | ۱/۹ | بارش | ۰/۵۶ | ۱/۷۶ |
| شیب | ۰/۴ | ۲/۴ | زمین‌شناسی | ۰/۱۰۶ | ۹/۴ |
| SPI | ۰/۵۲۲ | ۱/۹ | تجمع جریان | ۰/۹۸ | ۱/۰۱ |
| TWI | ۰/۴۲ | ۲/۴ | تراکم گسل | ۰/۸۲ | ۱/۲ |
| ژئومورفولوژی | ۰/۲۳ | ۴/۳ | فاصله از جاده | ۰/۴۶ | ۲/۱۵ |
| گروه هیدرولوژیکی خاک | ۰/۴۹ | ۲/۰۴ | فاصله از رودخانه | ۰/۷۴ | ۱/۳۳ |
| کاربری اراضی | ۰/۳۲ | ۳/۰۵ | فاصله از گسل | ۰/۶۳ | ۱/۵۸ |
| نفوذپذیری | ۰/۱۰۷ | ۹/۳ | ارتفاع | ۰/۵۱ | ۱/۹۳ |
| انحنای عرضی شیب | ۰/۷۴ | ۱/۳۴ | جهت شیب | ۰/۹۱ | ۱/۰۹ |

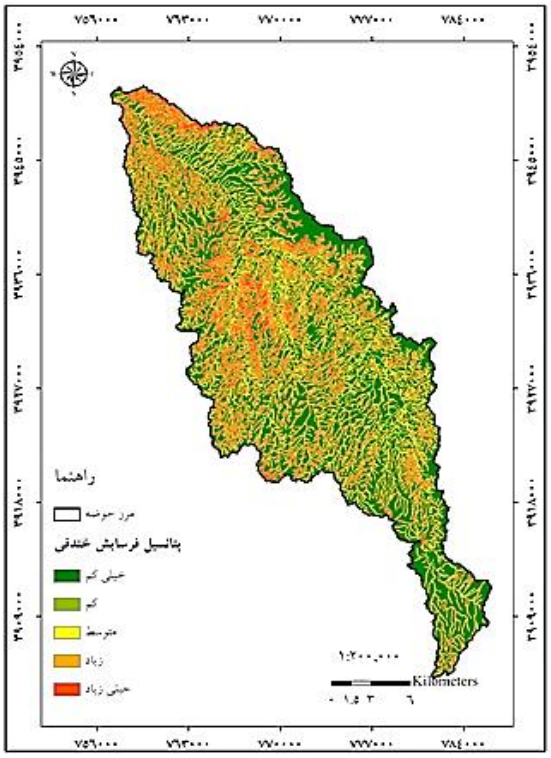
ضرایب مربوط به متغیرهای تأثیرگذار در فرسایش خندقی در جدول ۲ ارائه شده است. از میان بیست عامل مؤثر بررسی‌شده، عوامل درجهٔ شیب و ارتفاع از سطح دریا با ضریب بتا مثبت (همبستگی زیاد) و تراکم رودخانه، بارش و جهت شیب با ضریب منفی (همبستگی ناچیز) بر وقوع فرسایش خندقی در منطقهٔ پژوهش اثرگذاری داشتند. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های انتظاری و همکاران [۵] که براساس آن، شیب و فاصله از رودخانه به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین ارزش بودند مطابقت نشان می‌دهد. اگرچه اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش خندقی در هر منطقه با توجه به تفاوت در فاکتورهای محیطی ممکن است متفاوت باشد. برای مثال، غلامی و همکاران در پژوهشی در شهر مهر در جنوب استان فارس، سنگ‌شناسی، کاربری زمین، فاصله از آبراهه، شیب و فاصله از جاده را عوامل مؤثر در فرسایش خندقی ذکر کردند و اظهار داشتند که سنگ‌شناسی و فاصله از جاده به‌ترتیب بیشترین و کمترین ارزش را از نظر فرسایش خندقی دارند [۱۵].

**جدول ۲. ضرایب رگرسیون لجستیک برای تهیهٔ مدل نقشهٔ پتانسیل فرسایش خندقی**

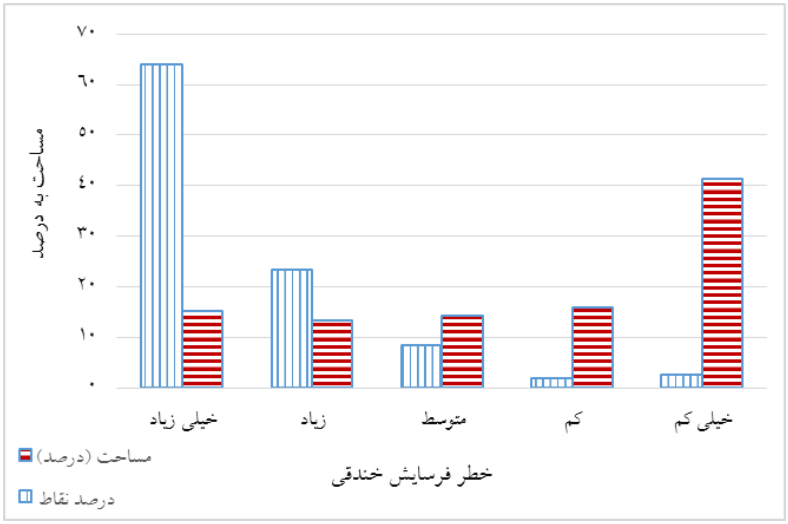
| متغیر | ضریب متغیر (β) | معنی‌داری آماری |
|---|---|---|
| تراکم رودخانه | -۰/۳۲۱ | ۰/۰۰ |
| درجهٔ شیب | ۰/۱۲۵ | ۰/۰۰ |
| بارش | -۰/۰۶۲ | ۰/۰۰ |
| تجمع جریان | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۱۳ |
| فاصله از رودخانه | -۰/۰۶۵ | ۰/۰۰ |
| ارتفاع از سطح دریا | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰ |
| جهت شیب | -۰/۰۰۳ | ۰/۰۰ |
| ضریب ثابت | ۱۳/۱۳ | ۰/۰۰ |

در شکل ۳ نقشهٔ پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشتر مناطق با احتمال وقوع زیاد و خیلی زیاد در رأس خندق‌ها (هدکت‌ها) که پراکنش نقاط نیز دیده می‌شود قرار دارند. پیشروی هدکت‌ها در منطقه سبب از بین رفتن زمین‌های حاصلخیز کشاورزی و ایجاد خندق‌هایی با ابعاد گسترده شده است. این مناطق باید در مدیریت اراضی و برنامه‌ریزی برای جلوگیری از تخریب خاک مدنظر قرار گیرند. در شکل ۴ مساحت هر یک از پهنه‌های خطر فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار با توجه به مدل رگرسیون لجستیک نشان داده شده است. بر این اساس، پهنه‌های

خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌ترتیب ۴۲/۳، ۱۵/۳، ۱۴/۶، ۱۲/۰۵، و ۱۵/۳ درصد را شامل شده‌اند درحالی که مساحت فرسایش‌های خندقی در این پهنه‌ها به‌ترتیب ۲/۱، ۱/۳، ۹/۱، ۲۳/۳ و ۶۴/۴ درصد است. این نتایج بیانگر این است که ۶۴/۴ درصد از فرسایش‌های با احتمال وقوع خیلی زیاد تنها در ۱۵/۳ درصد از مساحت منطقه قرار دارند. به‌عبارت دیگر در ۱۵/۳ درصد از مساحت منطقه احتمال وقوع فرسایش خندقی خیلی زیاد وجود دارد. در شکل ۴ مساحت هر یک از پهنه‌های خطر فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار با توجه به مدل منطق فازی نشان داده شده است. بر این اساس مساحت‌های وقوع فرسایش‌های خندقی در پهنه‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌ترتیب ۴۱/۲۹، ۱۵/۹۰، ۱۴/۲۱، ۱۳/۳۰، و ۱۵/۲۲ درصد را شامل می‌شوند، درحالی که مساحت این طبقات به‌ترتیب ۲/۱، ۱/۳، ۹/۱، ۲۳/۳ و ۶۴/۴ درصد است.



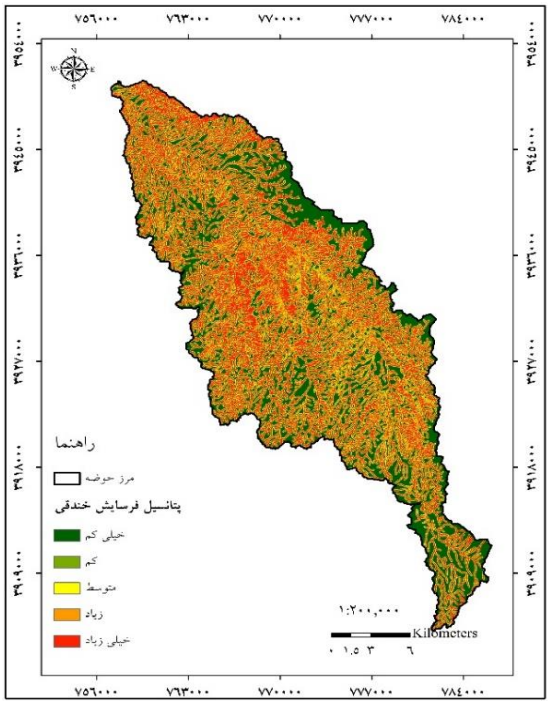

**شکل ۳. پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک**



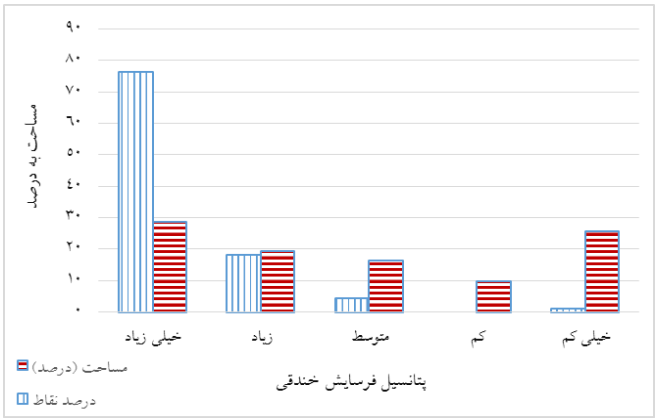

**شکل ۴. مساحت هر یک از پهنه‌های فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار استفاده از مدل رگرسیون لجستیک**

### منطق فازی

در شکل ۵ نقشهٔ پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی نشان داده شده است. الگوی پراکنش پهنه‌های مختلف از نقشهٔ به‌دست‌آمده با مدل منطق فازی با مدل رگرسیون لجستیک تبعیت می‌کند، اما به نظر می‌رسد اغراق‌نمایی در مساحت پهنه با احتمال وقوع فرسایش خندقی خیلی زیاد دیده می‌شود که احتمالاً مربوط به انتخاب اعداد برای مقدار گاما طی مدل‌سازی با این روش بوده است. با این‌حال، مناطق با احتمال وقوع زیاد و خیلی زیاد مطابق با رأس خندق‌ها (هدکت‌ها) هستند. در شکل ۶ مساحت هر یک از پهنه‌های خطر فرسایش خندقی در حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار با توجه به مدل منطق فازی نشان داده شده است. بر این اساس، مساحت‌های وقوع فرسایش خندقی در پهنه‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌ترتیب ۲۵/۷، ۹/۸۹، ۱۶/۲۲، ۱۹/۳۵، و ۲۸/۷ درصد را شامل شده‌اند، درحالی که مساحت طبقات به‌ترتیب ۱/۴، ۰/۳، ۲/۵، ۱۸/۸ و ۷۷/۳ درصد است.



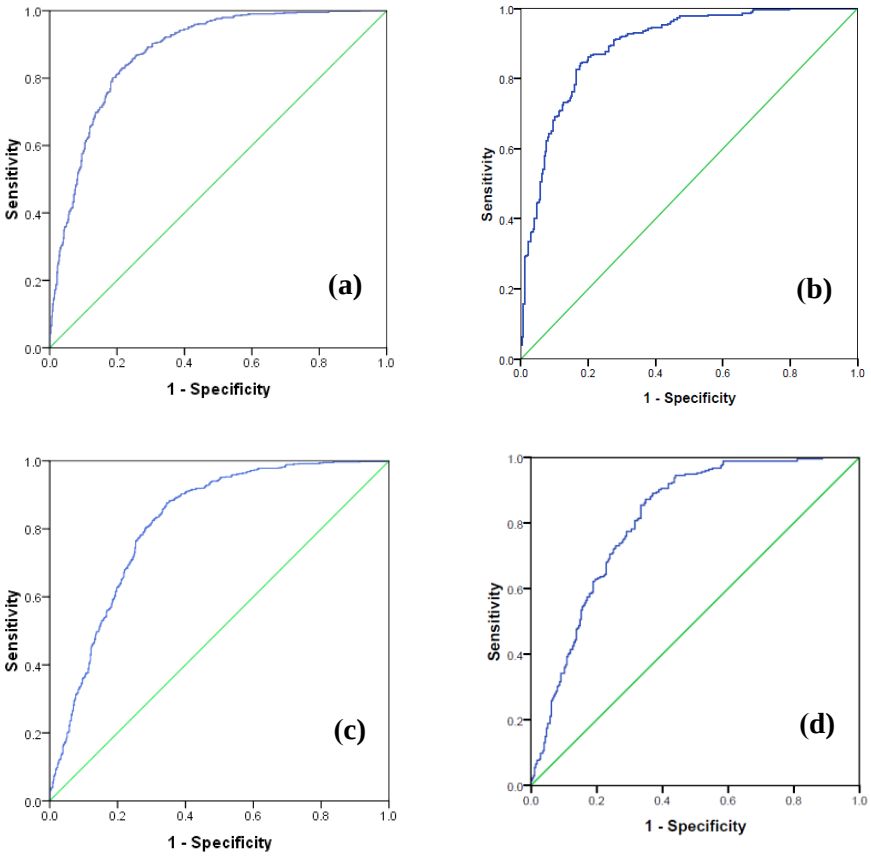

**شکل ۵. پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار با استفاده از مدل منطق فازی**




**شکل ۶. مساحت هر یک از پهنه‌های فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار استفاده از مدل منطق فازی**

**اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده**

در شکل ۷ و جدول ۳ نتایج ارزیابی عملکرد و قدرت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیون لجستیک و منطق فازی نشان داده شده است. بر این اساس، مساحت زیر منحنی ROC برای داده‌های آموزشی در مدل رگرسیون لجستیک ۰/۸۹۴ و برای داده‌های صحت‌سنجی ۰/۸۷۶ به دست آمد. درحالی که برای مدل منطق فازی این اعداد به‌ترتیب ۰/۸۱۵ و ۰/۸۱۱ محاسبه شد. در نهایت اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که مدل رگرسیون لجستیک نسبت به مدل منطق فازی در خصوص پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی در حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار عملکرد بهتری دارد.




**شکل ۷. منحنی ROC ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون لجستیک با توجه به داده‌های آموزشی (a) و اعتبارسنجی (b) و ارزیابی مدل منطق فازی با توجه به داده‌های آموزشی (c) و اعتبارسنجی (d)**

**جدول ۳. مقدار AUC مدل‌های پیش‌بینی‌کنندهٔ احتمال وقوع فرسایش خندقی**

| ردیف | مدل پیش‌بینی | AUC | |
|---|---|---|---|
| | | داده‌های آموزشی | داده‌های اعتبارسنجی |
| ۱ | رگرسیون لجستیک | ۰/۸۹۴ | ۰/۸۷۶ |
| ۲ | منطق فازی | ۰/۸۱۵ | ۰/۸۱۱ |

## نتیجه‌گیری

فرسایش خندقی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی و عامل اصلی تخریب زمین در حوضهٔ آبخیز کلوچه بیجار در استان کردستان است. شناخت مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع این پدیده و نیز پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع آن از اقدامات مدیریتی و پیشگیرانه با هدف شناخت بیشتر منطقه قبل از هر گونه اقدام مهندسی/ سازه‌ای و بیولوژیکی (مدیریت اراضی) یا ترکیبی از هر دو برای کاهش خسارت‌های احتمالی است. تهیهٔ نقشهٔ پیش‌بینی فرسایش خندقی راهنمای برنامه‌ریزان، مدیران، سازمان‌ها و تصمیم‌گیران در خصوص مدیریت این مناطق خواهد بود. در این پژوهش، ۹۵۰ نقطه در رأس خندق‌ها (هدکت‌ها) به‌عنوان نقشهٔ پراکنش فرسایش خندقی با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث و پیمایش صحرایی ثبت و به نسبت ۷۰ به ۳۰ تقسیم شدند. از آزمون همبستگی چندخطی برای بررسی همبستگی درونی بیست عامل مؤثر و نیز از دو مدل رگرسیون لجستیک و منطق فازی به‌منظور تهیهٔ نقشه‌های پیش‌بینی فرسایش خندقی در منطقهٔ پژوهش استفاده شدند. به‌طور کلی مهم‌ترین نتایج این پژوهش را می‌توان چنین برشمرد:

۱. براساس مدل رگرسیون لجستیک عوامل درجهٔ شیب و ارتفاع از سطح دریا با ضریب بتا مثبت (همبستگی زیاد) و تراکم رودخانه، بارش و جهت شیب با ضریب منفی (همبستگی ناچیز) بر وقوع فرسایش خندقی در منطقهٔ پژوهش اثرگذاری داشتند؛

۲. نقشه‌های پیش‌بینی فرسایش خندقی نشان دادند که مناطق با احتمال وقوع زیاد و خیلی زیاد با رأس خندق‌ها مطابقت دارند؛

۳. روش منطق فازی در شناسایی مناطق با احتمال وقوع زیاد و خیلی زیاد اغراق‌نمایی نشان داد؛

۴. مدل رگرسیون لجستیک با درصد مساحت زیر منحنی بیشتر، عملکرد و قدرت پیش‌بینی بیشتری از مدل منطق فازی نشان داد. این بدین معناست که نقشهٔ پیش‌بینی به‌دست‌آمده با این روش قابلیت اعتماد بیشتری دارد و می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان را با اطمینان خاطر بیشتری برای مدیریت این اراضی کمک کند.

به‌طور کلی، با توجه به اینکه فرسایش خندقی دارای سازوکار و پیچیدگی‌های خاص خود است، به نظر می‌رسد مهم‌ترین راهکار جلوگیری از رشد و گسترش فرسایش خندقی در حوضهٔ کلوچه بیجار، به‌کارگیری روش‌های مهندسی برای کنترل آبراهه‌ها در کوتاه‌مدت و اقدامات آبخیزداری به‌منظور کنترل رواناب در بلندمدت همراه با برنامه‌های مدیریتی در زمینهٔ اصلاح خاک است. پیشنهاد می‌شود با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین در ترکیب با الگوریتم‌های منفرد قدرت پیش‌بینی عملکرد مدل‌های افزایش داده شود تا عدم قطعیت ناشی از مدل کمتر شود و نقشه‌های پیش‌بینی با درجهٔ اطمینان و معقولیت بیشتری به‌دست آید.

**منابع**


[۱]. احمدی، حسن (۱۳۸۶). *ژئومورفولوژی کاربردی*، جلد ۱ (فرسایش آبی)، چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران.

[۲]. ارخازلو، حسین‌شهاب؛ امامی، حجت؛ حق‌نیا، غلام‌حسین؛ و اسمعلی، اباذر (۱۳۹۵). «مقایسهٔ دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی برای پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی در سه منطقه از استان اردبیل»، *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱(۲۱)، ص ۱۶-۱.

[۳]. اسماعیلی، رضا؛ و شوکتی، روناک (۱۳۹۴). «ارزیابی حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی با استفاده از رگرسیون لجستیک، در حوضهٔ صلوات‌آباد استان کردستان،» *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵(۲۰)، ص ۱۰۴-۹۱.

[۴]. اسمعیلی، اباذر؛ و عبداللهی، خدایار (۱۳۸۹). *آبخیزداری و حفاظت خاک*، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی.

[۵]. انتظاری، مژگان؛ ملکی، امجد؛ مرادی، خدیجه؛ و الفتی، سعید (۱۳۹۲). «پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزهٔ آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)»، *برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)*، ۱۷(۴)، ص ۸۶-۶۳.

[۶]. بیاتی خطیبی، مریم (۱۳۸۵). «ویژگی‌های خندق‌ها و عوامل کنترل‌کنندهٔ فرایندهای خندق‌زایی (محدودهٔ بین اهر و مشکین‌شهر)»، *جغرافیا و توسعه*، ۴(۷)، ص ۱۳۶-۱۱۵.

[۷]. بیانی خطیبی، مریم (۱۳۸۳). «تحلیل و بررسی نقش عوامل توپوگرافی و مورفوژنز در خندق‌زایی (مطالعهٔ موردی: دامنه‌های شمالی قوشه‌داغ بین اهر و مشکین‌شهر)»، *پژوهش‌های جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۴۹، ص ۷۰-۵۳.

[۸]. جعفری گرزین، بهنوش؛ دومهری، رضاعلی؛ صفایی، مهرداد؛ و احمدیان، حسن (۱۳۸۶). «معرفی مدل‌هایی برای پیش‌بینی رشد حجم خندق (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبخیز سرخ‌آباد مازندران)، *پژوهش و سازندگی*، ۷۵، ص ۱۱۷-۱۰۸.

[۹]. حسین‌زاده، نسرین؛ مددی، عقیل؛ و اسمعلی عوری، اباذر (۱۳۹۱). ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و پهنه بندی خطر آن با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قوری چای)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

[۱۰]. رفاهی. حسینقلی (۱۳۸۵). *فرسایش آب و کنترل آن*، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم.

[۱۱]. شادفر، صمد (۱۳۹۳). «کاربرد منطق فازی در بررسی فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ طرود)»، *پژوهش اطلاعات جغرافیایی*، ۲۳(۹۲)، ص ۴۲-۳۶.

[۱۲]. شهریور، عبدال؛ شادفر، صمد؛ خزایی، مجید؛ و عادلی، بهزاد (۱۳۹۶). «ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبخیز آبکندی)»، *اکوهیدرولوژی*، ۴(۱)، ص ۱۳۲-۱۱۹.

[۱۳]. صابر چناری، کاظم؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ شیخ، واحدبردی؛ و بایرام کمکی، چوقی (۱۳۹۵). «پهنه بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپستر ــ شفر در حوضهٔ آبخیز قرناوه، استان گلستان»، *اکوهیدرولوژی*، ۳(۲)، ص ۲۳۱-۲۱۹.

[۱۴]. عابدینی موسی (۱۴۰۰). «بررسی کمی فرسایش خندقی و رسوبدهی با استفاده از شاخص‌های فرسایندگی باران، مورفومتری و رگرسیون خطی در حوضهٔ آبخیز هرزند چای»، *تخریب و احیای اراضی طبیعی*، ۲(۳) ، ص ۱۱۱-۱۰۰.

[۱۵]. غلامی، محمد؛ احمدی، مهدی؛ و محمودی، مهران (۱۳۹۶). تحلیل محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی در گسترش کالبدی شهر با تأکید بر فرسایش خندقی (مطالعهٔ موردی: شهر مُهر در جنوب استان فارس)، *مخاطرات محیط طبیعی*، ۶(۱۲)، ص ۱۲۴-۱۰۵.

[۱۶]. فریدگیگلو، بهنام؛ نجفی‌نژاد، علی؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ و اونق، مجید (۱۳۹۱). بررسی عوامل توسعهٔ فرسایش خندقی در حوزهٔ آبخیز قوری‌چای، (دشت مغان) استان اردبیل، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

[۱۷]. متولی، صدرالدین؛ و اسماعیلی، رضا (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*. ۸، ص ۲۰-۱.

[۱۸]. هادسون، نورمن (۱۳۷۲). *حفاظت خاک*، ترجمهٔ حسین قدیری، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۱۹]. یمانی، مجتبی؛ زمان‌زاده، محمد؛ و احمدی، مهدی (۱۳۹۲). «تحلیل عوامل مؤثر بر شکل گیری و توسعهٔ فرسایش خندقی (مطالعهٔ موردی: حوضه دشت کهور در استان فارس)»، *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۱(۱)، ص ۸۴-۵۳.

[20]. Conoscenti, C.; Angileri, S.; Cappadonia, C.; Rotigliano, E.; Agnesi, V.; & Märker, M. (2014). "Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy)", *Geomorphology*, 204, pp: 399-411.

[21]. Duman, T.Y.; Can, T.O.L.G.A.; Gokceoglu, C.; Nefeslioglu, H.A.; & Sonmez, H.Ü.S.N.Ü. (2006). "Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul", Turkey", *Environmental Geology*, 51(2), pp: 241-256.

[22]. Fawcett, T. (2006). "An introduction to ROC analysis. Pattern recognition letters", 27(8), pp: 861-874.

[23]. Moayeri, M.; Maleki, A.; Entezari, M.; Moradi, K.; & Olfati, S. (2013). Simulation of possibility of gully erosion in catchment of Dyreh by analytical hierarchy process (AHP). Journal of Basic and Applied Scientific Research, 3(7), pp:1-9.

[24]. Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Oostwoud Wijdenes, D.; & Roxo, M. (2001). "Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments", *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(1), pp: 17-30.

[25]. 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 Surface Processes and Landforms*, 26(9), pp: 911-933.

[26]. Pourghasemi, H.R., Jirandeh, A.G., Pradhan, B., Xu, C. & Gokceoglu, C. (2013). "Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province", *Iran. Journal of Earth System Science*, 122(2), pp:349-369.

[27]. Roy, P., Pal, S.C., Janizadeh, S., Chakrabortty, R., Islam, A.R.M.T., Chowdhuri, I. & Saha, A. (2022). "Evaluation of climate change impacts on future gully erosion using deep learning and soft computational approaches", *Geocarto International*, , pp: 1-31.

[28]. Tien Bui, D., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Omidavr, E., Pham, B.T., Talebpour Asl, D., Khaledian, H., Pradhan, B., Panahi, M. & Bin Ahmad, B. (2019). "A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran)", *Sensors*, 19(11), p: 2444.