نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳

صفحات ۱۳۷ – ۱۵۹

ارزیابی عوامل موثر در حساسیت پذیری فرسایش گالی با استفاده از مدلهای دمپسترشیفر و آنتروپی

شمس اله عسگری[1]؛ استادیار تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،تهران، ایران

کوروش شیرانی؛ دانشیارپژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

دریافت مقاله : ۱۴۰۲/۱۲/۰۵ پذیرش نهایی:۱۴۰۳/۰۷/۰۱

چکیده

فرسایش گالی یکی از اشکال پیشرفته فرسایش خاک است که تحلیل و شناسایی آن در جهت حفاظت خاک ضرورت دارد. هدف این تحقیق تعیین آستانه عوامل موثر در فرسایش گالی می باشد بنابراین براساس سوابق تحقیقات دیگران عوامل تاثیر گذار بر فرسایش گالی انتخاب شدند. جهت دستیابی به هدف تحقیق از دو مدل معروف دمپستر شیفر و مدل آنتروپی استفاده شده است. جهت تعیین مهم ترین متغیرها از آزمون جک نایف و برای مشخص نمودن قدرت پیش بینی مدلها از منحنی ROC استفاده شد. با استفاده از تصاویر گوگل ارث و همچنین بازدیدهای میدانی ۳۳۱ نقطه گالی شناسایی، ثبت و نقشه پراکنش گالی تهیه شد. داده‌های مکانی پراکنش فرسایش گالی در قالب دو دسته تصادفی آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. نتایج خروجی لایه ها، وزن دهی و کلاس بندی و تلفیق در دو مدل دمپستر شیفر و آنتروپی، استخراج نقشه پهنه بندی حساسیت فرسایش پذیری گالی و آستانه حساسیت فرسایش پذیری گالی برای هر عامل می‌باشد. بر اساس آزمون جک نایف به ترتیب متغیرهای شاخص کاربری اراضی ۳۳درصد، شاخص تراکم آبراهه ۱۷درصد، لیتولوژی ۱۳درصد، اقلیم ۱۰درصد، بارش ۵ درصد شاخص پوشش گیاهی ۴ درصد و شاخص ارتفاع ۲ درصد که در مجموع ۸۴ درصد می باشند، بیشترین تأثیر را در فرسایش خندقی داشتند. سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم *ROC* و مساحت سطح زیر نمودار *AUC* مدل دمپستر شیفر با ضریب تبیین ۰/۹۳۴ و مدل حداکثر آنتروپی با ضریب تبیین ۰/۹۳۶ موفقیت هر دو مدل را نشان می دهد. نتایج علمی تحقیق قابل ترویج و آموزش می باشد و از لحاظ کاربردی دستگاه اجرایی ذی ربط جهت کنترل فرسایش گالی می تواند تمهیدات لازم را با استفاده از نتایج این تحقیق بکار گیرد.

واژه‌های کلیدی: **حوضه ایلام، فرسایش گالی، شاخص های توپوگرافی، مدل حداکثر آنتروپی، مدل دمپسترشفر**

[1] نویسنده مسئول:

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

مقدمه

فرسایش گالی در کشور ایران بیشتر در زمین‌های کشاورزی به وجود می‌آید و هرساله باعث می‌شود مقدار زیادی از زمین‌های کشاورزی حاصلخیز از بین برود و برای زمین‌ها محدودیت ایجاد می کند (شهبازی و همکاران۲۰۲۲). فرسایش گالی از فرآیندهای مهم نابودی خاک است که در اقلیم‌های مختلف سبب هدررفت قابل ملاحظه‌ی خاک و تولید رسوب فراوان میشود (کاستیلو و گومز، ۲۰۱۶). فرسایش گالی یک فرآیند تدریجی است که در آن خاک سطحی غنی از مواد مغذی به تدریج با نزدیک شدن به سمت گالی کاهش می یابد (سان و همکاران ۲۰۲۲). فرسایش بلندمدت گالی سبب انتقال رسوب، کاهش حاصلخیزی و نابودی ساختار خاک میشود (کله هوئی و همکاران ۲۰۲۰). فرسایش خندقی یکی از مخاطره آمیزترین انواع فرسایش آبی است که موجب تخریب اراضی و برهم خوردن تعادل منابع زیستی و محیط زیست می‌شود (وثوقی و همکاران۲۰۲۳). فرسایش گالی یک پدیده‌ی آستانه‌ای است که عامل‌های پرشماری در بروز و تشدید آن نقش دارند. عامل‌های طبیعی، نتیجه‌ی تأثیر سال‌های طولانی است که به صورت تدریجی اثرگذار بوده‌اند ولی عامل‌های انسانی به صورت تشدیدی سبب بروز این پدیده شده‌اند(کو و همکاران ۲۰۱۶). اطراف آبراهه‌ها و رودخانه‌ها به‌دلیل تمرکز جریان و جریان آب‌های سطحی عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش خندقی وجود دارد (تادسول و همکاران، ۲۰۲۳). برای مهارکردن انواع فرسایش، بایدً در نظر داشت که اساسا نمی توان عامل مشخص و معینی را به عنوان عامل اصلی فرسایش آبی در یک منطقه معرفی کرد، بلکه شرایط فرسایش موجود در یک منطقه را باید معلول تأثیرهای متقابل مجموعه عاملهای مؤثر شامل: پستی بلندی، خاک، پوشش گیاهی، کاربری زمینها و تغییرات آن و شرایط اقلیمی در ایجاد فرسایش دانست (پوسن و همکاران ۲۰۰۳). فرسایش آبکندی میتواند خطر جدی برای راهها، حصارها و سازه های مختلف باشد(احمدپور و همکاران ۲۰۲۱).

پژوهش گایدن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که قسمت‌هایی از آبخیز که تراکم زه‌کشی بالاتری دارند، احتمال فرسایش خندقی و تولید رسوب بالاتری دارند. داب و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل وزن شواهد به مدل‌سازی خطر وقوع گالی در کشور زیمباوه پرداختند. نتایج نشان داد که وقوع گالی های گذشته بیش‌تر تحت تأثیر پارامترهای ژئومتری و فیزیوگرافی (شامل پوشش زمین، نوع خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی) بوده و دقت مدل بر اساس روش منحنی تشخصی عملکرد نسبی قابل قبول به‌دست آمد. مرکر و همکاران (۲۰۱۵)، اقدام به ارزیابی و آنالیز گالی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی۱۰ متر و ۳۰ متر، تصاویر گوگل ارث و برداشت مختصات گالی‌های معرف منطقه با استفاده از GPS در طی یک کار میدانی درحوزه دریاچه ماکوینیا در تانزالیا پرداختند. در نهایت آنها بر اساس این تحقیق، نقشه پهنه بندی گسترش فرسایش گالی را در این حوزه تهیه نمودند.

صابر چناری و همکاران (۲۰۱۶) هدف از این تحقیق پهنه‌بندی خطر فرسایش گالی با استفاده از مدل دمپستر- شفر در حوضهٔ آبخیز قرناوهٔ استان گلستان که در نهایت، با جمع جبری نقشه‌های وزنی به‌دست‌آمده نقشهٔ پهنه‌بندی خطر فرسایش گالی به‌دست آمد. نتایج طبقه‌بندی مدل نشان داد از کل پهنه‌های گالی در نظر گرفته‌شده برای مرحلهٔ اعتبارسنجی مدل در حوضهٔ آبخیز قرناوه ۶۸/۰۶ درصد در طبقهٔ خطر زیاد و بسیارزیاد قرار می‌گیرند. همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی مشخصهٔ عملکرد نسبی و سطح زیرمنحنی آن نشان داد مدل دمپستر- شفر با دقت ۹۶/۱ درصد و انحراف معیار ۰/۰۰۳ برای پهنه‌بندی خطر فرسایش گالی منطقهٔ مطالعه‌شده مناسب است.

محمدخان و همکاران(۲۰۲۰) تحقیق در حوضهٔ کند در بالادست سد لتیان، هدف این پژوهش مشخص نمودن مناطق در معرض خطر فرسایش و آزمون کارایی مدل آنتروپی در این زمینه می‌باشد. در روش مورد استفاده بر اساس رخساره‌های ژئومورفولوژیکی، عوامل مؤثر در فرسایش با استفاده از مدل آنتروپی بررسی و نسبت به تهیه ماتریس آنتروپی و در نهایت نقشهٔ پهنه‌بندی فرسایش اقدام شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که شیب ۲۷/۸۱ درصد، سنگ‌شناسی

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

۱۶/۵۱ درصد، درصد پوشش گیاهی ۱۵/۷۴ درصد، بارندگی متوسط سالیانه ۱۵/۵۲ درصد، نوع کاربری ۱۴/۴۱ درصد و بافت خاک ۱۰/۰۱ درصد در ایجاد رخساره‌های فرسایشی منطقه تأثیرگذار بوده‌اند.

مددی و همکاران(۲۰۲۲) بررسی گالی با استفاده از مدل آنتروپی که بر اساس آزمون جک‌نایف به ترتیب متغیرهای ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه، بافت خاک، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه بیشترین تأثیر را در فرسایش گالی داشتند. منحنی ROC نشان دهنده دقت ۹۵ درصدی در مرحله اعتبار سنجی مدل است. بر اساس این مدل بیش از ۱۵ درصد حوضه (۸۴۴۵،۸۳ هکتار) دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد به فرسایش گالی است.

تیموریان و همکاران (۲۰۲۲) تحقیقی در ارتباط با فرسایش گالی با استفاده از مدل آنتروپی در استان فارس نتیجه گرفت که سطح زیر منحنیِ ویژگیِ عاملِ گیرنده بیش از ۹۰٪ به‌دست آمد، که نشان می‌دهد مدل به‌خوبی توانست فرسایش گالی را با داده ها ارزیابی کند. برپایه‌ی یافته‌های آزمون جک‌نایف، متغیرهای احتمال روی‌داد افقR ، عمق خاک، درصد قطعه‌های درشت‌دانه، پی‌اچ در محلول کلرید پتاسیم، و درصد ذره‌های لای بیش‌ترین تأثیر را در مدل‌سازی فرسایش گالی داشت.

یوسفی مبرهن و شیرانی (۲۰۲۳) با ارزیابی کارایی مدل بیشینه بی‌نظمی در شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش گالی و تعیین پهنه‌های حساس در حوزه آبخیز علاء سمنان نتیجه گرفتند که پهنه‌بندی حاصل از اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی بیانگر آن است که مناطق مستعد فرسایش گالی در مناطق مرتفع، واحدهای سنگی حساس (پهنه‌های رسی و مارنی کواترنری)، بارش متوسط سالانه، نوع خاک اریدسویل، اقلیم فراخشک، طبقات تراکم زهکشی بالا، شیب کم، اراضی پست، شاخص رطوبت توپوگرافی بالا، کاربری اراضی مرتعی و سطح زمین با بافت کم شکل می گیرد. سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی در تعیین اهمیت عوامل مؤثر محیطی در ایجاد فرسایش گالی در مناطق نیمه‌خشک پرداختند، نقشه تهیه شده از مناطق مستعد فرسایش گالی بر اثر عوامل محیطی نشان داد که عوامل محیطی در شرق و جنوب و جنوب شرقی دارای اثرات بیشتری در کاهش فرسایش گالی می‌باشند و به سمت مرکز حوزه و شمال و غرب حوزه فرسایش گالی افزایش می‌یابد و اثرات عوامل محیطی در افزایش فرسایش گالی بیشتر می‌شود. همچنین مساحت زیر منحنی ROC (AUC) در حالت‌های واسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۶۱ و در حالت اعتبار سنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۳۷ به دست آمد. بنابراین مدل بیشینه آنتروپی عملکرد مناسبی برای پیش بینی مناطق مستعد فرسایش گالی از خود نشان داد.

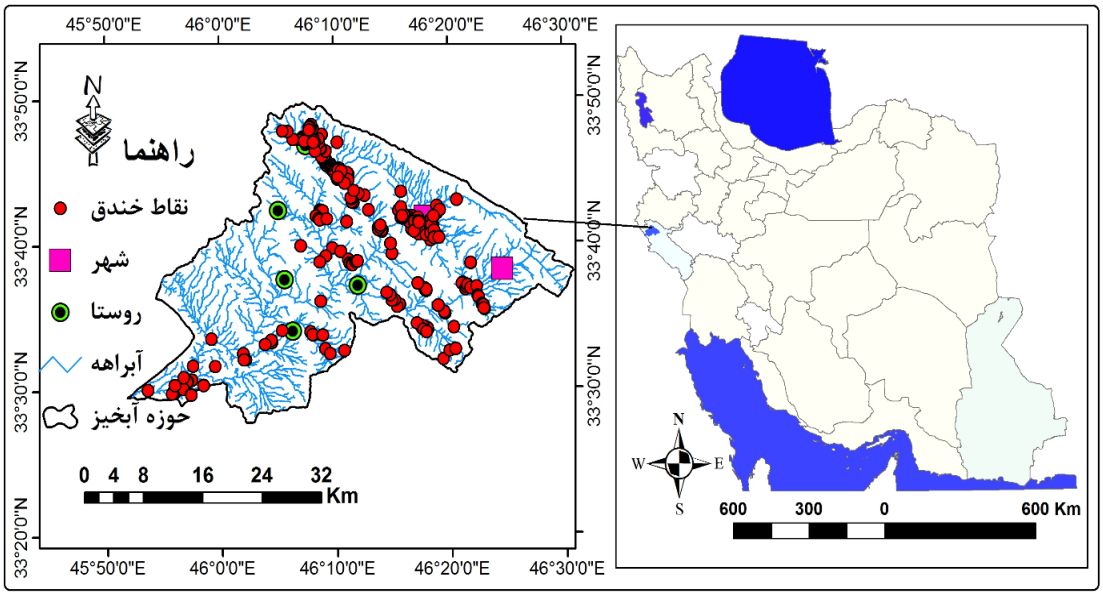
فرسایش گالی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب زمین است که منجر به کاهش بهره‌برداری از زمین می‌گردد. آبخیز ایلام تحت تأثیر فرسایش گالی قرار گرفته است، از پیامدهای این نوع فرسایش می‌توان به بهم خوردن تعادل اکولوژیک منطقه، به خطر افتادن منابع زیستی اشاره کرد که این امر مطالعه در مورد فرسایش گالی در منطقه را ضروری می‌کند. هدف از این پژوهش تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش گالی و تعیین مهمترین عوامل موثر در ایجاد فرسایش گالی با استفاده از تحلیل مدل های دمپستر شیفر و حداکثر آنتروپی است. فرض بر این است که عوامل محیطی و متغیرهای هیدروژئومورفومتریک در ایجاد فرسایش گالی تاثیر دارند. بنابراین در این تحقیق ۶ عامل محیطی (سنگ شناسی، کاربری، نوع خاک، اقلیم، بارش، پوشش گیاهی) و ۱۵ شاخص هیدروژئومورفومتریک تاثیرگذار در حساسیت فرسایش پذیری گالی ارزیابی شد که مهم‌ترین عوامل، میزان تاثیر متغیرها و آستانه حساسیت‌پذیری فرسایش گالی در این حوضه آبخیز تعیین شد. همچنین در این ارزیابی توانایی مدل‌های دمپسترشیفر و حداکثرآنتروپی در پهنه‌بندی فرسایش گالی مورد سنجش قرار گرفت و نقشه پراکنش گالی و نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش گالی خروجی از هر دو مدل تهیه شد که از لحاظ کاربردی دستگاه اجرایی ذی ربط می تواند بر اساس این نقشه‌ها و داده‌ها در حوضه آبخیز ایلام برنامه‌ریزی لازم جهت کنترل فرسایش خندقی اجرایی نماید.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

داده‌ها و روش ها

قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

حوضه آبخیز ایلام در شمال‌غرب استان ایلام در موقعیت جغرافیائی ´۲۷ °۳۳ تا ´۴۹ °۳۳عرض شمالی و ´۵۲ °۴۵ تا ´۳۰ °۴۶ درجه طول شرقی با مساحت ۱۱۹۱کیلومتر مربع واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر آبخیز به ترتیب۲۰۰ و۲۶۰۰ متر از سطح دریا می باشد. متوسط سالیانه بارندگی آبخیز۶۳۰ میلی‌متر و متوسط حداکثر و حداقل سالیانه دمای منطقه به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۰/۲ درجه سانتی‌گراد است. عمده گستردگی سازندهای زمین‌شناسی شامل آسماری، ایلام، پابده، گورپی، آغاجاری وگچساران با جنس سنگ‌شناسی آهک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ، انیدریت می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه را در نقشه ایران و استان ایلام نشان می دهد.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز ایلام

به منظور تهیه و آماده سازی نقشه‌های عوامل موثر و نقشه پراکنش رخداد فرسایش گالی از نقشه‌های موضوعی پایه و تصاویر ماهواره‌ای ALOS و SENTINEL2 منطقه مورد مطالعه به شرح ذیل استفاده گردید:

- نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) سازمان زمین‌شناسی کشور برای استخراج نقشه عامل موثر واحدهای سنگی یا سنگ شناسی، نقشه کاربری اراضی (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) طرح سیمای فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای استخراج نقشه کاربری اراضی استفاده شد. نقشه خاک‌شناسی موسسه خاک و آب کشور برای تهیه نقشه نوع خاک، نقشه اقلیمی دومارتن برای تهیه نقشه نوع اقلیم، نقشه‌های خطوط هم‌باران تهیه شده از داده‌های دراز مدت بارش ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مناطق مورد مطالعه تهیه شد. ازتصویر ماهواره‌ای SENTINEL2 مربوط به سال ۲۰۲۰ به منظور تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) با دقت مکانی ۱۰ متر استفاده شد.

- داده‌های رقومی ارتفاع (DEM) حاصل از سنجنده PALSAR ماهواره ALOS ژاپن با دقت مکانی ۱۲/۵ متر به منظور استخراج نقشه‌های هیدروژئومورفومتری (۱۵ متغیر مستقل مورفومتریک) شامل شاخص‌های انحنای دامنه یا طولی (Plan curvature)، شاخص انحنای نیمرخ (Profile curvature)، شاخص تحدب (Convergence index)، شاخص طبقه بندی انحناء(Curvature classification index) ، شاخص فاصله قائم از شبکه آبراهه Vertical distance to channel network index)، مساحت حوزه آبخیز (catchment area)، تراکم زه‌کشی (Drainage

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

density)، فاکتور طول – شیب آبراهه (Slope-Length)، شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic wetness Index)، بافت سطحی زمین (Surface texture)، ارتفاع (Altitude)، گرادیان شیب (Slope gradient)، جهت شیب (Slope aspect) و شاخص آنالیز سایه و روشن (Analytical hill shading)، و فاصله از شبکه زه‌کشی (Distance to drainage) می باشند .لازم به توضیح است از نقشه‌های فوق الذکر موجود در مقیاس‌های مختلف به عنوان مبنای شناخت اولیه اطلاعاتی استفاده شد. سپس بر اساس اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای SENTINEL2 با دقت مکانی ۱۰ متر مقیاس اطلاعاتی آنها در حد مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تدقیق و یکسان شد. به عبارت دیگر داده‌های مکانی که در مقیاس مبنای کوچکتر (۱:۲۵۰۰۰۰ مثل کاربری اراضی) بودند با داده‌های ماهواره‌ای SENTINEL2 تا مقیاس بزرگتر (۱:۱۰۰۰۰۰) تدقیق شدند. تصاویر گوگل‌ارث (Google Earth) به منظور تدقیق نقشه‌های عوامل موثر و همچنین شناسایی، تکمیل و تعیین محدوده‌های رخداد فرسایش گالی، در ادامه برای آماده سازی و ورود داده‌های مکانی برای اجرای مدل‌ها، کلیه نقشه‌های مورد نیاز اعم از نقشه‌های عامل موثر در محیط ArcGIS®10.8 در قالب فرمت رستری با اندازه سلولی مشابه و یکسان ۲۵ متر نمونه‌برداری مجدد (Resample) گردیدند.

نرم افزارهای مورد استفاده شامل ArcGIS@10.8 برای ایجاد و مدیریت پایگاه اطلاعاتی مکانی عوامل موثر، تحلیل و اجرای مدل‌ها و نقشه‌های خروجی، برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی هیدروژئومورفومتریک از SAGA GIS@4.9، برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای SENTINEL2، از ENVI@5.3، برای مدیریت و محاسبات مدل دمپسترشفر (Dempster Shafer) و پایگاه توصیفی لایه‌های اطلاعاتی از EXCEL@2019، برای اجرای مدل حداکثر آنتروپی مدل MAXENT@2.4.4 محاسبات و تحلیل‌های آماری شامل آزمون استقلال داده‌ها (Multicollinearity)، ویژگی عملگر گیرنده (ROC) از SPSS@26 می باشند.

مدل دمپسترشفر

دمپسترشفر در واقع نوعی عدم قطعیت درباره اندازه احتمال پیشامدها را مدل‌سازی نمود. پس از آن به‌عنوان نظریه شواهد به‌عنوان ساختاری برای نمایش اطلاعات ناکامل و استدلال تحت عدم قطعیت، فرمول‌بندی نمود. تئوری دمپسترشیفر به عنوان تئوری تابع باور شناخته میشود که خود تعمیمی است از تئوری بیزین است که مبتنی بر احتمالات می‌باشد.

از تئوری دمپسترشفر (Dempster Shafer) در تحلیل حساسیت رخداد فرسایش خندقی استفاده می‌شود که ساختار آن بصورت (رابطه۱) تعریف می‌شود:

$$m: 2^{\Theta}=\{\theta, T_P, \overline{T_P}, \Theta\} \quad \text{با} \quad \Theta=\{T_P, \overline{T_P}\} \qquad \text{(رابطه۱)}$$

در (رابطه۱) T_P به‌مفهوم گزاره هدف و مبین پیکسل‌ها یا سلول‌های متأثر از رخداد خندق محتمل می‌باشد. $\overline{T_P}$ به مفهوم متضاد گزاره هدف مبین پیکسل‌ها یا سلول‌هایی است که تحت‌تأثیر رخداد خندق محتمل نمی‌باشند. اگر لایه‌های داده‌های مکانی چندگانه L در یک منطقه که حساسیت رخداد خندق آن مورد مطالعه می‌باشد، موجود باشد. هر لایه داده مکانی به‌عنوان شاهد E_i (i=1, 2,…,L) برای گزاره هدف T_P در نظر گرفته می‌شود. داده معلوم E_{ij}، که ویژگی رده jام شاهد E_i و توابع توزیع فراوانی گزاره‌های مثبت و مخالف می‌باشند، نسبت احتمال $\lambda(\overline{T_P})$Eij گزاره هدف مثبت را پشتیبانی می‌کند و در قالب (رابطه ۲) تعریف می‌شود. که در آن، $N(L \cap Eij)$ تعداد پیکسل‌های رخداد خندق واقع در هر رده E_{ij} است، N(L) تعداد کل پیکسل‌های رخداد خندق رخداده در منطقه مورد مطالعه است، $N(E_{ij})$ تعداد پیکسل‌ها در هر رده E_{ij} و N(A) تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. صورت و مخرج کسر (رابطه ۲) به‌ترتیب نسبت به رخداد خندق رخداده و نسبت مناطق غیر رخداد خندق در طبقه معین E_{ij} می‌باشند. در مدل دمپسترشفر، وزن مثبت، معمولاً با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال در (رابطه ۳) تعریف می‌شود. همچنین نسبت احتمال

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف در قالب (رابطه۴) تعریف می‌شود. صورت کسر مبین نسبت رخداد خندق‌هایی است که در طبقه معین E_{ij} اتفاق نیفتاده است. مخرج کسر، نماینده نسبت مناطق فاقد رخداد خندق در خارج طبقات دیگر E_{ij} می‌باشد. وزن منفی در مدل دمپسترشفر به وسیله لگاریتم طبیعی نسبت احتمال در (رابطه ۵) حاصل می‌شود. به‌طورکلی مقدار دامنه نسبت احتمال از صفر تا بی‌نهایت متغیر است. بنابراین گام استانداردسازی به توابع جرم از دو تابع نسبت احتمال نیازمند است. نسبت‌های احتمال بر مجموع مقادیر نسبت احتمال ویژگی‌های تمام رده‌ها در شاهد معین E_i تقسیم می‌شود.

((λ (TP)Eij=((N(l∩Eij))/(N(L)))/((N(Eij)-N(l∩Eij))/(N(A)-N(L) رابطه ۲)

((T¯_P)Eij=((N(L)-N(L∩Eij))/(N(L)))/((N(A)-N(L)-N((Eij)-N(l∩Eij))/(N(A)-N(L) (رابطه۳)

m(Tp)Eij=(λ 〖(Tp)〗 _Ej)/∑ 〖λ(Tp)〗 _Eij (رابطه ۴)

m(¯T_P)Eij=λ(〖¯T_P)〗 _Ej)/∑ 〖λ(¯T_P)〗 _Eij m(¯T_P)Eij) (رابطه۵)

m(θ)=1-m(T_P)Eij-m(T¯_P)Eij (رابطه ۶)

باتوجه به چهارچوب تشخیص تحلیل‌های حساسیت رخداد خندق ، تابع باور $m(T_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مثبت $(T_P)Eij\ \lambda$ بطور مستقیم از تابع جرم بازیابی می‌شود. همچنین تابع ناباوری $m(\overline{T}_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف $(\overline{T}_P)_{Eij}\lambda$ از تابع جرم بازیابی می‌شود. تابع مقبولیت $m(\theta)$ حاصل تفاضل توابع باور و ناباوری از مقدار یک، بوسیله رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در این مدل طبقه‌هایی که از وزن تابع باور بیشتر و ناباوری کمتری برخوردارند، دارای حساسیت بیشتری نسبت به رخداد خندق می‌باشند.

مدل آنتروپی

آنتروپی قادر به اندازه‌گیری عدم قطعیت منابع اطلاعات است (Alencar et al ،۲۰۲۲) این شاخص نشان‌دهنده میزان بی‌نظمی در محیط است (Bernini et al ،۲۰۲۱)، تهیه نقشه حساسیت فرسایش گالی با استفاده از شاخص آنتروپی امکان محاسبه وزن مربوط به هر یک از متغیرهای ورودی را فراهم می‌کند (Azareh،19 et al ۲۰) مقدار وزن هر یک از عوامل به‌طور جداگانه تحت عنوان شاخص آنتروپی بیان می‌گردد، درنتیجه با استفاده از این شاخص، می‌توان عواملی که بیشترین تأثیر را در رخداد گالی یا هر پدیده‌ای دارند، شناسایی کرد. به‌منظور تعیین وزن مربوط به هر یک از عوامل مؤثر از روابط ۷ تا ۱۱ استفاده شد(Conforti, et al 2024).

رابطه۷)

$$W_f = I_C * FR$$

رابطه۸)

$$I_c = \frac{Env_{max} - En}{Env_{max}} \quad c = 1, \dots n$$

رابطه۹)

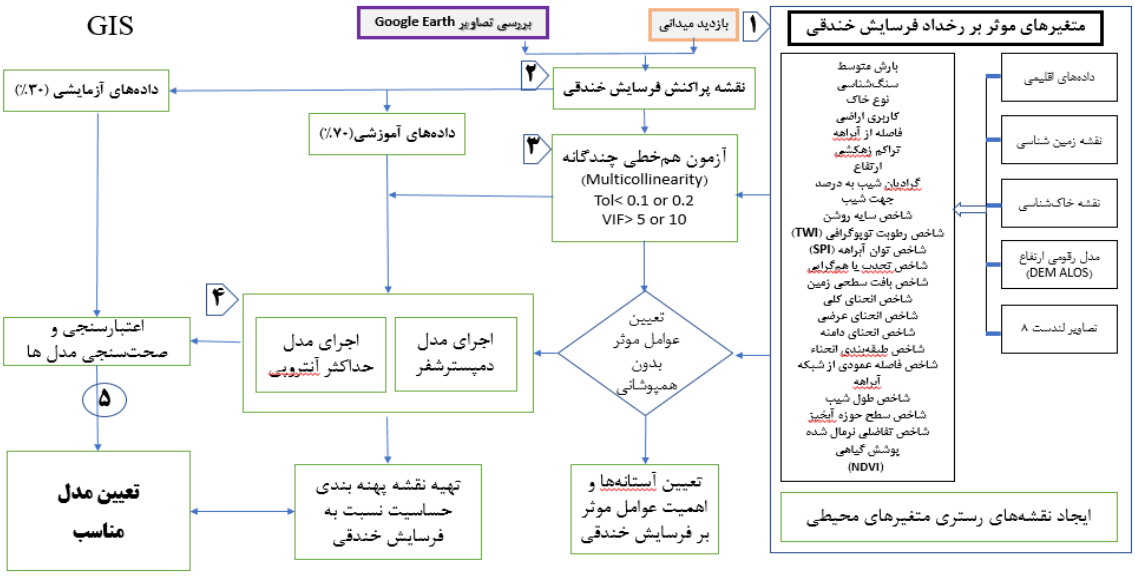
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

$$En_{max} = log_2 N_c, N_c - NClass$$

$$P_d = \frac{FR}{\sum_{c=1}^{N_c} FR} \quad \text{رابطه ۱۰)}$$

$$FR = \frac{A_l}{A_{cl}} \quad \text{رابطه ۱۱)}$$

که در آن A_l درصد پیکسل‌های گالی در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{cl} درصد پیکسل‌های (مساحت) مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، FR: نسبت فراوانی لغزش هر طبقه از عوامل مؤثر، P_d چگالی احتمال، En_vمقدار انتروپی، En_{max}: حداکثر انتروپی، I_c: ضریب اطلاعات و W: وزن نهایی هر عامل است. فلوچارت روش تحقیق در شکل۲ نشان داده شده است.



شکل(۲) فلوچارت مراحل تحقیق

تهیه لایه پراکنش گالی

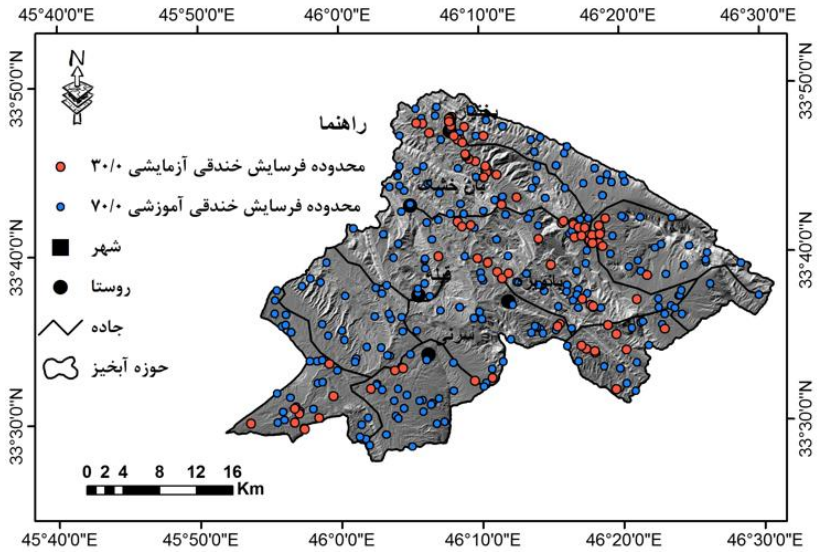
در این پژوهش پس ازپیمایش بررسی‌های میدانی با استفاده از دستگاه GPS جهت ثبت گالی، تفسیر پردازش تصاویر ماهواره‌ای و Google Earth تعداد ۳۳۱ گالی شناسایی و ثبت شدند. شکل ۲ نمونه هایی از تصاویر طبیعی گالی منطقه نشان داده شده است.



شکل۳-نمونه اشکال فرسایش گالی آبخیز ایلام

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

محدوده ها و نقاط گالی تدقیق داده شد و لایه پراکنش گالی آبخیر برای اولین بار تهیه شد برای آماده سازی ورودی داده ها به مدل ها، لایه پلی گونی پراکنش گالی با دستور Feature to point به فایل نقطه ای تبدیل گردید. فایل نقطه ای مرحله قبل به دو دسته آموزشی یا کالیبراسیون و آزمایشی یا اعتبارسنجی به نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد تقسیم شد که در شکل ۴ نتایج بصورت لایه پراکنش دادهای آموزشی و آزمایشی نشان داده شده است.



شکل۴-نقشه پراکنش فرسایش گالی آبخیز ایلام

نتایج و بحث

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی طبقات ارتفاعی نشان داد با افزایش ارتفاع به‌ترتیب تا ۲۵۰۰متر میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی افزایش یافته (نسبت مستقیم) اما از ارتفاع ۲۵۰۰متر نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش یافته و رابطه معکوس است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نقشه شاخص سایه روشن در ۴ طبقه از مقدار ۰/۰۰۵ تا ۱/۹۱ نشان داد که میزان شاخص سایه روشن که خود به اثر ترکیب ارتفاع با مورفومتری سطح زمین وابستگی پیدا می‌کند با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. بررسی‌ها نشان داد که میان ارتفاع و مناطق مستعد فرسایش خندقی (از نظر کمی) رابطه معکوس برقرار می‌باشد که با نتایج سایر پژوهش‌گران (Maerker و همکاران،۲۰۱۵؛ رنگزن و همکاران، ۲۰۲۲) مطابقت دارد. مطالعه Lana و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که عامل شیب تأثیر زیادی در خصوصیات هیدرولیک جریان داشته و به‌تبع آن، میزان فرسایش خاک تغییر می‌یابد و فرسایش خندقی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش با افزایش شیب تا ۱۵ درصد منطبق با رخساره ژئومورفولوژیک دشت‌سر تا قبل از رخساره کوهستان میزان رخداد فرسایش خندقی افزایش می‌یابد. این یافته با استفاده از نسبت فراوانی و اوزان مستخرج از مدل استنتاج شده است و تایید می‌گردد. از آنجایی که شکل‌گیری فرسایش خندقی وابستگی زیادی به شرایط بالادست دارد، هنگامی که طول دامنه زیاد باشد، پتانسیل رخداد فرسایش خندقی به واسطه تجمیع جریان‌های سطحی، افزایش می‌یابد. از این‌رو، عامل طول دامنه در برخی از مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خاک به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Roy و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و عامل طول شیب به متر در ۵ طبقه بین صفر تا ۲۳۵ متر نشان می دهد که میزان طول شیب با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. با افزایش طول شیب نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاسته شده است. این امر به‌دلیل عملکرد پارامترهای دیگر مورفومتریک در دامنه‌های طویل مانند استقرار پوشش گیاهی، جنس سازند و ... می‌تواند باشد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

براساس مطالعه Sufi و همکاران (۲۰۱۷) جهت شیب نقش به‌سزایی در نرخ فرسایش خاک و تحولات زمین‌ریخت‌شناسی سطح زمین دارد. بنابراین، عامل جهت شیب نیز در پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی نقش مهمی داشته و در پژوهش‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴، Sun و همکاران، ۲۰۲۲). بر اساس پژوهش‌های انجام شده در این تحقیق نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نقشه جهت یا وجه شیب در ۹ طبقه صاف، شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غرب و شمال غربی ارائه شده است. نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی به‌ترتیب در جهات شیبِ شمال، شمال غرب و شمال شرق دارای بیش‌ترین میزان می باشد که به‌دلیل رطوبت بیشتر و عمق بیشتر خاک در دامنه های شمالی است. و همچنین نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی در جهات شیبِ جنوب، صاف و جنوب شرق کم‌ترین میزان می‌باشد. برای سطح زمین پنج نوع انحنای زمین شامل انحنای کلی، انحنای مقطع[۲] و انحنای دامنه یا سطح[۳]، هم‌گرایی سطح زمین و طبقه‌بندی انحناء در نظر گرفته می‌شود. هریک از این متغیرها اطلاعات متمایزی از وضعیت هم‌گرایی عمودی و افقی دامنه‌ها ارائه می‌دهند و تأثیر زیادی بر شرایط هیدرولیک جریان سطحی و زیرسطحی و در نهایت نرخ فرسایش خاک دارند. عوامل انحناء در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی غالباً مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Shahrivar و همکاران، ۲۰۱۶، Roy و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص انحناء در قالب سه طبقهِ هم‌گرا یا مقعر[۴] (۱۸/۲۴- تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح[۵] (۰/۱- تا ۰/۱)، واگرا یا محدب[۶] (۰/۱ تا ۲۰/۶۴) ارائه شده است. میزان شاخص انحناء کلی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش خندق در (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش خندق در(صاف به واگرا) می‌یابد. بطورکلی نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقیِ طبقه هم‌گرا نسبت به طبقه واگرا بیش‌تر است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص انحناء دامنه یا طولی در قالب سه طبقهِ هم‌گرا یا مقعر[۷] (۹/۷۴- تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح[۸] (۰/۱- تا ۰/۱)، واگرا یا محدب[۹] (۰/۱ تا ۱۰/۲۳) ارائه شده است. میزان شاخص انحناء دامنه یا طولی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش (صاف به واگرا) می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و شاخص طبقه‌بندی انحناء در هشت طبقه از ۱ تا ۸ ارائه شده است. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص طبقه‌بندی انحناء معکوس است. به‌عبارت دیگر با افزایش شاخص طبقه‌بندی انحناء، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص هم‌گرایی در ۴ طبقه از ۱۷- تا ۱۷/۵ ارائه شده است. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص هم‌گرایی معکوس است. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص هم‌گرایی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص انحناء نیم‌رخ یا عرضی مناطق مطالعاتی در قالب سه طبقهِ هم‌گرا یا مقعر (۱۱/۸۶ تا ۰/۱)، صاف یا مسطح (۰/۱ تا ۰/۱-)، واگرا یا محدب (۰/۱- تا ۱۹/۳-) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است مقادیر منفی و مثبت طبقات انحناء نیم‌رخ یا عرضی در مقایسه با انحناء کلی و انحنای دامنه متضاد می‌باشد. میزان شاخص انحناء نیم‌رخ یا عرضی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش (واگرا به صاف) و سپس کاهش (صاف به هم‌گرا) می‌یابد. نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقیِ طبقه هم‌گرا نسبت به طبقه واگرا در آبخیز ایلام بیش‌تر است. بطور کلی مقادیر منفی انحناء که نماینده هم‌گرایی سطح می‌باشد به دلیل تمرکز جریان و تاثیر عملکرد

2. Profile curvature
3. Plan curvature
3. concave
4. flat
5. convex
6. concave
7. flat
8. convex

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

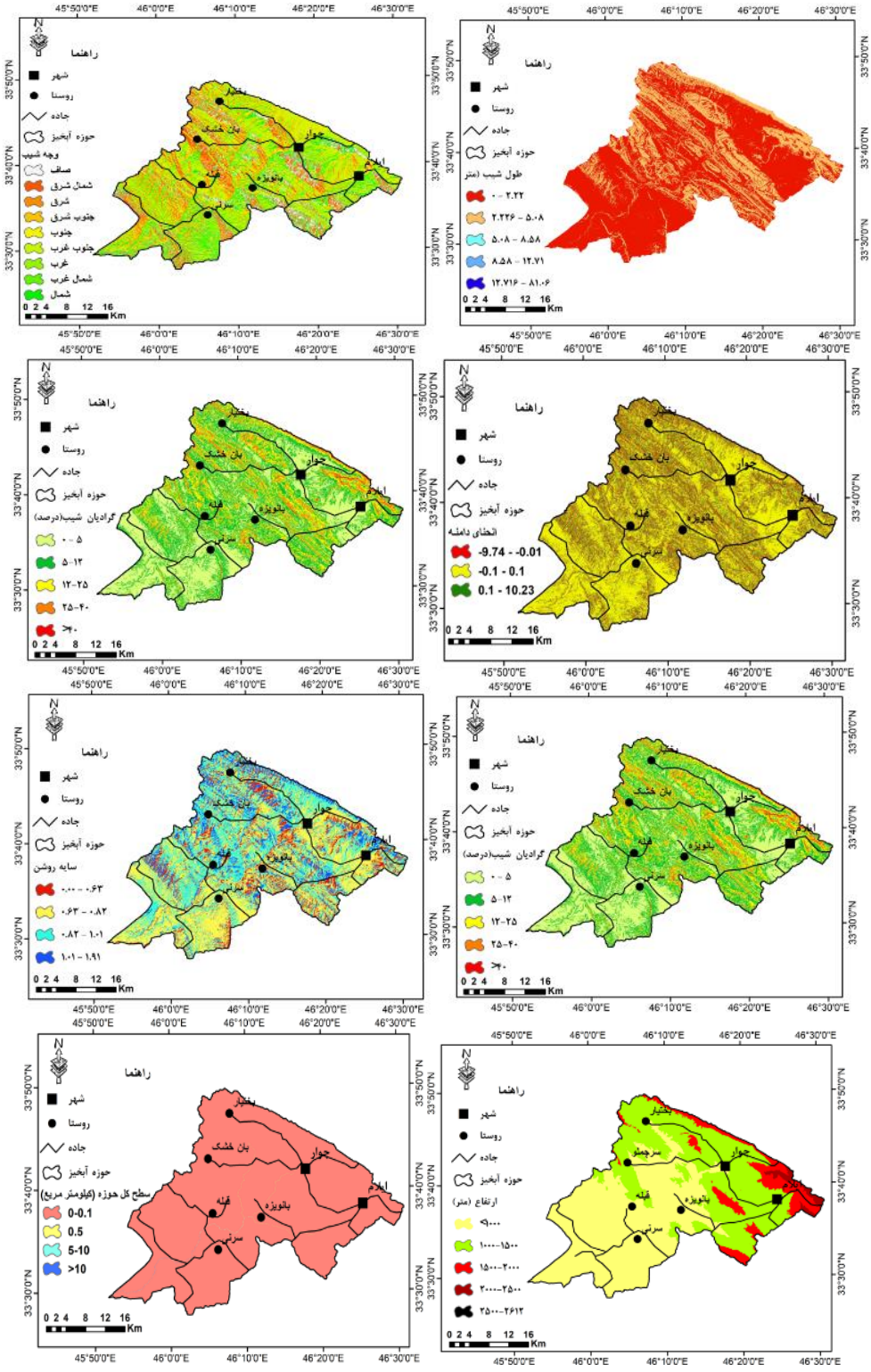
فرسایشی بیشتر نسبت به سطوح انحناء صاف یا مثبت انحناء از مقادیر بیشتر نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی برخوردار می‌باشد. این پنج انحناء در این پژوهش دقیقاً این اصل علمی را تایید می‌نمایند. با توجه به نقشه شاخص هم‌گرایی و منحنی پاسخ این شاخص، بیش‌تر خندق‌ها در مناطق مقعر تشکیل شده‌اند. وجود مناطق پست به‌عنوان چاله‌هایی که حالت مقعر دارند، باعث ایجاد بدام افتادگی رواناب می‌شود و شرایط لازم را برای انحلال فراهم می آورد. این تحلیل و نتیجه گیری نتایج دیگران را نیز تایید می‌کند (Angileri و همکاران،۲۰۱۶، Rahmati و همکاران،۲۰۱۷). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص فاصله قائم تا شبکه آبراهه در ۴ طبقه از ۰ تا ۸۵ متر ارائه شده است. میزان شاخص فاصله قائم تا شبکه آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا از ۰ تا ۱۵ متر افزایش و سپس از ۱۵ متر به بالا، کاهش می‌یابد. بنابراین در این آبخیز با افزایش فاصله افقی و قائم از آبراهه‌ها نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات فاصله از آبراهه بر حسب متر در ۴ طبقه بین ۰ تا بیشتر از ۵۰۰ متر ارائه شده است. میزان فاصله از آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش فاصله از آبراهه، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. سطح زه‌کشی آبخیز هرچه بیشتر باشد تمرکز جریان در قسمت‌های پایین دست افزایش یافته و لذا رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد (شیرانی، ۱۳۹۸). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص سطح زه‌کشی حوزه آبخیز در ۴ طبقه از ۰/۲۱ کیلومتر تا ۵۵ کیلومتر ارائه شده است. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص سطح زه‌کشی آبخیز مورد مطالعه مستقیم است. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص سطح زه‌کشی آبخیز، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳)هم‌خوانی دارد.

بافت سطحی زمین نماینده زبری سطح زمین می‌باشد. بافت سطحی زبر در واقع نماینده تناوب رسوبات یا سازندهای سست و میزان فرسایش بالا در سطح زمین می‌باشد. بنابراین رخداد فرسایش خندقی در سطوح با زبری زیاد محتمل‌تر به‌نظر می‌رسد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص بافت سطحی زمین در ۴ طبقه از ۱۲/۲۵ تا ۲۳/۵ ارائه شده است. میزان شاخص بافت سطحی زمین با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش بافت سطحی زمین، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. براساس مطالعه Shit و همکاران (۲۰۲۰) مدل وزن‌شواهد نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین شاخص توان جریان و رخداد فرسایش خندقی وجود دارد. تأثیر مستقیم این فاکتور در کنش سطح زمین و شکل‌گیری فرسایش خندقی نیز در نتایج پژوهش Meliho و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص توان آبراهه در ۵ طبقه از ۱۳/۵- تا ۷/۶۹ ارائه شده است. بطورکلی نسبت فراوانی و شاخص توان آبراهه رابطه مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص توان آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. هرچه میزان تراکم زه‌کشی در آبخیز بالاتر باشد، پتانسیل تخلیه جریان از آبخیز سریع‌تر خواهد شد. بر اساس نتایج مطالعه Rahmati و همکاران (۲۰۱۶)، تراکم زه‌کشی موجب تجمع بیشتر جریان در یک محدوده از آبخیز شده که به‌نوبه خود افزایش احتمال شکل‌گیری فرسایش خندقی در این محدوده‌ها را به دنبال داشته است. بر اساس پژوهش انجام شده نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات تراکم آبراهه برحسب کیلومتر بر کیلومتر مربع در ۵ طبقه از ۰ تا ۳۴ کیلومتر بر کیلومتر مربع ارائه شده است. بطورکلی نسبت فراوانی خندق و شاخص تراکم آبرهه رابطه مستقیم نشان داد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان تراکم آبرهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد (، Soleimanpour و همکاران، ۲۰۲۱، Tadesual و همکاران، ۲۰۲۳، Zakerinejad و همکاران، ۲۰۲۳). سازند زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رخداد فرسایش خندقی است. زیرا مقاومت واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی نسبت به انواع فرسایش به‌ویژه فرسایش آبی در بروز این پدیده هستند. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نوع واحد سنگی در ۵ گروه بر حسب

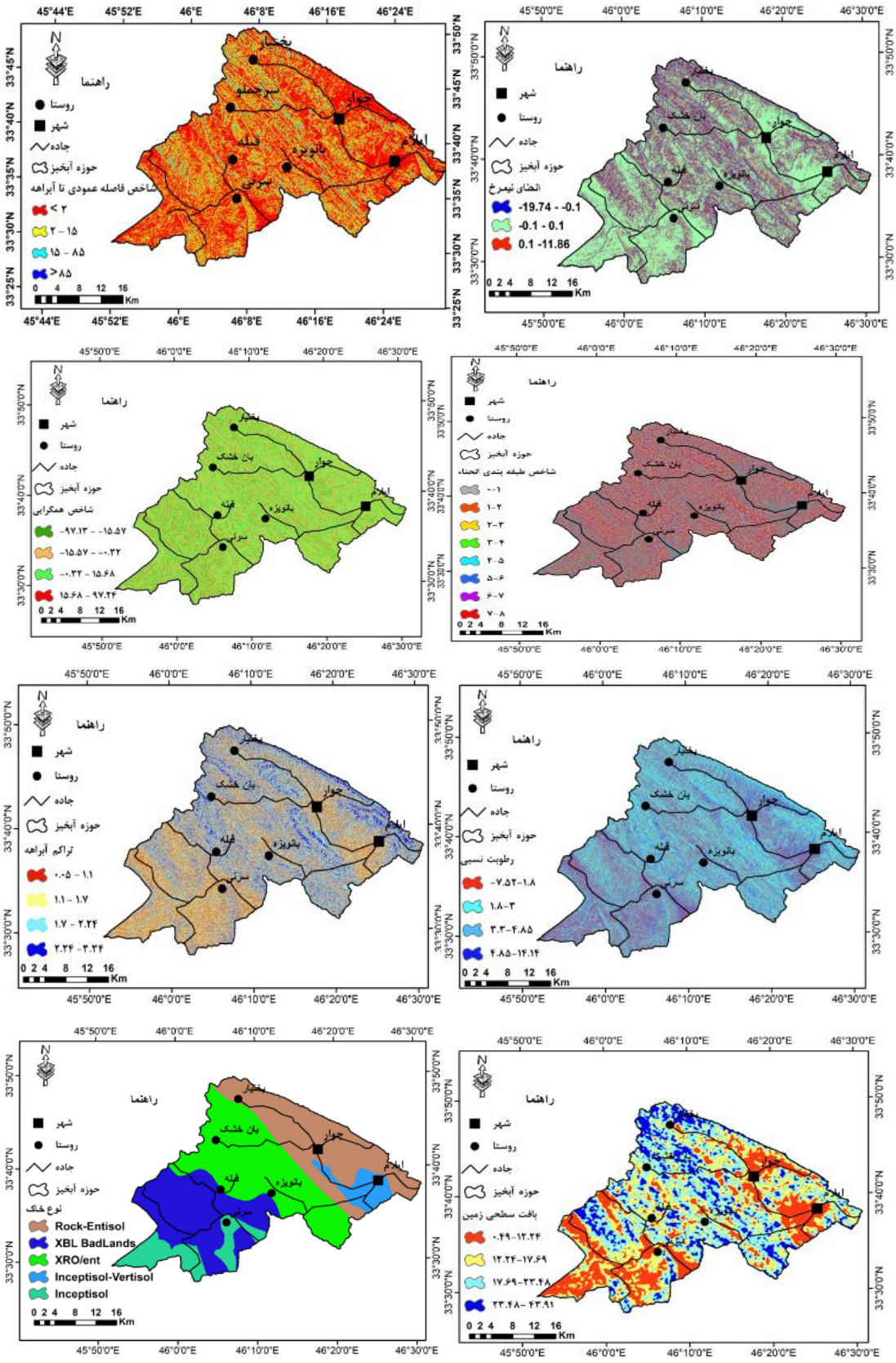
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

ویژگی‌های سنگی ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی انواع واحد سنگی به‌ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین می باشد. که به ترتیب گروه‌های دو، چهار، سه، یک و پنج، دارای بیش ترین رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. در جدول ۱ گروه های سنگی نشان داده شده است. کاربری اراضی کشاورزی و باغ به‌دلیل تغییر کاربری اراضی از جنگل یا مرتع خوب به زمین‌هایی که تحت تاثیر فعالیت انسانی و جریان‌های مصنوعی آب در سطح زمین یا جابه‌جایی خاک (شخم زدن) قرار گرفته‌اند نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی بیشتر می‌باشد. در عوض مناطق با پوشش جنگلی و مرتع متراکم به‌دلیل استقرار گیاه و عدم جریانات سطحی رخداد فرسایش خندقی از گسترش کمتری برخوردار می‌باشد. نوع کاربری اراضی در ایجاد خندق های خطی تأثیر معنی‌داری نداشته است. هر چند که کاربری مرتع سهم بیشتری را در ایجاد این خندق‌ها از خود نشان داده است. این یافته توسط برخی از محققین دیگر نیز گزارش شده است (جعفری گرزین و همکاران، تشکری،۱۳۹۲، علی‌پور،۱۳۹۳). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و کاربری زمین در ۶ گروه ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی انواع کاربری زمین به‌ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین آمده است. درآبخیز ایلام به‌ترتیب کاربری کشاورزی و باغ، زمین بایر، جنگل و مرتع فقیر دارای رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و انواع خاک در ۵ گروه ارائه شده است. فراوانی رخداد فرسایش خندقی خاک‌های نوع رخنمون سنگی اینسپتی‌سویل کم‌ترین و نوع مربوط به بدلند یا هزاردره بیش‌ترین را نشان می دهد. پوشش گیاهی همواره یک نقش محافظتی در مقابل بارندگی و جریان‌های سطحی داشته و موجب کاهش فرسایش خاک می‌شود. نقشه تراکم پوشش گیاهی اطلاعات مفیدی درخصوص آسیب‌پذیری و حساسیت اراضی نسبت به فرسایش خاک ارائه می‌دهد. یکی از شاخص‌های رایج برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) است که در مطالعات مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Azedou و همکاران، ۲۰۲۱؛ Sun و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص NDVI در ۳ طبقه کم‌تر از ۰/۰۶، ۰/۰۶ تا ۰/۱۱ و بیش‌تر از ۰/۱۱ ارائه شده است. میزان شاخص NDVI با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش شاخص NDVI، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. در خصوص پتانسیل‌یابی فرسایش خندقی، عامل بارندگی به عنوان یکی از متغیرهای مهم پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Gayen و همکاران، ۲۰۱۹؛ Lei و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lana و همکاران، ۲۰۲۲). در این پژوهش با افزایش میزان بارش خصوصاً در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه خشک میزان رخداد فرسایش خندقی بیشتر می‌باشد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات بارش در ۴ طبقه کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر، ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، ۳۵۰ تا ۳۷۰ میلی‌متر و بیش‌تر از ۳۷۰ میلی‌متر ارائه شده است. میزان بارش با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر با افزایش بارش نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش یافته است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نوع اقلیم در ۳ اقلیم نیمه خشک از جنوب و جنوب غرب به نیمه مرطوب و مدیترانه ای بطرف شمال آبخیز ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی به‌ترتیب اقلیم مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب، دارای بیش‌ترین رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. نتایج عوامل تاثیر گذار در فرسایش گالی در شکل ۵ نشان داده شده است.

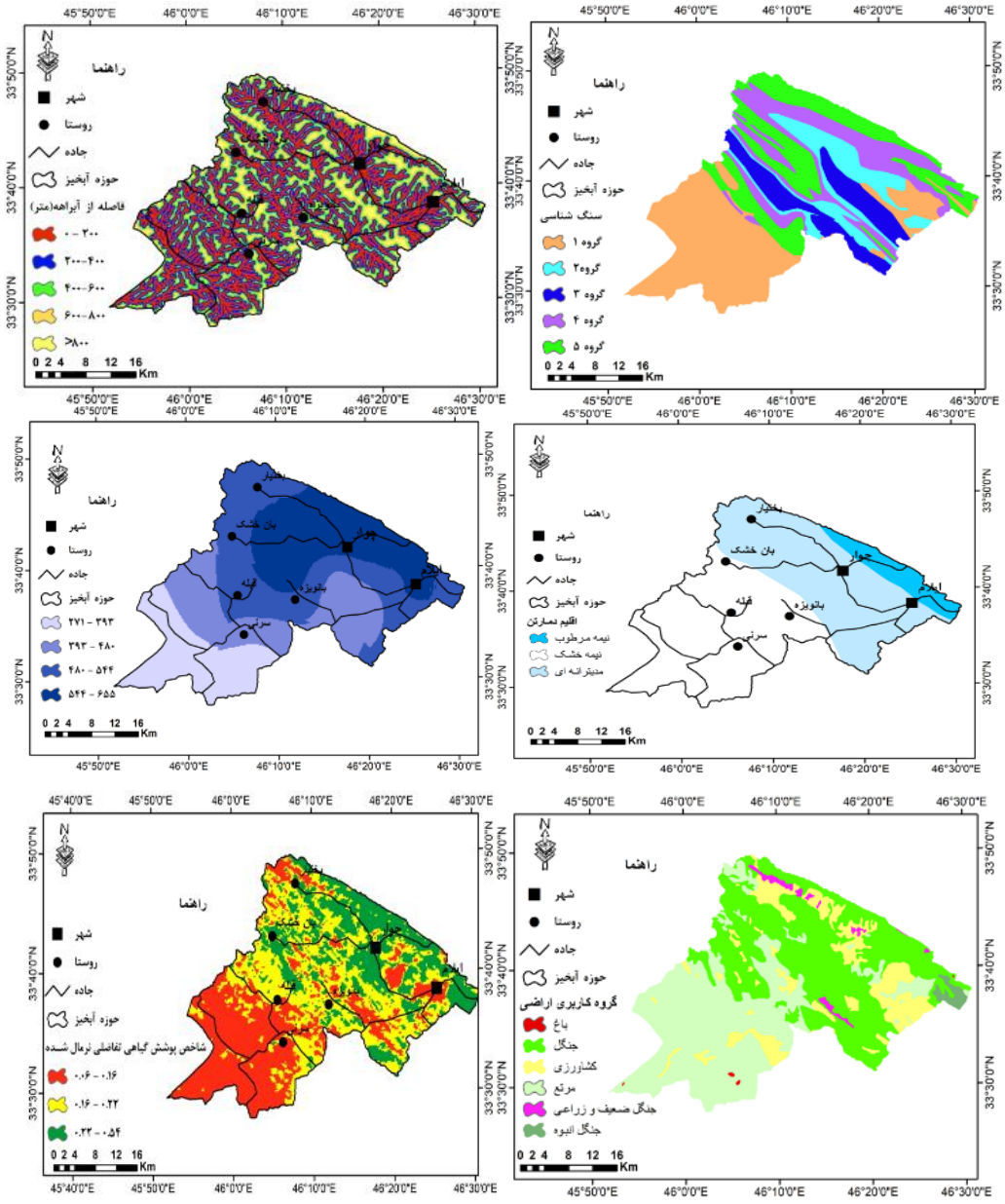
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



شکل ۵. نقشه های طبقه بندی عامل های موثر بر رخداد فرسایش گالی

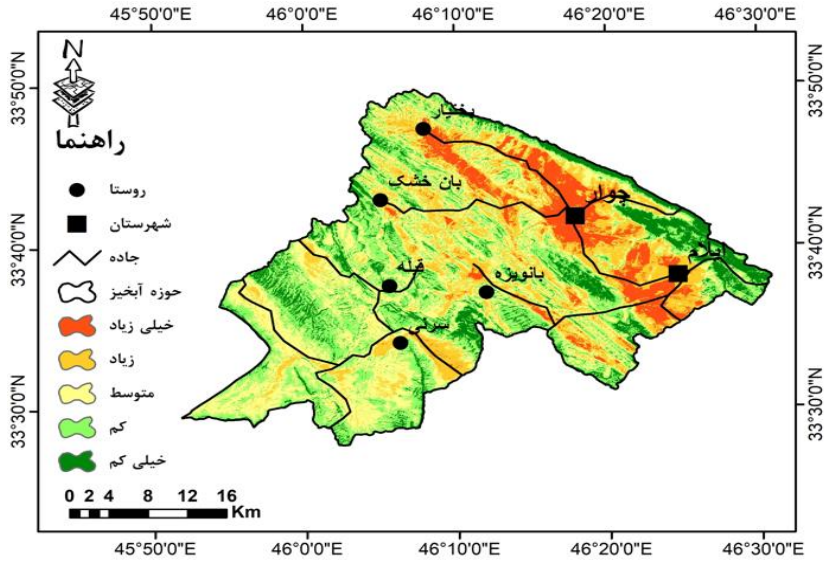
تحلیل نتایج اجرای مدل دمپسترشفر و پهنه بندی فرسایش خندقی

نتایج وزن‌های محاسبه شده حاصل از ارتباط عامل تحلیل سایه روشن با رخداد فرسایش خندقی حاصل از اجرای مدل دمپسترشفر نشان می دهد که با افزایش میزان سایه روشن، مقدار تابع باور دمپسترشفر رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد و از اعداد مثبت به اعداد منفی تمایل پیدا می‌کند. مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور دمپسترشفر ۰/۱۴ تا ۰/۴۱ نشان داده شده است. در عامل جهت شیب بطورکلی جهات شیب شمالی بیشترین و جهات شیب صاف و جنوبی کمترین مقدار تابع باور دمپسترشفر را به‌خود اختصاص می‌دهند. مقادیر کمینه برای جهات شیب جنوب شرق و جنوب به‌ترتیب ۱/۱۴- تا ۱- و صاف و جنوب ۰/۰۲ و شمال، شمال شرق و شمال غرب ۰/۲۲ و برای جهات شیب شمال و شمال شرق۰/۲۱ همچنین مقادیر بیشینه تابع باور ۰/۷۴، نشان می دهد که نتایج مقادیر حداقل و حدکثر در تابع باور دمپسترشفر برای جهت شیب مناسب می‌باشد. بطورکلی اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب کمترین و اقلیم‌های خشک

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

و نیمه خشک بیشترین مقدار تابع باور دمپسترشفر را به‌خود اختصاص می‌دهند. میزان عامل هم‌گرایی با مقادیر تابع باور رابطه معکوس دارند. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان هم‌گرایی (از اعداد منفی به طرف اعداد مثبت)، مقادیر تابع باور کاهش می‌یابد. مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور برای عامل هم‌گرایی در آبخیز ایلام به‌ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۳۹می‌باشد. میزان عامل انحنای کلی سطح زمین (هم‌گرا، صاف و واگرا) همانند عامل هم‌گرایی با مقادیر تابع باور رابطه معکوس دارند. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان انحنای کلی (از اعداد منفی به طرف اعداد مثبت)، مقادیر تابع باورکاهش می‌یابد. مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور برای عامل انحنای سطح زمین با انحنای واگرا و هم‌گرا به ترتیب ۰/۶۲- و ۰/۰۷- متغیر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد طبقات انحنای سطح زمین همانند انحنای سطح زمین و شاخص هم‌گرایی با تابع باور رابطه معکوس دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش طبقه انحنای سطح زمین میزان تابع باور کاهش می‌یابد. مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور برای عامل طبقه‌بندی انحنای سطح زمین به‌ترتیب ۰/۲۳۱- و ۰/۲۷۰متغیر است. نتایج مقادیر تابع باور برای عامل فاصله از آبراهه نشان می‌دهد با افزایش فاصله از آبراهه مقدار تابع باور کاهش می‌یابد. دو طبقه فاصله از آبراهِ بیشتر از ۵۰۰ متر و کمتر از ۱۰۰ متر منطبق با مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور به‌ترتیب ۰/۵۸- و ۰/۱۲ می باشد. نتایج مقادیر تابع باور برای عامل تراکم آبراهه نشان می‌دهد با افزایش تراکم آبراهه مقدار تابع باور افزایش می‌یابد. دو طبقه تراکم آبراهِ کمتر از ۱/۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع و بیشتر از ۲/۷ کیلومتر بر کیلومتر مربع منطبق با مقادیر کمینه و بیشینه تابع باور برای عامل به‌ترتیب ۳/۶۲- و ۰/۴۱می‌باشد. میزان عامل ارتفاع با مقادیر تابع باور از طبقه ۱ تا ۳ تابع باور افزایش و سپس در طبقات ۴ و ۵ کاهش می‌یابد. مقادیر کمینه و بیشینه نتایج تابع باور برای کاربری اراضی مرتع فقیر و مخلوط زراعت و مرتع به‌ترتیب با مقادیر ۱/۰۷- و ۰/۶۰ می باشد. مقادیر کمینه و بیشینه نتایج وزن‌شاهد برای عامل سنگ‌شناسی گروه‌های ۱ و ۴ به‌ترتیب با مقادیر ۰/۹۲- و ۰/۸۴می باشد. مقادیر کمینه و بیشینه نتایج تابع باور عامل طول شیب برای طبقه ۲۷/۶ تا ۲۳۵ متر و ۱۳/۳۵ تا ۱۴/۲ متر به‌ترتیب با مقادیر ۱/۹۴- و ۰/۱۶ می‌باشد. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل NDVI رابطه عکس دارد. با افزایش NDVI میزان تابع باور کاهش می‌یابد. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل انحنای عرضی نشان می‌دهد طبقه هم‌گرا نسبت به طبقه واگرا از مقدار تابع باور بالاتری برخوردار می‌باشد. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل بارش نشان می‌دهد بطورکلی با افزایش بارش میزان تابع باور نیز افزایش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل گرادیان شیب نشان می‌دهد با افزایش میزان شیب میزان تابع باور کاهش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل نوع خاک نشان می‌دهد نوع خاک اینسپتی‌سویل دارای بیشترین رخداد فرسایش خندقی می‌باشد. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل توان آبراهه نشان می‌دهد با افزایش میزان توان آبراهه میزان تابع باور نیز افزایش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل بافت سطحی نشان می‌دهد با افزایش میزان بافت، میزان تابع باور نیز افزایش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل سطح زهکشی نشان می‌دهد با افزایش میزان سطح زهکشی میزان تابع باور نیز افزایش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل رطوبت زهکشی نشان می‌دهد با افزایش میزان رطوبت زهکشی میزان تابع باور نیز افزایش یافته است. مقادیر نتایج تابع باور برای عامل فاصله عمودی از شبکه آبراهه نشان می‌دهد با افزایش میزان فاصله عمودی از شبکه آبراهه میزان تابع باور کاهش یافته است. نتایج طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپسترشفر در شکل ۶ و جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به‌ترتیب ۹/۳۶، ۱۸/۴۸، ۲۶/۲۶، ۳۰ و ۱۵/۸۹می‌باشد. همچنین درصد رخداد فرسایش خندقی در طبقات حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به‌ترتیب ۶۵/۶۵، ۲۱/۲۸، ۹/۴۲، ۳/۳۴ و ۰/۳۰می‌باشد. به‌عبارت دیگر طبقات حساسیت خیلی زیاد و زیاد مجموعاً بیش از ۲۷ درصد سطح آبخیز را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۸۶ درصد، رخدادهای فرسایش خندقی را در بر می‌گیرند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



شکل ۶ نقشه طبقات پهنه‌بندی حساسیت فرسایش گالی با استفاده از مدل دمپستر-شفر

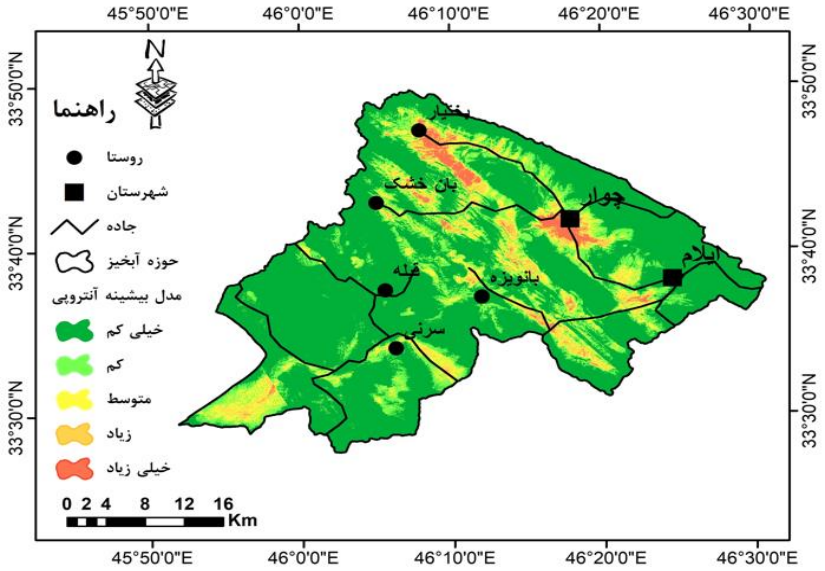
جدول ۱ مقادیر شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش گالی در مدل دمپستر-شفر

طبقه	نام طبقه	پیکسل گالی	درصد گالی	پیکسل طبقه	درصد مساحت طبقه	نسبت فراوانی	شاخص سطح سلول هسته
۱	خیلی کم	۱	۰,۳۰	۳۰۲۸۲۹	۱۵,۸۹	۰,۰۲	۵۲,۲۹
۲	کم	۱۱	۳,۳۴	۵۷۱۵۰۷	۳۰,۰۰	۰,۱۱	۸,۹۷
۳	متوسط	۳۱	۹,۴۲	۵۰۰۳۸۵	۲۶,۲۶	۰,۳۶	۲,۷۹
۴	زیاد	۷۰	۲۱,۲۸	۳۵۲۱۴۹	۱۸,۴۸	۱,۱۵	۰,۸۷
۵	خیلی زیاد	۲۱۶	۶۵,۶۵	۱۷۸۳۸۵	۹,۳۶	۷,۰۱	۰,۱۴

تحلیل نتایج مدل حداکثر آنتروپی

بر اساس نتایج طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی همانطور که ملاحظه می‌شود درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۱۲/۹۸، ۲۴/۰۵، ۳۱/۹۰، ۱۱/۵۸ و ۱۹/۴۹، می‌باشد. همچنین درصد رخداد فرسایش خندقی در طبقات حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۸۶/۰۲، ۱۲/۱۶، ۱/۲۲، ۰/۳۰ و ۰/۳۰می‌باشد. به‌عبارت دیگر طبقات حساسیت خیلی زیاد و زیاد مجموعاً در حوضه ایلام بیش از ۳۷ درصد، به خود اختصاص داده است. همچنین این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) در حوضه ایلام بیش از ۹۸ درصد، رخدادهای فرسایش خندقی را در بر می‌گیرند. بطورکلی بر اساس مدل حداکثر آنتروپی بیش از ۸۰ درصد رخدادهای فرسایش خندقی در دو طبقه حساسیت خیلی زیاد تا زیاد قرار دارند که در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج مقادیر شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش گالی در مدل حداکثر آنتروپی در جدول ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



شکل ۶ نقشه طبقات پهنه‌بندی حساسیت فرسایش گالی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

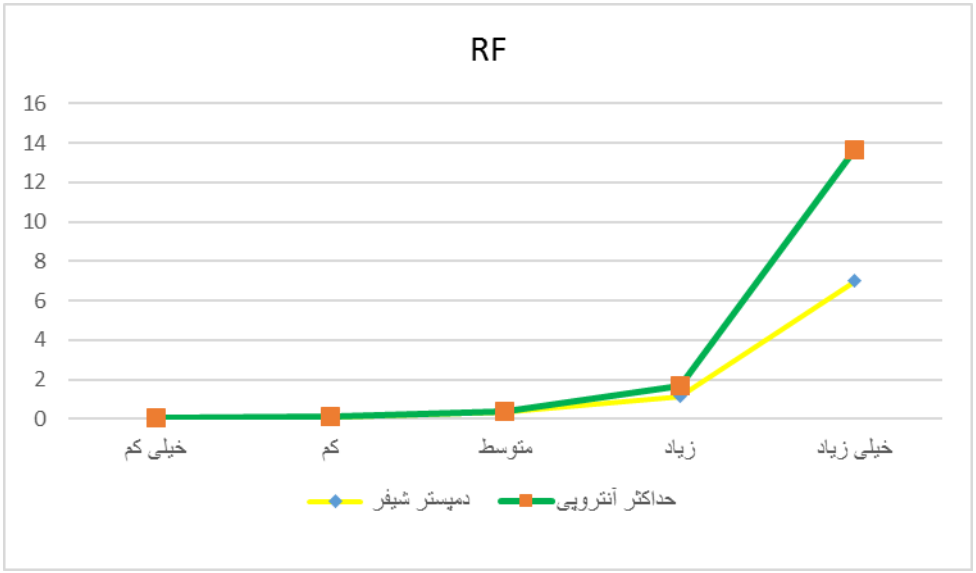
جدول ۲ مقادیر شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش گالی در مدل حداکثر آنتروپی

طبقه	نام طبقه	پیکسل گالی	درصد گالی	پیکسل طبقه	درصد مساحت طبقه	نسبت فراوانی	شاخص سطح سلول هسته
۱	خیلی کم	۱	۰,۳۰	۲۲۰۶۶۶	۱۱,۵۸	۰,۰۳	۳۸,۰۹
۲	کم	۱	۰,۳۰	۳۷۱۳۷۳	۱۹,۴۹	۰,۰۲	۶۴,۱۱
۳	متوسط	۴	۱,۲۲	۶۰۷۹۰۵	۳۱,۹۰	۰,۰۴	۲۶,۲۴
۴	زیاد	۴۰	۱۲,۱۶	۴۵۸۴۱۵	۲۴,۰۵	۰,۵۱	۱,۹۸
۵	خیلی زیاد	۲۸۳	۸۶,۰۲	۲۴۷۴۲۳	۱۲,۹۸	۶,۶۳	۰,۱۵

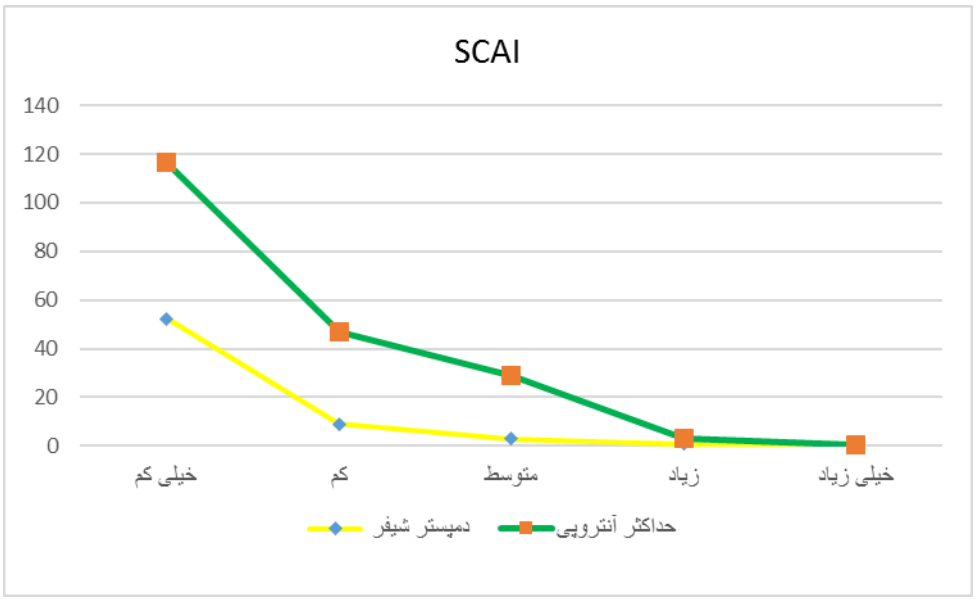
مقایسه نتایج دو مدل دمپستر-شفر و حداکثر آنتروپی

مقایسه نتایج شاخص‌های نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در مدل دمپستر-شفر و حداکثر آنتروپی بصورت نمودار در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود دو شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته تقریباً رابطه معکوس با همدیگر دارند. به‌عبارت دیگر با افزایش حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش خندقی، شاخص نسبت فراوانی افزایش و شاخص سطح سلول هسته کاهش می‌یابد. شاخص نسبت فراوانی برای رده‌های خیلی کم تا متوسط حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش خندقی با شیب نسبتاً ملایم روند افزایشی دارد بطوریکه برای رده‌های زیاد تا خیلی زیاد بطور قابل توجهی افزایش نشان می‌دهد. شاخص نسبت فراوانی بیش‌ترین روند تغییرات افزایشی را نشان می‌دهد. در مقابل شاخص سطح سلول هسته از رده حساسیت خیلی کم تا متوسط کاهش قابل توجه و از رده زیاد تا خیلی زیاد، کاهش نسبتاً تدریجی را نشان می دهد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



شکل ۷ مقایسه نمودار شاخص نسبت فراوانی طبقات حساسیت فرسایش گالی



شکل ۸ مقایسه نمودار شاخص سطح سلول هسته طبقات حساسیت فرسایش گالی

اعتبار سنجی و کارآمدی مدل‌ها

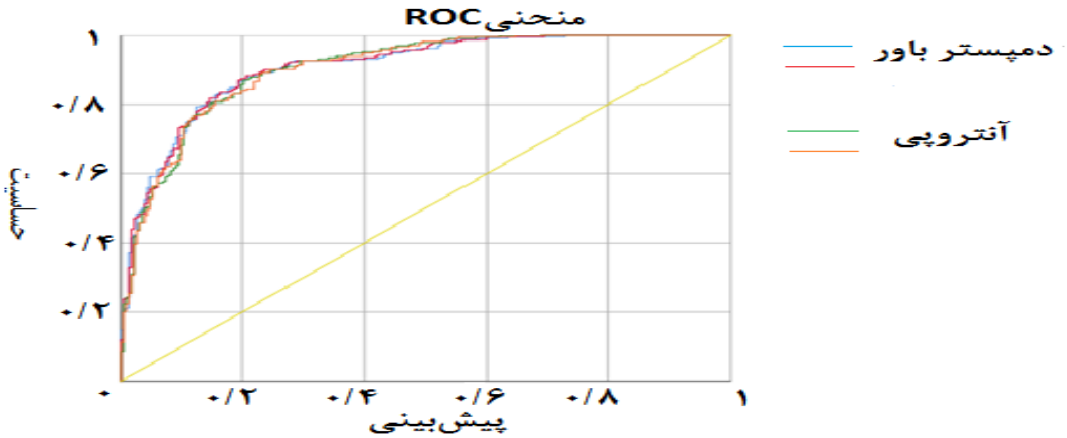
در این پژوهش نقشه پراکنش فرسایش گالی برای ۳۳۱ گالی تهیه و رقومی شده است، که از ۷۰ درصد گالی‌ها برای آموزش مدل دمپسترشفر و آنتروپی استفاده گردید که شامل ۲۳۲ گالی می‌باشد. از ۳۰ درصد مابقی که شامل ۹۹ گالی است، برای اعتبارسنجی مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد سیستم ROC و مساحت سطح زیر نمودار AUC استفاده شد. ابتدا داده‌های به‌دست‌امده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش گالی با استفاده از هر دو مدل حداکثر آنتروپی، و دمپستر شفر به نقاط مربوط به ۹۹ گالی و۲۳۲ گالی به صورت مجزا برازش داده شد و پس از انتقال داده‌ها به فایل اکسل داده‌ها در نرم افزار SPSS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. طبق جدول۳ و شکل ۹ که از نقاط واسنجی(۳۰٪) به دست آمده است، هر دو مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که این مسئله نشان دهنده

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

عملکرد بالای هردو مدل در منطقه است. مدل آنتروپی ۹۰/۹ درصد مساحت زیر نمودار دارای بهترین عملکرد برای پهنه‌بندی حساسیت فرسایش گالی می‌باشد (شیرانی ۱۳۹۵).

جدول ۳ نتایج تحلیل ROC در مرحله واسنجی مدل‌ها بر اساس ۷۰ ٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش گالی

مدل	سطح زیر منحنی	انحراف معیار	سطح اطمینان	سطح اطمینان ۹۵ درصد	
				حد پایین	حد بالا
حداکثر آنتروپی	۰/۹۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۰/۸۸۱	۰/۹۳۶
دمپسترشفر	۰/۹۰۸	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۰/۸۸۱	۰/۹۳۴



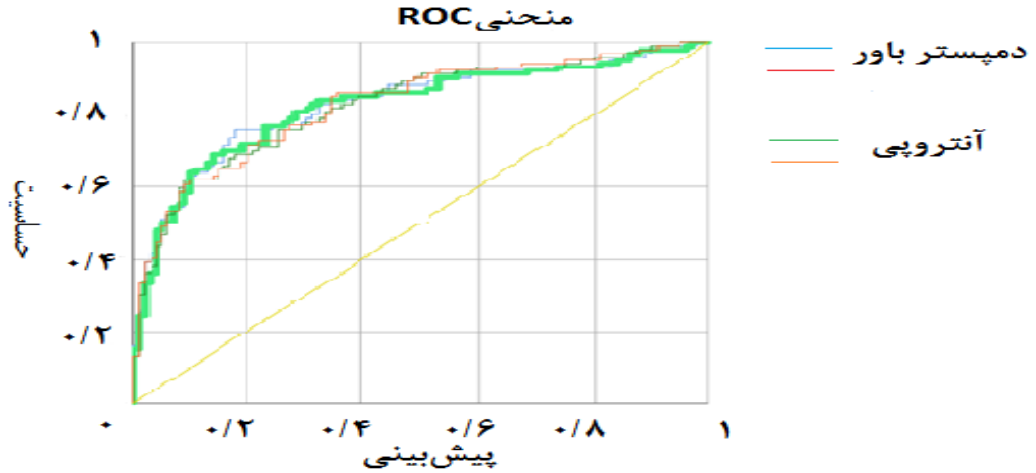
شکل ۹ نمودار منحنی مشخصه عملکرد دو مدل حداکثرآنتروپی و دمپستر-شفر در مرحله واسنجی با استفاده از ۷۰٪ پراکنش رخداد گالی‌ها

نتایج به‌دست آمده از بررسی عملکرد مدل‌ها با استفاده از همان نقاط آموزشی (۷۰٪) در جدول ۴ و شکل ۱۰ ارائه گردید. که در این سنجش نیز دو مدل عملکرد خوبی از خود نشان داده‌اند.

جدول ۴ نتایج تحلیل سطح زیرمنحنی ROC در مرحله پیش بینی بر اساس ۳۰٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش گالی

مدل	سطح زیر منحنی	انحراف معیار	سطح اطمینان	سطح اطمینان ۹۵ درصد	
				حد پایین	حد بالا
حداکثر آنتروپی	۰/۸۲۶	۰/۰۳۰	۰/۰۰۰	۰/۷۶۷	۰/۸۸۵
دمپسترشفر	۰/۸۲۳	۰/۰۳۰	۰/۰۰۰	۰/۷۶۳	۰/۸۸۲

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



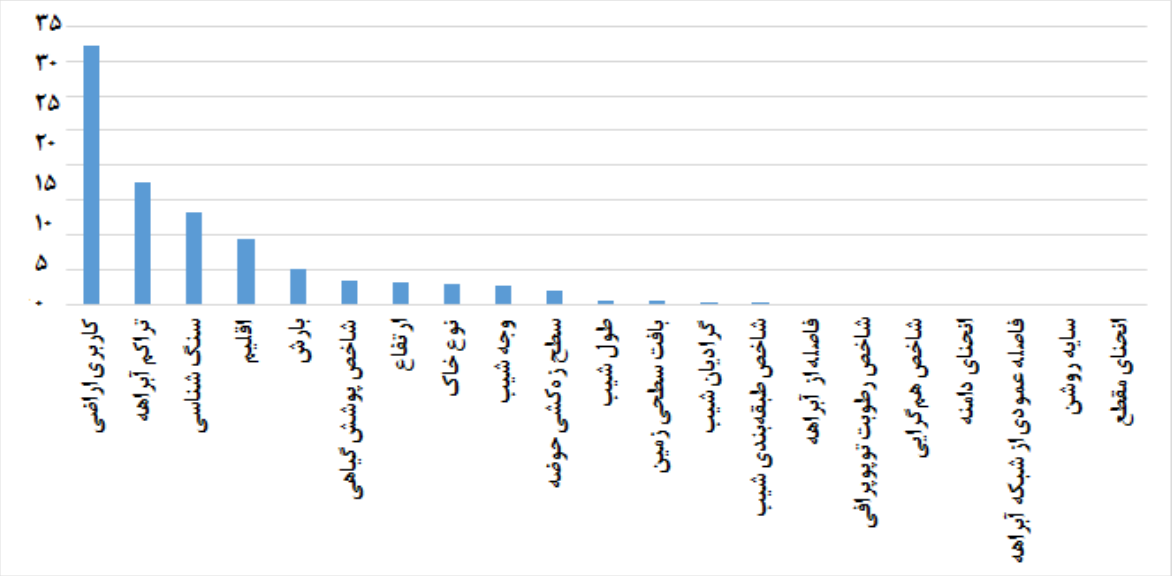
شکل ۱۰ نمودار منحنی مشخصه عملکرد دو مدل حداکثرآنتروپی و دمپستر-شفر در مرحله پیش‌بینی با استفاده از ۳۰٪ پراکنش رخداد گالی‌ها

در این پژوهش مقایسه نتایج روش‌های مختلف اعتبارسنجی شامل ROC، FR و SCAI مورد بررسی نشان داد روش‌های حداکثر آنتروپی، مدل باور یا دمپسترشفر به‌ترتیب بهترین یا مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه میزان سطح زیرمنحنی مشخصه عملکرد دریافت کننده (ROC) هر دو روش در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از مقدار ۰/۷ بالاتر می‌باشد. بنابراین هر دو مدل در این پژوهش عملکرد خوبی از خود نشان داده‌اند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی براساس میزان AUC-ROC چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله پیش‌بینی نشان می‌دهد که مدل حداکثر آنتروپی و دمسترشفر به‌ترتیب با دقت عالی (۰/۹-۱)، بسیار خوب (۰/۸-۰/۹) کارآمد می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مدل حداکثر آنتروپی هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله پیش بینی با دقت کارآمدی بهتر نسبت به مدل دیگر ارزیابی گردید، لذا برای بررسی اهمیت و تعیین مشارکت و همچنین تعیین آستانه های عوامل موثر در رخداد فرسایش گالی از نتایج منحنی پاسخ و آزمون جک نایف که در بسته نرم افزاری مدل حداکثر آنتروپی فراهم شده است استفاده گردید.

نتایج آنالیز حساسیت و اهمیت متغیرها (آزمون جک نایف حاصل از مدل حداکثر آنتروپی)

با بهره‌گیری از آزمون جک نایف هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس اهمیت نسبی و میزان تاثیر یا سهم مشارکت در ایجاد فرسایش گالی اولویت‌بندی شده و نکته قابل توجه آن است که نمودار آزمون جک نایف تاثیر هر یک از شاخص‌ها را بصورت مستقل در پهنه بندی فرسایش گالی نشان می دهد. یعنی نرم افزار به طور مستقل مدل را تنها با در نظر گرفتن شاخص مورد نظر به تنهایی اجرا می‌نماید. در اولویت اول عوامل کاربری اراضی، تراکم آبراهه، سنگ‌شناسی، اقلیم، بارش، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، ارتفاع و نوع خاک با مشارکت مجموعاً نزدیک به ۸۴ درصد و در اولویت دوم به‌ترتیب عوامل وجه شیب و سطح زه‌کشی حوزه آبخیز با مشارکت مجموعاً نزدیک به ۶ درصد دارای سهم در رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. به‌عبارت دیگر بقیه عوامل موثر مورد بررسی (۱۱ عامل دیگر) در مجموع کمتر از ۱۰ درصد سهم مشارکت یا اهمیت نسبی در رخداد فرسایش خندقی حوضه ایلام دارند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]



شکل ۱۱ نموداراستخراج از آزمون جک نایف برای شاخص های مورد استفاده بر اساس مدل حداکثر آنتروپی

نتیجه گیری

نتایج نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش گالی در هر دو مدل دمپسترشیفر و مدل آنتروپی با میانگین ۳۲ درصد از حوضه آبخیز با پهنه‌های حساسیت پذیری فرسایش گالی زیاد و خیلی زیاد نمایان ساخته که بالای ۸۰ درصد رخدادهای گالی در این پهنه‌ها اتفاق افتاده است که این پهنه‌ها با فرسایش زیاد و خیلی زیاد با روندی شرقی – غربی بر موقعیت استقرار شهر ایلام، شهرک صنعتی ششدار ایلام، شهر چوار، صنایع پتروشیمی و پالایشگاه گاز و روستاهای تابع منطبق می باشد. نمودار جک‌نایف عامل کاربری‌اراضی با ۳۳ درصد بالاترین تاثیرگذاری بر فرسایش گالی در منطقه دارد که با روند پهنه‌های زیاد و خیلی‌زیاد ارتباط معنی‌داری بین داده‌های آماری و نقشه‌های بصری را اثبات می‌نماید. به ترتیب شاخص تراکم آبراهه ۱۷درصد، لیتولوژی ۱۳درصد، اقلیم ۱۰درصد، بارش ۵ درصد شاخص پوشش گیاهی ۴ درصد و شاخص ارتفاع ۲ درصد که با جمع کاربری در مجموع ۸۴ درصد می‌باشند، بیشترین تأثیر را در فرسایش خندقی در حوضه آبخیز ایلام داشته‌اند که با تحقیق (یوسفی مبرهن و شیرانی۲۰۲۳) منطبق است. نتایج اعتبار سنجی و کارآمدی مدل ها براساس نقشه پراکنش گالی از ۷۰ درصد گالی ها برای آموزش مدل ها و ۳۰ درصد واسنجی و اعتبارسنجی مدل ها سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم ROC و مساحت سطح زیر نمودار AUC مدل دمپستر شیفر با ضریب تبیین ۰/۹۳۴ و مدل آنتروپی با ضریب تبیین ۰/۹۳۶ هردو مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای هر دو مدل در منطقه است که با تحقیقات (شهبازی و همکاران۲۰۲۲، مددی و همکاران۲۰۲۲ و سعیدیان و همکاران ۲۰۲۳) قابل مقایسه است. نتایج پیشنهادی این پژوهش از لحاظ تحقیقاتی با توجه به اینکه ارتباط تاثیر ۲۱ متغیر مستقل بر یک متغیر تابع ارزیابی شد بعضی از متغیرها که تاثیرگذاری کمتر از یک درصد بر متغیر تابع دارند مثل متغیر انحنای مقطع، سایه روشن، فاصله عمودی از شبکه آبراهه، انحنای دامنه و شاخص هم‌گرایی را می‌توان در تحقیقات مشابه حذف نمود که درکاهش هزینه و زمان اجرای تحقیق تاثیر خواهد داشت. استفاده از دیگر روش‌ها و مدل‌های آماری در پهنه‌بندی فرسایش گالی و مقایسه نتایج آن‌ها پیشنهاد می‌شود. پایش روند توسعه و گسترش گالی‌ها در منطقه مورد مطالعه قبل و بعد از اقدامات اصلاحی و احیایی پوشش گیاهی و عملیات مکانیکی کنترل گالی‌ها پیشنهاد می‌شود. نتایج این پژوهش از لحاظ کاربردی تهیه نقشه رخدادهای گالی در حوضه و نقشه‌های پهنه بندی فرسایش گالی و معرفی عوامل تاثیر گذار بر فرسایش گالی بخصوص

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

عامل کاربری‌اراضی می‌باشد که دستگاه‌های ذیربط می‌توانند تدابیر و برنامه‌ریزی لازم درجهت کنترل فرسایش گـالی و جلوگیری از تخریب اراضی را بکار گیرند.

منابع

Ahmadpour H., Bazrafshan O., Rafiei-Sardooi E., Zamani H., Panagopoulos T. 2021. Gully Erosion Susceptibility Assessment in the Kondoran Watershed Using Machine Learning Algorithms and the Boruta Feature Selection. Sustainability, 13(18): 10110.

Alencar, P.H.L., Simplício, A.A.F., de Araújo, J.C., (2022). Entropy-based Model for Gully Erosion – A combination of probabilistic and deterministic components, Science of The Total Environment, 836(155629), 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155629.

Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Joel B. Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H., Ahmad, B., (2019) Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models, Science of The Total Environment, 655(0048-9697): 684-696, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.235.

Bernini, Alice, Alberto Bosino, Greg A. Botha, and Michael Maerker. 2021. "Evaluation of Gully Erosion Susceptibility Using a Maximum Entropy Model in the Upper Mkhomazi River Basin in South Africa" ISPRS International Journal of Geo-Information 10, no. 11: 729. https://doi.org/10.3390/ijgi10110729.

Castillo C., Gómez J. A. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. Earth-Science Reviews, 160: 300-319. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009

Conforti, Massimo, and Fabio Ietto. 2024. "Testing the Reliability of Maximum Entropy Method for Mapping Gully Erosion Susceptibility in a Stream Catchment of Calabria Region (South Italy)" Applied Sciences 14, no. 1: 240. https://doi.org/10.3390/app14010240.

Dube F., Nhapi I., Murwira A., Gumindoga W., Goldin J., Mashauri D.A. 2014. Potential of weight of evidence modeling for gully erosion hazard assessment im Mbire Distract-Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth 67-69:145-152.

Gayen.A, Pourghasemi.H. R, Saha.S, Keesstra.S, Bai.S. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazardprone areas in India using different machine learning algorithms, Science of the Total Environment, 668:124-138. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436.

Kalehhouie M., Kavian A., Gholami L., Jafarian Z. 2020. Influence of Start Time and Coefficient of Runoff to Application of Organic Mulch under Small Laboratory Plots. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 13(47): 9-17. (In Persian)

Kou M., Jiao J., Yin Q., Wang N., Wang Z., Li Y., Yu W., Wei Y., Yan F., Cao B. 2016. Successional trajectory over 10 years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the hill-gully region of the Loess Plateau. Land Degradation & Development, 27(4): 919-932.

Madadi, A., Asghari Saraskanroud, S., Negahban, S., Marhamat, M. (2022). 'Evaluation of Gully Erosion Sensitivity using Maximum Entropy Model in Shoor River Watershed (Mohr

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]

Township)', Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(3), pp. 123-145. doi: 10.22067/geoeh.2022.76707.1228.

Maerker M., Que´ne´herve.G. Bachofer. F., Mori S. 2015 A simple dem assessment procedure for gully system analysis in the lake manyara area, northern tanzania.79:235–253.

mohamkhan, S., pirani, P., riahi, S., geravand, F. (2020). 'Evaluation of entropy model efficiency in erosion zoning of kand watershed with geomorphologic approach', Geographical Planning of Space, 9(34), pp. 85-98. doi: 10.30488/gps.2019.100315.

Obrien, R. M., 2007. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. Quality & Quantity, 41: 673-690.

Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena, 50(2-4): 91-133.

Saber chenari, K., Bahremand, A., Sheikh, V. B., Komaki, C. B. (2016). 'Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in The Gharnaveh Watershed, Golestan Province', Iranian journal of Ecohydrology, 3(2), pp. 219-231. doi: 10.22059/ije.2016.59663.

Saeediyan, H., shirani, K., salajegheh, A., ahmadi, R. (2023). 'Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid areas', Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment, 2(1), pp. 129-144. doi: 10.22034/nawee.2023.407297.1047

Shahbazi K, Khosrowshahi M, Heshmati M, Ghietury M. 2020. Effects of Geological and Topographical Factors on Determining Gully Erosion Thresholds. Journal of Watershed Management Research, 11 (21): 259-268. (In Persian)

Shahbazi, K., parvizi, Y., Kalehhouei, M. (2022). 'Morphometric factors affecting gully erosion development and its climatic zoning in Kermanshah Province, Iran', Watershed Engineering and Management, 14(4), pp. 528-548. doi: 10.22092/ijwmse.2022.356146.1919.

Vosoghi, S., Zakerinejad, R., entezari, M. (2023). 'Prediction of Gully Erosion and identifying factors affecting it using the Maximum Entropy Model and BCC-CSM2-MR climate change models for the years 2020-2040 (case study: Alamarvdasht watershed)', Journal of Geography and Planning, (), pp. -. doi: 10.22034/gp.2023.57572.3169.

Tadesual, A., Setargie, M., Ebabu, K., Nzioki, B. and Meshesha, T.M., 2023. Random Forest–based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. Geomorphology, 431, p.108671. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108671.

Teimurian, T., Nazari Samani, A., Feiznia, S., Ahmadaali, K., Soleimanpour, S. M. (2022). 'Determining the Spatial Distribution of Gully Erosion Probability Using the MaxEnt Model', Watershed Management Research Journal, 35(2), pp. 2-15. doi: 10.22092/wmrj.2021.354647.1415.

Yousefi Mobarhan E, Shirani K. (2023). Assessment of Maximum Entropy (ME) to identify Effective Factors on Gully Erosion and Determination of Sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed. *J Watershed Manage Res*. *14*(28), 37-54. Doi: 10.61186/jwmr.14.28.37

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.8.0]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.137]