ارزیابی حساسیت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در قطعهٔ ۵ راه آهن اردبیل – میانه با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و منطق فازی

بختیار فیضی‌زاده*؛
دانشگاه تبریز، گروه سنجش از دور و GIS
میثم سطانی؛
دانشگاه آزاد اسلامی واحد ممقان، گروه GIS

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۶/۱۲ پذیرش ۹۷/۱۱/۱۳

چکیده

هدف اصلی این تحقیق، تولید نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش برای محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل ـ میانه و تأثیر آن بر شریان‌های حیاتی و ثانیاً تجزیه و تحلیل مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در افزایش خطر زمین‌لغزش است. در این پژوهش از سه روش منطق فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) استفاده شده است. روش‌های مذکور از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور ارزیابی علمی نواحی مستعد زمین‌لغزش در محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل ـ میانه است. برای انجام تحقیق معیارهای اصلی در قالب لایه‌های اطلاعاتی شناسایی شده و برای تلفیق استفاده شدند. سپس برای تعیین میزان استعداد محدودهٔ بررسی شده نسبت به رخداد زمین‌لغزش براساس روش منطق فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و سلسله مراتبی فازی (F-AHP) اقدام به پهنه‌بندی شده است. نهایتاً، عملکرد روش‌های مختلف در تولید نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از شاخص‌های صحت‌سنجی "جمع مطلوبیت "، "درصد منطقه بحرانی" و منحنی مشخصه عملکرد سیستم با یک‌دیگر مقایسه شد تا روش مطلوب و کاربردی برای محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل ـ میانه به‌منظور مدیریت خطر زمین لغزش تعیین شود. در نهایت با تلفیق داده‌ای متناسب با وزن‌های استخراج شده، نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش اقدام شد. نتایج تحقیق حاضر در شناسایی نسبت محاطرات محیطی و آسیب‌پذیری این محور

*نویسنده مسئول Feizizadeh@tabrizu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

تبادلاتی نقش مهمی داشته و می‌تواند راهگشای برنامه ریزان و تصمیم‌گیران برای کاهش نسبت خسارات و مدیریت بحران استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی زمین‌لغزش، منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر،

مقدمه

زمین لغزش از جمله پدیده‌های طبیعی است که عمدتاً در مناطق کوهستانی اتفاق افتاده و خسارات متعددی را خصوصا بر شبکه های ارتباطی اعمال می‌کند. در این زمینه ایران با داشتن محدوده‌های وسیع کوهستانی از آسیب‌پذیرترین کشورها در سطح جهان از نظر زمین‌لغزش محسوب می‌شود. به‌طورکلی به‌دلیل مساعد بودن شرایط زمین‌شناسی، جغرافیایی و فقدان مدیریت جامع محیط و رعایت نشدن آستانه‌های محیطی، ایران به‌عنوان کشوری پر خطر به‌شمار می‌آید و به‌دلیل تعدد، تنوع، تکرار و شدت وقوع خطرات طبیعی و ناآرامی محیط، ایران در ردیف ۱۰ کشور حادثه‌خیز جهان قرار گرفته است [۱]. با توجه به خسارات ناشی از بروز زمین‌لغزش، نیاز به جلوگیری از این پدیده حس می‌شود. این امر لزوم پهنه‌بندی حساسیت و شناخت هر چه بیش‌تر حرکت‌های توده‌ای را ایجاب می‌کند، تا با شناسایی مناطق با پتاسیل بالا، اعمال مدیریت کرده و سبب کاهش خطرات آن‌ها شود [۲]. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، یک مفهوم کلی برای تقسیم‌بندی زمین به چند منطقه همگن و هموژن و طبقه‌بندی این مناطق بر حسب درجه حساسیت واقعی یا بالقوه ناشی از لغزش لایه‌های زمین است. شناسایی و طبقه‌بندی نواحی مستعد لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به‌شمار رفته و نقش غیرقابل انکاری را در مدیریت حوزه‌های آبخیز ایفا می‌کند [۳]. تهیهٔ نقشه پهنه‌بندی لغزش این امکان را فراهم می‌سازد که مناطق آسیب‌پذیر شناسایی و در برنامه‌های محیطی مدنظر قرار گیرند. در بسیاری از پروژه‌های مهندسی برای انتخاب محل ساختگاه، نیاز به‌روش‌های ساده و کم هزینه‌ای برای برآورد اولیه پایداری دامنه‌ها است. در این موارد می‌توان از روش‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده کرد [٤].

ارزیابی ناپایداری‌های دامنه‌ای مانند بسیاری از موضوعات زمین‌شناسی محیطی یکی از پیچیده‌ترین مسائل به‌دلیل تنوع عوامل مؤثر در وقوع این پدیده است. وجود عدم قطعیت‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

ناشی از گنگ بودن، ناکامل بودن و مبهم بودن شرایط و مفاهیم مرتبط با پارامترهایی نظیر زمین‌شناسی، هیدرولوژی، تکتونیک، پوشش گیاهی، بارندگی، فرسایش، نوسانات درجه حرارت، تأثیر یخبندان و غیره، در بروز ناپایداری دامنه‌ای، لزوم استفاده از روش‌های دقیق و مناسب در بررسی ناپایداری‌های دامنه‌ای را منطقی می‌کند. این درحالی است که بسیاری از اطلاعات بالا به‌صورت محاوره‌ای بوده است و از نوع اطلاعات غیردقیق است. این‌گونه محدودیت‌ها ایده اساسی تئوری فازی است [۵]. از جمله مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با زمین‌لغزش‌ها می‌توان به پژوهش‌های پاچوری و مانوچ پانت (۱۹۹۲) [٦]، نیگاراجان (۲۰۰۰) [۷]، لی و مین (۲۰۰۲) [۸]، کین و همکاران (۲۰۰۲) [۹]، ژو و همکاران (۲۰۰۲) [۱۰]، آیالو و یاماگاشی (۲۰۰۵) [۱۱]، پرادهان و لی (۲۰۱۰) [۱۲]، بانشتو و پراکاش (۲۰۱٤) [۱۳]، هی و همکاران (۲۰۱٤) [۱٤]، دانشور (۲۰۱٤) [۱۵]، احمد (۲۰۱۵) [۱٦]، لئوناردی و همکاران (۲۰۱٦) [۱۷]، هانگ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۸]، فیضی‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) [۱۹]، قشلاقی و فیضی‌زاده (۲۰۱۷) [۲۰]، مندال و ماندال (۲۰۱۸) [۲۱] و فاطمی عقدا و همکاران (۲۰۱۸) [۲۲] اشاره کرد. ب بهره‌گیری از نتایج تحقیقات محققین قبلی، هدف اساسی در این تحقیق استفاده تلفیقی از سیستم‌های تصمیم‌گیری مکانی GIS برای بررسی نسبت آسیب‌پذیری محور راه آهن اردبیل–میانه از مخاطره زمین لغزش است.

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

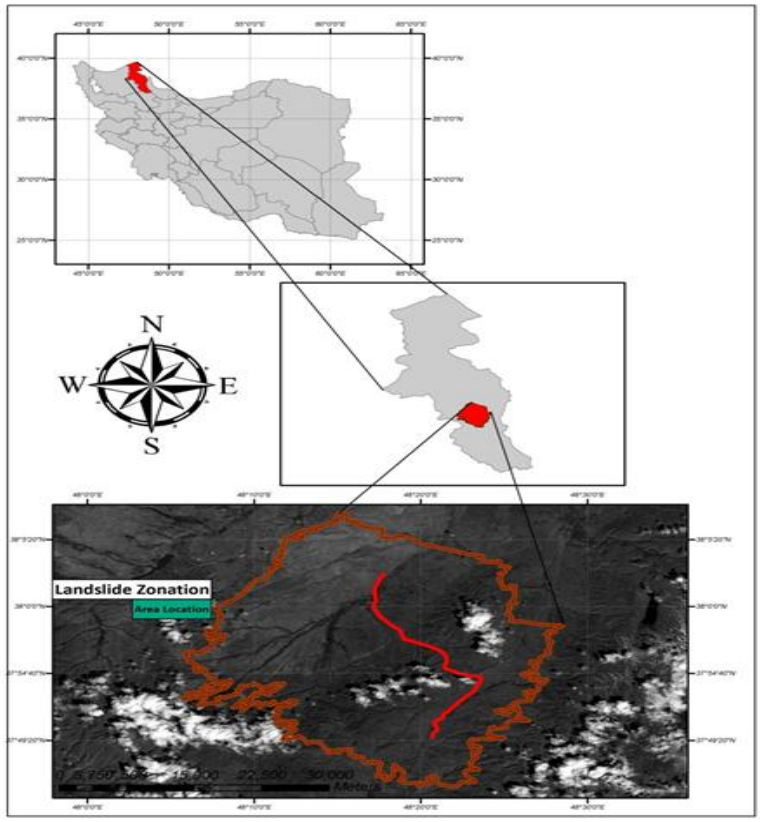
موقعیت جغرافیایی و پتانسیل لغزش خیزی محدودهٔ بررسی شده

راه آهن پارس آباد–اردبیل– میانه در استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی قرار گرفته و قطعه ۵ آن در استان اردبیل واقع شده است. قطعه ۵ راه آهن اردبیل– میانه به طول حدود ۳۰ کیلومتر در جنوب شهرستان اردبیل قرار می‌گیرد. در شکل ۱ موقعیت محدودهٔ بررسی شده مشخص شده است. کیلومتر صفر مسیر از نزدیک آبادی میهمان دوست شروع می‌شود. پس از عبور از نزدیک آبادی‌های پوستجین–تاجی بیوک و جعفرلو به جاده اردبیل–خلخال می‌رسد و در کیلومتر ۳۰ واقع در شرق جاده اردبیل– خلخال به اتمام می‌رسد. طبق آمار سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، استان اردبیل جزو مناطق پر خطر از لحاظ وقوع زمین‌لغزش است. راه‌آهن پارس‌آباد–اردبیل– میانه در استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی قرار گرفته

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

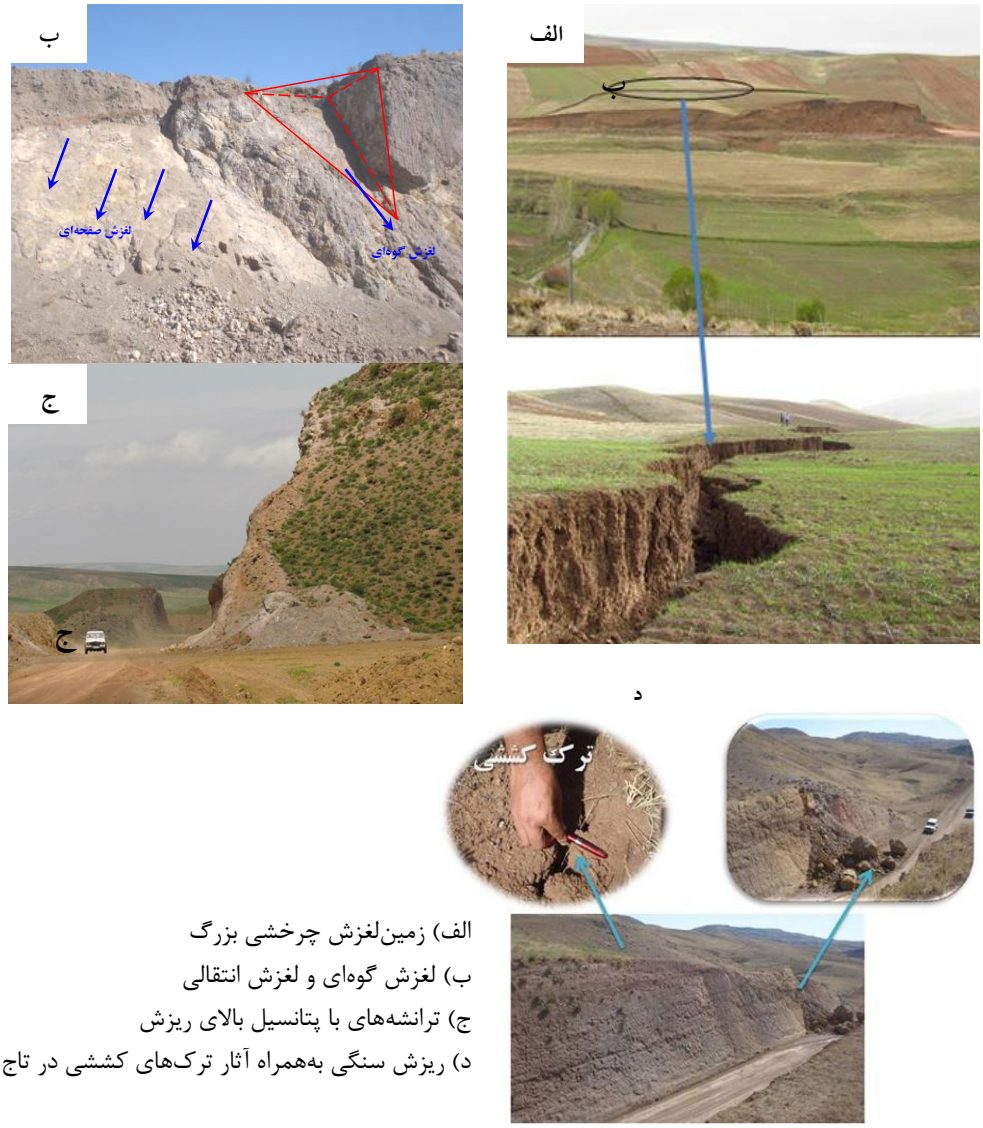
است و قطعه پنج از این مسیر به طول حدوداً ۳۰ کیلومتر در جنوب شهرستان اردبیل قرار دارد. شرایط زمین‌شناسی و مورفولوژیکی خاص مانند تغییرات زیاد در لیتولوژی و پستی و بلندی‌های محدوده، هم‌چنین شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه که از جمله آن می‌توان به بارندگی و تغییرات دمایی اشاره کرد و نهایتاً احداث خط آهن اردبیل-میانه به‌عنوان عامل تشدیدکننده زمین‌لغزش، از ضروریات پرداختن به محدوده مذکور محسوب می‌شوند [۲۳]. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در قطعه ۵ راه‌آهن اردبیل-میانه در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که تعداد نقاط لغزشی (نقطه‌ای، منفرد و پهنه‌ای) رخداده در محدودهٔ بررسی شده ۳۲۱ عدد است. نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های نقطه‌ای، منفرد و پهنه‌ای رخداده در قطعه ۵ راه‌آهن میانه-اردبیل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه آهن اردبیل-میانه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

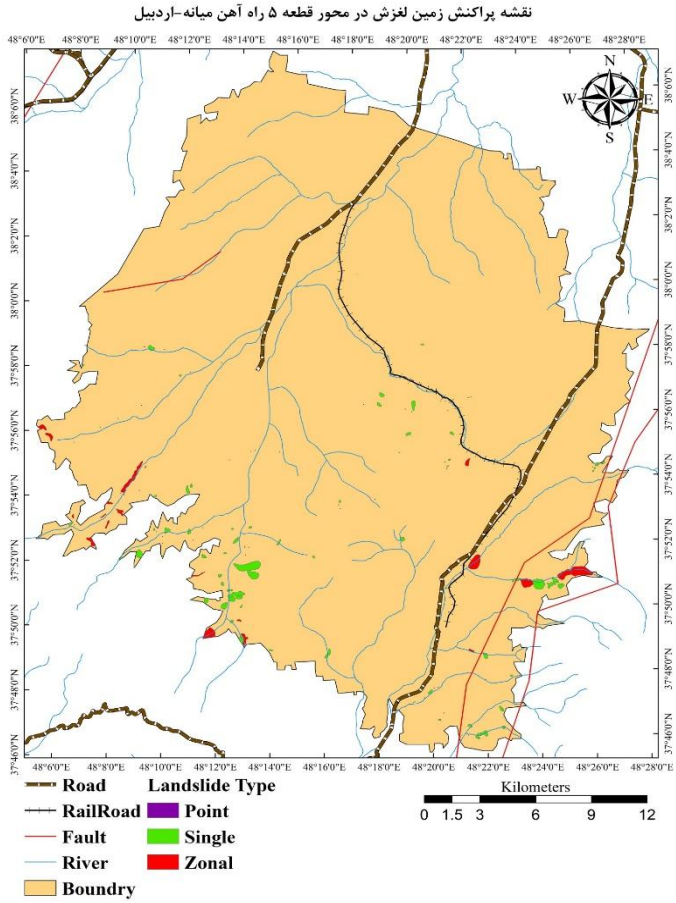
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



الف) زمین‌لغزش چرخشی بزرگ
ب) لغزش گوه‌ای و لغزش انتقالی
ج) ترانشه‌های با پتانسیل بالای ریزش
د) ریزش سنگی به‌همراه آثار ترک‌های کششی در تاج تراشه

شکل ۲. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخداده در قطعه ۵ راه‌آهن اردبیل- میانه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



شکل ۳. نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های نقطه‌ای، منفرد و پهنه‌ای رخداده در قطعه ۵ راه‌آهن اردبیل-میانه

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا با استفاده از نقشه‌های موجود، تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، گزارش‌های مربوط به زمین‌لغزش‌های رخ داده، نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری و ۱:۵۰۰۰۰، ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و هم‌چنین بازدیدهای صحرایی، زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده شناسایی و در قالب نقشه تهیه شد. براساس مرور ادبیات فنی و پژوهش‌های گذشته انجام شده در زمینهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مهم‌ترین و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

متداول‌ترین پارامترهای به‌کارگرفته شده در این زمینه تعیین و سپس، هرکدام از عوامل مؤثر در افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر شرایط منطقهٔ بررسی شده مشخص شده‌اند. برای این منظور معیارهای سنجش شامل رده مقاومتی زمین، زاویهٔ شیب، رطوبت، پوشش گیاهی، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و نهایتاً فاصله از مسیرهای ارتباطی (جاده و راه‌آهن) تعیین شدند. داده‌های مربوط به پارامترهای فاصله از جاده و رودخانه از نقشهٔ توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری گرفته شده است. داده‌های مربوط به پارامتر از گسل از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (تدقیق شده طی عملیات صحرایی انجام شده در محدودهٔ بررسی شده) سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور گرفته شده است. پارامترهای فاصله از جاده، رودخانه و گسل با استفاده از ماژول Euclidian Distance در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده است. در بارهٔ دادهای توپوگرافی، نسبت به استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده از نقشه‌ای توپوگرافی اقدام شده و جهت و زاویه شیب از آن مدل استخراج شدند. رده مقاومتی زمین در ارتباط با رتبه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی با توجه به حساسیت‌شان به رخداد زمین‌لغزش است. برای تهیه این لایه اطلاعاتی از نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل استفاده شده است و سپس نقشهٔ مذکور با استفاده از عملیات صحرایی و عکس‌های هوایی، تدقیق شده است. برای هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی در محدودهٔ بررسی شده، مقداری را به‌عنوان ردهٔ مقاومتی زمین در بازهٔ ۱ تا ۵ با دقت ۰٫۵ تعیین شده است به‌طوری‌که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهندهٔ شرایط ضعیف‌تر و حساس‌تر زمین نسبت به رخداد زمین‌لغزش است [۲٤].

رطوبت زمین نشان‌دهندهٔ اطلاعات موجود در مورد رخداد انواع مختلف زمین لغزش‌ها با توجه به محتوای رطوبتی خاک یا عمق سطح ایستابی است. لایه داده مکانی معرف میزان رطوبت در منطقهٔ بررسی شده برحسب درصد، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و شاخص تفاضل نرمال‌شده رطوبت[1] تهیه شده است. این شاخص [۱] ، [۲٤]، [۲۵]، [۲٦] برای محدودهٔ بررسی شده با استفاده از باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک[2]) و باند ۵ (باند مادون قرمز میانی[3]) و رابطهٔ (۱) در محیط نرم‌افزار ژئومتیکا تهیه شده است.

1. Normalized Difference Moisture Index
2near-infrared (NIR)
3short wave length infrared (SWIR)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

$$NDMI = \frac{NIR(4) - SWIR(5)}{NIR(4) + SWIR(5)} \quad (۱)$$

پارامتر پوشش گیاهی برای محدودهٔ بررسی شده با استفاده از باند ۳ (باند قرمز[1]) و باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک[2]) و رابطهٔ (۲) در محیط نرم‌افزار ژئومتیکا تهیه شده است [۲۷].

$$NDVI = \frac{NIR(4) - RED(3)}{NIR(4) + RED(3)} \quad (۲)$$

در این پژوهش از سه روش منطق فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) استفاده شده است. روش‌های مذکور از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر ArcGIS به‌منظور ارزیابی علمی نواحی مستعد زمین‌لغزش در محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل – میانه است و برای نیل به این هدف از نرم‌افزارهای ArcGIS و IDIRISI استفاده شده است. هم‌چنین روش‌های مثلث سلسله مراتبی فولر و سلسله مراتبی فازی (F-AHP) از طریق کد/ فرمول نویسی در محیط نرم‌افزار اکسل اجرا شده است. سپس، برای تعیین میزان استعداد محدودهٔ بررسی شده نسبت به رخداد زمین‌لغزش براساس روش منطق فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) اقدام به پهنه‌بندی شده است. نهایتاً، عملکرد روش‌های مختلف در تولید نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از شاخص‌های صحت سنجی ضریب تراکم، جمع مطلوبیت، درصد منطقه بحرانی و منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) با یک‌دیگر مقایسه می‌شود تا روش مطلوب و کاربردی برای محدوده قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل ـ میانه به‌منظور مدیریت خطر زمین‌لغزش تعیین شود. شایان ذکر است از ۷۰٪ زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ بررسی شده برای وزن‌دهی و از ۳۰٪ مابقی برای صحت‌سنجی استفاده شده است.

ارزیابی حساسیت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه آهن اردبیل- میانه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[3] یک شیوه تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به‌وسیلهٔ ساعتی و ورگاس در سال ۱۹۹۱ برای تجزیه و تحلیل اطلاعات مدیریتی و صنعتی پیشنهاد شد [۲۸]. امروزه این روش کاربرد گسترده‌ای در همهٔزمینه‌ها از جمله مباحث زمین‌شناسی

1. Red light (RED)
2. near-infrared (NIR)
3. Analytical Hierarchy Process (AHP)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

پیدا کرده است. به‌عنوان مثال، شیرمرد و همکاران (۱۳۹٤) [۲۹] از آن برای تعیین نقاط بهینه حفاری در کانسار مس پورفیری نیسیان استفاده کردند. مرادی و همکاران (۲۰۱۲) [۳۰] این روش را برای تهیهٔ نقشهٔ خطر زمین‌لغزش در منطقه دنا به‌کارگرفتند. موندال و مایتی (۲۰۱۳) [۳۱] روش تحلیل سلسه مراتبی را برای ارزیابی زمین‌لغزش خیزی حوضهٔ آبریز شی‌کولا در ارتفاعات هیمیالایا استفاده کردند. برای استفاده از این روش تجزیه و تحلیل، ابتدا ساختار برنامه بر مبنای هدف تعیین شده ترسیم می‌شود. سپس معبارهای ارزیابی شده معرفی می‌شود و گزینه‌ها انتخاب می‌شوند. یکی از اهداف این تحقیق ارزیابی حساسیت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه آهن اردبیل–میانه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی بوده است. الگوی ساختاری تعریف شده برای این روش به‌صورت خلاصه بدین‌شرح است [۳۲]:

- انتخاب معیارها و تعیین گزینه‌های تأثیرگذاری در قالب وزن دهی (تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها و وزن دادن به جای‌گزین‌ها برای ترسیم ساختار، لازم است هدف، معیارها و گزینه‌ها مشخص شوند).
- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها در ارتباط با معیارهای تعریف شده.
- مقایسهٔ زوجی معیارهای و تعیین نسبت اهمیت هریک از با لحاظ نسبت سازگاری.
- تحلیل نتایج، تعیین وزن نهایی هرکدام از گزینه‌ها و تعیین اولویت هر یک از آن‌ها.
- تهیهٔ ماتریس وزندهی معیارها با ضریب سازگاری قابل قبول (جدول ۲).
- استفاده از توابع تلفیق و تهیه نقشه‌های خروجی.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

جدول ۱. ماتریس مقایسهٔ زوجی عوامل تأثیرگذار برمبنای اعداد واقعی

	پوشش گیاهی	جهت شیب	فاصله از رودخانه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	رطوبت	زاویه شیب	زمین شناسی
پوشش گیاهی	۱	۰,۵	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۲	۰,۱۷	۰,۱٤	۰,۱۳
جهت شیب	۲	۱	۰,۵	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۲	۰,۱۷	۰,۱٤
فاصله از رودخانه	۳	۲	۱	۰,۵	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۲	۰,۱۷
فاصله از جاده	٤	۳	۲	۱	۰,۵	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۲
فاصله از گسل	۵	٤	۳	۲	۱	۰,۵	۰,۳۳	۰,۲۵
رطوبت	٦	۵	٤	۳	۲	۱	۰,۵	۰,۳۳
زاویه شیب	۷	٦	۵	٤	۳	۲	۱	۰,۵
زمین شناسی	۸	۷	٦	۵	٤	۳	۲	۱

جدول ۲. ضراب وزنی عوامل تأثیرگذار برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی

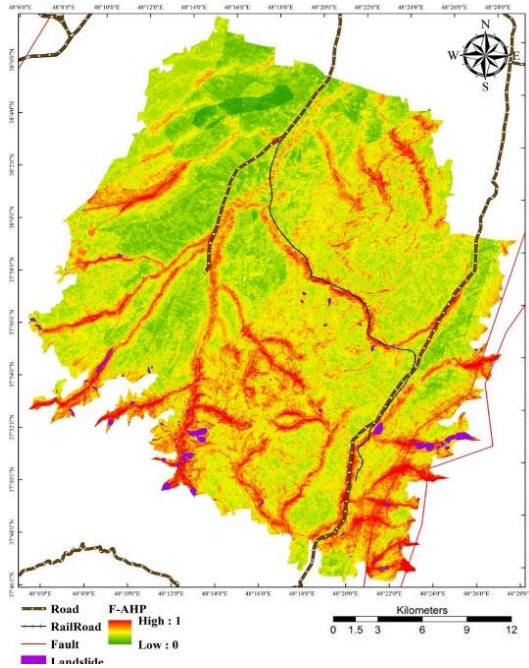
ضریب W	ضریب وزنی	رتبه
پوشش گیاهی	۰,۰۰۰٦۲	۸
جهت شیب	۰,۰۷۸۵۸	۷
فاصله از رودخانه	۰,۱۰۱۲۰	٦
فاصله از جاده	۰,۱۲۳۱۰	۵
فاصله از گسل	۰,۱٤۳٦۳	٤
رطوبت	۰,۱٦۲۵۳	۳
زاویه شیب	۰,۱۹۵۱۷	۱
زمین شناسی	۰,۱۹۵۱۷	۱
مجموع وزن کل	۱,۰۰	

حال که ضریب هر پارامتر با توجه به میزان اهمیت به‌دست آمد طبق جدول پهنه‌بندی (جدول ۲) عمل کرده و پارامترها را در ضرایب مربوطه ضرب شده و در نهایت لایه‌ها باهم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

تلفیق می‌شوند تا نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل به‌دست آید (شکل ٤). همهٔ قسمت‌های محدودهٔ بررسی شده که مشرف به راه‌های ارتباطی، رودخانه‌ها، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناختی با مقاومت کم‌تر است، رخداد زمین‌لغزش درجهٔ حساسیت زیاد تا خیلی‌زیاد دارد و کم‌ترین درجهٔ حساسیت مربوط به مناطق با زاویهٔ شیب کم، مناطق نسبتاً مسطح و مناطق متشکل از سازندهای با مقاومت بیش‌تر است. هم‌چنین همهٔ مسیر قطعه پنج راه‌آهن اردبیل– میانه دارای درجهٔ حساسیت زیاد تا خیلی‌زیاد است. شایان ذکر است، به نظر می‌رسد نقشه خطر زمین‌لغزش حاصل از تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) مطابقت و هم‌خوانی خیلی‌خوبی با پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده دارد. اکثر زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ بررسی شده روی مناطق با بیش‌ترین درجهٔ حساسیت منطبق شده‌اند که این امر بیان‌گر دقت بیش‌تر و عملکرد خیلی مناسب این روش در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های محدودهٔ قطعهٔ پنج راه‌آهن میانه–اردبیل است.



شکل ٤. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل FAHP

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

ارزیابی حساسیت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه آهن اردبیل- میانه با استفاده از مثلث سلسله مراتبی فولر

مثلث فولر یکی از مدل‌های وزن‌دهی به شاخص‌ها است. این روش بر جدول فولر که برای مقایسه‌های دو به‌دو به‌کار می‌رود، استوار است [۳۳]، [۳٤]، [۳۵]، [۳٦]، [۳۷]، [۳۸]. بدین‌ترتیب که ابتدا جدولی تهیه می‌شود که معیارها در سطرها و ستون های آن قرار می‌گیرند. با توجه به مراحل بالا فرآیند مثلث سلسله مراتبی فولر بدین‌شرح است:

- **اولویت‌بندی معیارها و زیر معیارها:** در این مرحله بعد از این‌که پژوهش‌گر معیارهای پژوهش خود را به‌دست آورد، باید آنها را از طریق پرسش‌نامه یا حضوری با کارشناسان مربوط درمیان بگذارد، که با توجه به اهمیت هر معیار آنها را رتبه‌بندی کنند. هم‌چنین اگر معیارهای مربوط از زیرمعیار جداگانه‌ای تشکیل شده باشند نیز باید به‌صورت بالا بر اساس اهمیت هر زیرمعیار در گروه خودش رتبه‌گذاری شود.. برای مثال اگر تعداد معیارهای اصلی ۵ مورد بود باید بر اساس اهمیت معیارها کارشناسان رتبه ۱ تا ۵ را برای معیارها انتخاب کنند. درمورد زیر معیارها نیز باید چنین کاری را انجام داد.
- **مرحلهٔ دوم یا مقایسه‌های زوجی:** در این مرحلهٔ پژوهش‌گر باید بین معیار ها مقایسه‌های زوجی انجام داده و سپس به‌طور واضح مابین دو معیار یکی را با توجه به مرحلهٔ قبل که دارای اهمیت بیش‌تر است را انتخاب کند. در این مرحله هر جفت از معیارها تنها باید یک‌بار با هم مقایسه شوند و نه بیش‌تر. این انتخاب را می‌توان با کشیدن یک دایره یا علامت خاصی مشخص کرد.
- **مرحلهٔ سوم یا شمارش تکرار هر معیار:** در این مرحله تعداد تکرار هر معیار را که در مرحلهٔ قبل با علامت خاصی مشخص شده، یاداشت می‌شود.
- **مرحلهٔ چهارم یا رتبه‌بندی معیارها بر اساس تعداد تکرار:** در این مرحله بر اساس تعداد تکرار هر معیار به آن معیار نمره‌ای خاص تعلق می‌گیرد به این صورت که به کم‌ترین تکرار عدد ۱ را می دهیم و به‌ترتیب، نسبت به دفعات تکرار هر معیار، عدد ۲،۳،٤،۵ و غیره، را تا آخرین تکرار نمره‌گذاری می‌شود. اگر در این مرحله تعداد تکرار بعضی از معیارها برابر بود باید وزن یک‌سانی به این معیارها تعلق گیرد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

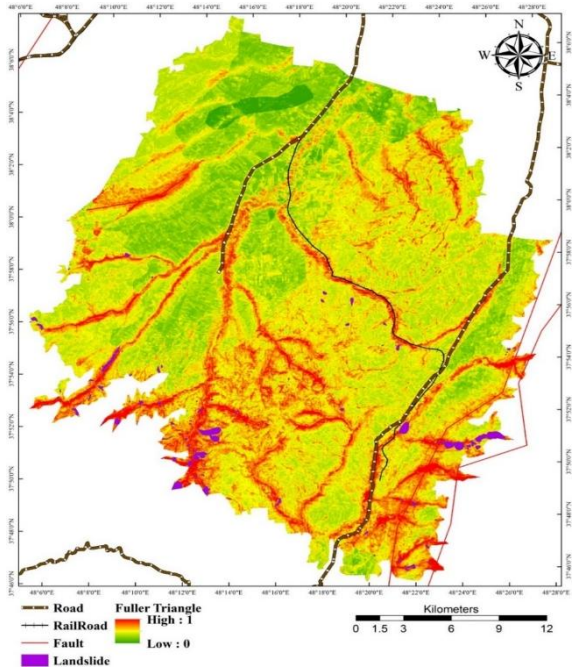
- **مرحلهٔ پنجم یا وزن دهی:** در این مرحله جمع نمرات تمام معیارها را حساب کرده و نمره هر معیار را به جمع کل تقسیم کرده تا وزن هر معیار به‌دست آید. که این وزن عددی بین صفر تا یک خواهد بود. برای وزن زیر معیارها نیز مراحل قبل تکرار می‌شود تا وزن هر زیر معیار نیز مشخص شود.
- **مرحلهٔ ششم یا وزن نهایی**: در این مرحله وزن هر زیر معیار را باید با وزن معیار اصلی در گروه خودش ضرب کرده تا وزن نهایی هر زیر معیار به‌دست آید. حال که ضریب هر معیار و زیرمعیارها با توجه به میزان اهمیت‌شان به‌دست آمد طبق جدول پهنه‌بندی عمل کرده و معیارها و زیرمعیارها را در ضرایب مربوط ضرب شده و در نهایت لایه‌ها را روی هم انداخته می‌شوند تا نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در قطعه ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل به‌دست آید (شکل ۵).

ارزیابی حساسیت و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعه ۵ راه آهن اردبیل- میانه با استفاده از منطق فازی

با توجه به کاربرد وسیع تابع عضویت سیگموئیدال نسبت به دیگر توابع در مجموعه‌های تئوری فازی، در این پژوهش نیز برای فازی‌سازی عواملی که دارای محدودیت فاصله‌ای هستند از تابع عضویت سیگموئیدال در محیط نرم‌افزار ایدریسی استفاده شده است. از بین ۸ عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل، ۳ عامل بر اساس میزان فاصله از آنها بررسی شد، این ۳ مورد عبارتند از: فاصله از رودخانه، فاصله از جاده و فاصله از گسل. حدود آستانه تعریف شده برای هر کدام از این عوامل در جدول ۳ ذکر شده است. شایان ذکر است، حدود آستانه تعریف شده برای هر کدام از پارامترهای فاصله‌ای براساس مایلز و کیفر (۲۰۰۷) [۳۹] است. چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، شکل تابع عضویت برای هر ۳ لایه اطلاعاتی فاصله‌ای، کاهشی یک‌نواخت است و بدین‌علت است که در لایه‌های اطلاعاتی فاصله‌ای با افزایش فاصله از عارضه خطی مورد نظر، میزان حساسیت رخداد زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. در این لایه های اطلاعاتی برای فاصله‌های خطی کم‌تر از مقدار عددی نقطه کنترلی C، ارزش یک و برای فاصله‌های خطی بیش‌تر از مقدار عددی نقطه کنترلی D، ارزش صفر و برای فواصل خطی مابین مقادیر عددی نقطهٔ کنترلی C و نقطه کنترلی D، ارزش بین یک تا صفر اختصاص یافته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



شکل ۵. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعه ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از مثلث سلسله مراتبی فولر

جدول ۳. حدود آستانه پارامترهای فاصله‌ای

پارامتر مؤثر	حد آستانه		نوع تابع عضویت	شکل تابع عضویت
	نقطه کنترلی D	نقطه کنترلی C		
فاصله از رودخانه	m۵۰۰	m۲۰۰	سیگموئیدال	کاهشی یکنواخت
فاصله از جاده	m۱۵۰	m۵۰	سیگموئیدال	کاهشی یکنواخت
فاصله از گسل	m۱۵۰۰	m۵۰۰	سیگموئیدال	کاهشی یکنواخت

هم‌چنین برای لایه‌های اطلاعاتی که به‌صورت پهنه‌ای بررسی می‌شوند، نحوهٔ کار بدین‌صورت است که ابتدا با استفاده از اپراتورهای مربوط در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS و ژئومتیکا لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر از روی نقشه‌های اولیه تهیه می‌شوند. در قدم بعدی، برای فازی سازی لایه های اطلاعاتی پهنه‌ای با توجه به منابع اطلاعاتی مختلف از جمله مایلز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

و کیفر (۲۰۰۷) [۳۹]، از تابع عضویت خطی در محیط نرم‌افزار Idrisi استفاده شده است. از بین ۸ عامل مؤثر در **وقوع** زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل، ۵ عامل به‌صورت پهنه‌ای بررسی شده است، این ۵ مورد عبارتند از: جهت شیب، زاویهٔ شیب، رده مقاومتی زمین، رطوبت، و پوشش گیاهی. حدود آستانه تعریف شده برای هر کدام از این عوامل در جدول ٤ ذکر شده است. چنان‌که در جدول ٤ مشاهده می‌شود، شکل تابع عضویت برای همه لایه‌های اطلاعاتی پهنه‌ای بجز پوشش گیاهی افزایشی یک‌نواخت است و بدین‌علت است که در لایه‌های اطلاعاتی پهنه‌ای با افزایش مقادیر عددی مربوط، میزان حساسیت رخداد زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. در این لایه‌های اطلاعاتی برای مقادیر عددی کم‌تر از نقطهٔ کنترلی A، ارزش صفر و برای مقادیر عددی بیش‌تر از نقطهٔ کنترلی B، ارزش یک و برای مقادیر عددی مابین نقطه کنترلی A و نقطه کنترلی B، ارزش بین صفر تا یک اختصاص یافته است. شایان ذکر است، برای افزایش دقت کار همه لایه‌های اطلاعاتی با پیکسل سایز 25m×25m تهیه شده‌اند. پس از پهنه‌بندی منطقه به تفکیک هرکدام از معیارها، برای روی‌هم گذاری لایه‌های اطلاعاتی فازی‌سازی شده و به‌دست آوردن خروجی، مجموعه عملگرهای اشتراک فازی (AND)، اجتماع فازی (OR)، جمع جبری فازی (SUM)، ضرب جبری فازی (PRODUCT) و مقادیر مختلف گامای فازی (۰/۹۵، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳) استفاده شدند که در نهایت با اعمال این عملگرها مقدار درجهٔ عضویت برای هر پیکسل از نقشه نهایی آسیب‌پذیری خطر زمین‌لغزش به‌دست آمده است.

جدول ٤. حدود آستانه پارامترهای پهنه‌ای

پارامتر مؤثر	حد آستانه		نوع تابع عضویت	شکل تابع عضویت
	نقطه کنترلی A	نقطه کنترلی B		
زاویه شیب	۵	٤۵	خطی	افزایشی یک‌نواخت
جهت شیب	۰– (۱–)	۰–٤۵، ۳۱۵–۳٦۰	خطی	افزایشی یک‌نواخت
رده مقاومتی زمین	۱	۵	خطی	افزایشی یک‌نواخت
رطوبت	۱۵	۷۵	خطی	افزایشی یک‌نواخت
پوشش گیاهی	۸۰	۲۰	خطی	کاهشی یک‌نواخت

اپراتور فازی AND، عملگر اشتراک مجموعه‌ها است. بدین‌صورت که حداقل درجه عضویت اعضا را استخراج می‌کند، یعنی در بین همهٔ لایه‌های اطلاعاتی حداقل ارزش (وزن)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

هر پیکسل را استخراج کرده و در نقشهٔ نهایی منظور می‌کند. با تلفیق لایه‌ها با استفاده از عملگر اشتراک فازی، برای کل بخش‌های محدودهٔ بررسی شده کم‌ترین درجهٔ حساسیت (مقدار صفر) اختصاص یافت. بنابرین نقشه حاصل از این عملگر در این پژوهش آورده نشده است.

عملگر فازی OR، در یک موقعیت مشخص موجود در فاکتورهای مختلف، حداکثر درجهٔ عضویت واحدهای مکانی را استخراج کرده و در نقشهٔ نهایی منظور می‌کند. به‌عبارت دیگر، با استفاده از این اپراتور، مقدار عضویت ترکیب شده در یک موقعیت به‌وسیلهٔ مناسب‌ترین نقشه‌های فاکتور محدود می‌شود. در جاهایی که شاخص‌های روی‌هم گذاری کمیاب بوده است و وجود فاکتورهای مثبت برای اظهار مطلوبیت کافی باشد، این عملگر به‌کار می‌رود. بر اساس این اپراتور (شکل ٦)، اکثر قسمت‌های محدودهٔ بررسی شده که مشرف به راه‌های ارتباطی، رودخانه‌ها، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناختی با مقاومت کم‌تر است، دارای درجه خطر رخداد زمین‌لغزش زیاد تا خیلی زیاد است و کم‌ترین درجهٔ خطر مربوط به مناطق با زاویهٔ شیب کم، مناطق نسبتاً مسطح و مناطق متشکل از سازندهای با مقاومت بیش‌تر است. همچنین تمامی مسیر قطعهٔ پنج از راه‌آهن اردبیل- میانه دارای آسیب‌پذیری بسیار زیادی است. شایان ذکر است، نقشهٔ خطر زمین‌لغزش حاصل از این اپراتور مطابقت و هم‌خوانی خوبی با پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده دارد. اکثر زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ بررسی شده روی مناطق با درجهٔ حساسیت زیاد تا خیلی زیاد منطبق شده‌اند که این امر بیان‌گر دقت نسبتاً زیاد این اپراتور در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های محدودهٔ قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل است.

مقادیر عضویت فازی ترکیب شده با استفاده از عملگر PRODUCT، به‌سمت مقادیر بسیار کوچک میل می‌کند که این امر به‌علت ضرب کردن چندین عدد کوچک‌تر از ۱ در یک‌دیگر است. برخلاف عملگرهای اشتراک و اجتماع فازی، در این عملگر همهٔ مقادیر عضویت نقشه‌های ورودی در نقشه خروجی تأثیر می‌گذارند و فاکتورهای مؤثر یک‌دیگر را تضعیف می‌کنند. با تلفیق لایه‌ها با استفاده از عملگر ضرب جبری فازی، برای کل بخش‌های محدودهٔ بررسی شده کم‌ترین درجهٔ حساسیت (مقدار صفر) اختصاص یافت. بنابرین نقشه حاصل از این عملگر در این پژوهش آورده نشده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

با استفاده از عملگر فازی SUM، نتیجه همیشه بزرگ‌تر یا مساوی بزرگ‌ترین مقدار عضویت مجموعه فازی است از این‌رو، به‌دلیل اثر افزایشی (increaser) جمع جبری فازی، حداکثر خطر زمین‌لغزش را در محدودهٔ بررسی شده داریم (شکل ۷). نتیجهٔ حاصل از این عملگر بسیار مشابه با عملگر اجتماع فازی است ولی با این تفاوت که نقشهٔ خطر تولید شده با استفاده از این عملگر در بخش‌هایی از محدودهٔ بررسی شده دارای درجه خطر بیش از حد انتظار است و به‌نوعی میزان خطر در این بخش‌های محدودهٔ بررسی شده اغراق‌آمیز است. بنابراین همهٔ محدوده آسیب‌پذیری بسیار زیادی دارد. به‌علاوه تمام طول مسیر قطعه ۵ راه‌آهن اردبیل– میانه در محدوده‌های با آسیب‌پذیری بسیار زیاد قرار دارد (شکل ۷). مقادیر مختلف عملگر گامای فازی، نتایج متفاوتی را از میزان حساسیت رخداد زمین‌لغزش نشان داده‌اند. با استفاده از معادلهٔ (۳) نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های پیوسته لرزه‌ای برای منطقهٔ بررسی شده با استفاده از اپراتور فازی گاما به‌ازای مقادیر(۰/۹۵، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳)۵ تهیه شده‌اند.

$$\mu_{combination} = (Fuzzy\ Algebraic\ \ SUM)^{\lambda} \times Fuzzy\ Algebraic\ \ Product)^{1-\lambda} \quad (۳)$$

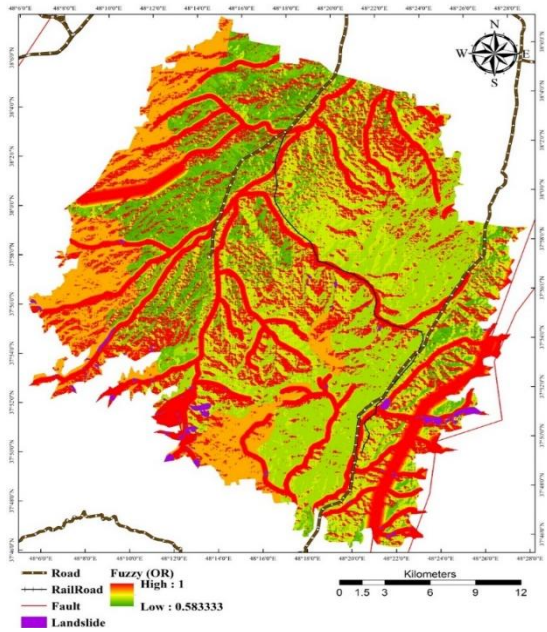
که در آن $\mu_{combination}$ لایه اطلاعاتی حاصل از گامای فازی و λ متغیری در محدودهٔ صفر و یک است. عملگر فازی گاما، حالت کلی روابط عملگر ضرب و جمع فازی است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما، پارامترهای کاهشی و افزایشی را هم‌زمان تلفیق کرده، به مقادیری در خروجی‌ها دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های افزایشی و کاهشی دو عملگر جمع و ضرب فازی هستند [۴۰]. مقادیر پیکسل‌ها بستگی به انتخاب صحیح توان گاما (λ) دارند. در این پژوهش به‌منظور بررسی طیف گسترده‌ای از مقادیر مختلف گاما، از مقادیر گامای (۰/۹۵، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳) [۴۱] استفاده شده است. تلفیق لایه‌ها با استفاده از عملگر گامای فازی، برای کل بخش‌های محدودهٔ بررسی شده کم‌ترین درجهٔ حساسیت (مقدار صفر) اختصاص یافت. بنابرین نقشه حاصل از این عملگر در این پژوهش آورده نشده است.

بحث و ارزیابی نتایج

برای ارزیابی و طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه– اردبیل با استفاده از منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، و مثلث سلسله مراتبی فولر، از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



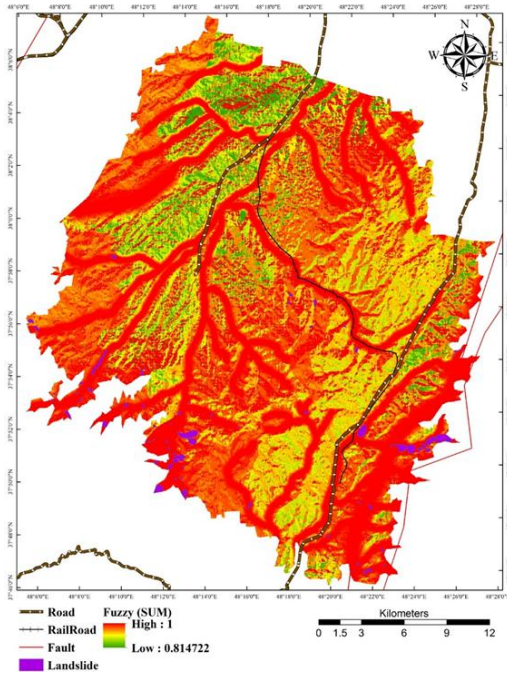
شکل ٦. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های با استفاده از عملگر اجتماع فازی

دو شاخص معرفی‌شده به‌وسیلهٔ گی (۱۹۹۲) [٤۲]، با عناوین ضریب تراکم (Dr) و جمع مطلوبیت (Qs) [٤۳]، درصد منطقه بحرانی (P) [٤٤]، [٤٥]، و هم‌چنین منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) [٤٦]، [٤۷]، [٤۸]، [٤۹]، [٥۰]، [٥۱]، [٥۲]، [٥۳] استفاده شده است. شاخص بدون بعد ضریب تراکم، برای مقایسهٔ کلاس‌های خطر در هر یک از نقشه‌ها و به‌طور مستقل استفاده شده است (معادلهٔ ٤).

$$Dr = \frac{\frac{Si}{Ai}}{\frac{\sum_i^n St}{\sum_i^n At}} \qquad (٤)$$

که در آن، Dr: تراکم نسبی زمین‌لغزش در هر طبقه خطر، Ai: مساحت i مین طبقه خطر در یک نقشهٔ پهنه‌بندی، Si: مجموع تعداد زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر طبقه خطر، At: مساحت کل محدودهٔ بررسی شده، St: تعداد کل زمین‌لغزش‌ها در ناحیهٔ بررسی شده و n: تعداد طبقات خطر است. هر چه تفکیک بین طبقات خطر به‌وسیلهٔ شاخص تراکم نسبی زمین‌لغزش‌ها بهتر انجام شده باشد، نقشه مطلوبیت بیش‌تری دارد. در یک نقشهٔ پهنه‌بندی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از عملگر جمع جبری فازی

خطر زمین‌لغزش، هرگاه کلاسی دارای تراکم نسبی ریزش برابر با یک باشد (Dr=1) بیان‌گر احتمال خطر متوسط است. وجود مقادیر عددی کم‌تر از یک در هر کلاس خطر بیان‌گر احتمال خطر ریزش کم و هم‌چنین وجود مقادیر عددی بیش‌تر از یک در هر کلاس خطر نیز بیان‌گر احتمال خطر ریزش بیش‌تر است [۴۳]. برای مقایسهٔ نتایج خروجی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از شاخص جمع مطلوبیت (Qs) استفاده می‌شود. مقدار Qs با استفاده از معادلهٔ (۵) برای هر نقشه محاسبه می‌شود.

$$Qs = \sum_{i=1}^{n}((Dr - 1)^2 \times \%\,Area) \qquad (۵)$$

در این رابطه i شمارهٔ کلاس خطر در یک مدل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و n تعداد کلاس‌های خطر است. مقادیر Qs نشان‌دهندهٔ مطلوبیت عملکرد مدل در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ بررسی شده است. معمولاً مقدار این شاخص برای مدل‌های مختلف در گسترهٔ صفر تا هفت قرار می‌گیرد، اگر چه از لحاظ تئوریک حدی برای آن وجود ندارد [۴۳]. به‌منظور کنترل نهایی نتایج ارزیابی حاصل از پارامتر جمع مطلوبیت، پارامتر ساده دیگری نیز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

برای سنجش و کنترل روند منطقی ارائه خطر به‌وسیلهٔ مدل استفاده شده است. این پارامتر درصد زمین‌لغزش‌های قرار گرفته در کلاس‌های خطر متوسط به بالا را ارائه می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر بیش‌تر باشد مدل کیفیت بیش‌تری دارد. این پارامتر به‌صورت معادلهٔ (٦) تعریف می‌شود [٤٤]،[٤٥].

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{i=m}^{n} \%\,\mathrm{Landslide}_i}{100} \qquad (٦)$$

که در آن m کلاس خطر متوسط است و n بالاترین کلاس خطر درنظر گرفته شده است. این پارامتر به‌عنوان پارامتر تکمیلی به‌منظور کنترل صحت پارامتر جمع مطلوبیت به‌کار می‌رود. منحنی ROC از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیات، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند [٤٦]. در حقیقت منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است. در منحنی ROC نسبت مثبت واقعی (TPR) در مقابل نسبت مثبت کاذب (FPR) ترسیم شده است. در ناحیهٔ بررسی شده، TPR با Sensitivity بیان‌گر درجهٔ احتمال پیکسل‌های زمین‌لغزش است که به‌طور صحیح به‌وسیلهٔ مدل تشخیص داده شده است و FPR یا Specifity بیان گر درجهٔ احتمال پیکسل‌های فاقد زمین‌لغزش است که به‌طور صحیح به‌وسیلهٔ مدل تشخیص داده شده است. خط مورب در منحنی ROC معرف داده‌های تصادفی انتخاب‌شده است که خط عدم تمایز نامیده می‌شود. سطح زیر منحنی ROC، تحت عنوان AUC، نشان‌دهندهٔ میزان دقت مدل برای پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیش‌ترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵–۱ متغیر است. هم‌بستگی کیفی–کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین بدین‌صورت است: ۰/۹–۱: عالی، ۰/۸–۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷–۰/۸: خوب، ۰/٦–۰/۷: متوسط، ۰/۵–۰/٦: ضعیف [٤٦]. طبق مرور منابع انجام شده این شاخص نماینده بهتری از دقت مدل است [٤٧]، [٥٠].

با توجه به این‌که براساس مقایسه تجربی، از میان نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از مجموعه عملگرهای اجتماع فازی (OR) و جمع جبری فازی (SUM)، نقشهٔ پهنه‌بندی حاصل از اپراتور اجتماع فازی (OR)، بهترین مطابقت و هم‌خوانی را با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های رخداده در محدودهٔ بررسی شده دارد، میزان صحت و درستی نقشهٔ حاصل از این عملگر با استفاده از سه شاخص مذکور

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

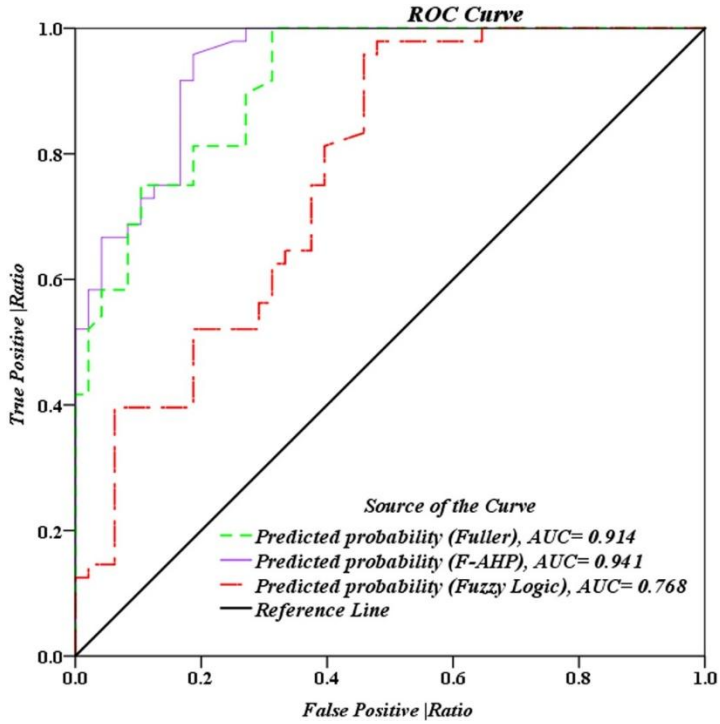
بررسی شده است. مقادیر عددی ضریب تراکم زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل، جمع مطلوبیت و درصد منطقهٔ بحرانی برای نقشه‌های احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل براساس منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، و مثلث سلسله مراتبی محاسبه شد. هم‌چنین براساس ضریب تراکم محاسبه شده در جدول ۵ برای هر یک از پهنه‌های خطر زمین‌لغزش براساس عملگر اجتماع فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) و مثلث سلسله مراتبی فولر، ضریب تراکم حاصل از تحلیل سلسله مراتبی فازی نسبت به سایر روش‌ها با افزایش خطر دارای روند صعودی معنادارتری است. منحنی ROC نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و منطق فازی و هم‌چنین مقادیر AUC حاصله برای هر یک از روش‌های مذکور در شکل ۸ ارائه شده است. براساس منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) (شکل ۸)، مقدار AUC برای تحلیل سلسله مراتبی فازی ۰/۹٤۱ (عالی)، مثلث سلسله مراتبی فولر ۰/۹۱٤ (عالی) و منطق فازی ۰/۷٦۸ (خوب) محاسبه شده است. با توجه به مقادیر سطح زیر منحنی حاصل برای روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، مثلث سلسله مراتبی فولر و منطق فازی به‌نظر می‌رسد، تحلیل سلسله مراتبی فازی در مقایسه با روش‌های مثلث سلسله مراتبی فولر و منطق فازی دارای دقت بیش‌تری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعه ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل است.

جدول ۵. اطلاعات نقشه پهنه‌بندی خطر حاصل از اپراتور اجتماع فازی (OR)، تحلیل سلسله مراتبی فازی و مثلث سلسله مراتبی فولر با استفاده از درصد منطقه بحرانی

مطلوبیت / روش مورد استفاده	درصد منطقه بحرانی
اجتماع فازی	۰/۷۳۸۳۱۷۷۵۷
تحلیل سلسله مراتبی فازی	۰/۸۷۵۳۸۹٤۰۸
مثلث سلسله مراتبی فولر	۰/۸٤٤۲۳٦۷٦

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]



شکل ۸. منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

با استفاده از پارامترهای صحت‌سنجی "ضریب تراکم"، "جمع مطلوبیت"، "درصد منطقه بحرانی" و منحنی مشخصه عملکرد سیستم، نقشه احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه-آهن میانه–اردبیل براساس تحلیل سلسله مراتبی فازی مطابقت و هم‌خوانی خیلی خوبی را با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های رخداده در قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل دارد و دارای دقت بیش‌تری نسبت به منطق فازی و مثلث سلسله مراتبی فولر است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، احتمال پتانسیل رخداد زمین لغزش در قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، و مثلث سلسله مراتبی فولر و با به‌کارگیری ۸ متغیر رده مقاومتی زمین، زاویهٔ شیب، جهت شیب، رطوبت زمین، پوشش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

گیاهی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده انجام شده است. در این پژوهش برای طبقه‌بندی سطوح خطر زمین‌لغزش‌ها به ۵ دسته "خطر خیلی‌کم"، "خطر کم"، "خطر متوسط"، "خطر زیاد" و "خطر خیلی‌زیاد" از روش شکست طبیعی منحنی در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. با تحلیل‌هایی که روی معیارهای مؤثر در افزایش خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ بررسی شده با استفاده از منطق فازی انجام شد، مشخص شد که عملگرهای مختلف منطق فازی نتایج مختلفی را ارائه می‌دهند. اما نکته قابل توجه در مورد عملگر جمع جبری فازی این است که میزان خطر رخداد زمین‌لغزش در امتداد بخش‌هایی از راه‌های ارتباطی بیش از حد انتظار است و به‌نوعی میزان خطر در این بخش‌های محدودهٔ بررسی شده اغراق‌آمیز است. نتایج حاصل از عملگرهای اشتراک فازی (AND)، مقادیر مختلف گامای فازی (۰/۹۵، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳) و ضرب جبری فازی(PRODUCT) نشان داد که برای همهٔ بخش‌های محدودهٔ بررسی شده کم‌ترین درجهٔ حساسیت (مقدار صفر) اختصاص یافته است. بنابرین نقشه حاصل از این عملگرها در این پژوهش آورده نشده است. بر اساس اپراتور اجتماع فازی، اکثر قسمت‌های محدودهٔ بررسی شده که مشرف به راه‌های ارتباطی، رودخانه‌ها، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناختی با مقاومت کم‌تر است، دارای درجه خطر رخداد زمین‌لغزش زیاد تا خیلی زیاد است و کم‌ترین درجه خطر مربوط به مناطق با زاویهٔ شیب کم، مناطق نسبتاً مسطح و مناطق متشکل از سازندهای با مقاومت بیش‌تر است. هم‌چنین تمامی مسیر قطعه پنج از راه‌آهن اردبیل– میانه دارای آسیب‌پذیری بسیار زیادی است. شایان ذکر است، نقشهٔ خطر زمین‌لغزش حاصل از اپراتور اجتماع فازی مطابقت و هم‌خوانی متوسطی با پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده دارد. براساس نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی، تمامی قسمت‌های محدودهٔ بررسی شده که مشرف به راه‌های ارتباطی، رودخانه‌ها، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناختی با مقاومت کم‌تر است، دارای درجه خطر رخداد زمین‌لغزش زیاد تا خیلی زیاد است و کم‌ترین درجه خطر مربوط به مناطق با زاویهٔ شیب کم، مناطق نسبتاً مسطح و مناطق متشکل از سازندهای با مقاومت بیش‌تر است. هم‌چنین تمامی مسیر قطعهٔ ۵ از راه‌آهن اردبیل– میانه دارای درجه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

حساسیت زیاد تا خیلی زیاد است. شایان ذکر است، به‌نظر می‌رسد نقشهٔ خطر زمین‌لغزش حاصل از تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) مطابقت و هم‌خوانی خیلی‌خوبی با پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده دارد. براساس نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل با استفاده از مثلث سلسله مراتبی فولر، تمامی قسمت‌های محدودهٔ بررسی شده که مشرف به راه‌های ارتباطی، رودخانه‌ها، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناختی با مقاومت کم‌تر است، دارای درجهٔ خطر رخداد زمین‌لغزش متوسط تا خیلی زیاد است و کم‌ترین درجه خطر مربوط به مناطق با زاویهٔ شیب کم، مناطق نسبتاً مسطح و مناطق متشکل از سازندهای با مقاومت بیش‌تر است. هم‌چنین تمامی مسیر قطعهٔ ۵ راه‌آهن اردبیل– میانه دارای درجهٔ حساسیت متوسط تا خیلی زیاد است. شایان ذکر است، به‌نظر می‌رسد نقشهٔ خطر زمین‌لغزش حاصل از مثلث سلسله مراتبی فولر مطابقت و هم‌خوانی خوبی با پراکنش زمین‌لغزش‌های محدودهٔ بررسی شده دارد. به‌منظور ارزیابی آماری نتایج حاصل از منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی و مثلث سلسله مراتبی فولر ، از پارامترهای صحت‌سنجی با دقت بیش‌تری مانند ضریب تراکم، جمع مطلوبیت، درصد منطقه بحرانی و منحنی مشخصه عملکرد سیستم استفاده شده است. با تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل و با توجه به مقادیر جمع مطلوبیت، درصد منطقه بحرانی و مقدار AUC حاصل از عملگر اجتماع فازی (به‌ترتیب ۰/۳۲۹۹۱۵۲٤٥، ۰/۷۳۸۳۱۷۷۵۷ و ۰/۷٦۸)، تحلیل سلسله مراتبی فازی (به‌ترتیب ۱/۰۷۹۱۲۰۳۳۱، ۰/۸۷۵۳۸۹٤۰۸ و ۰/۹٤۱) و مثلث سلسله مراتبی فولر (به‌ترتیب ۰/۷۸٤٦۱۳۱٤۷، ۰/۸٤٤۲۳٦۷٦ و ۰/۹۱٤) برای نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل مشاهده می‌شود که جمع مطلوبیت، درصد منطقه بحرانی و مقدار AUC حاصل از تحلیل سلسله مراتبی فازی، بیش‌تر از مقداری است که برای نقشه‌های پهنه‌بندی خطر حاصل از عملگر اجتماع فازی و مثلث سلسله مراتبی فولر محاسبه شده است. بنابرین براساس صحت سنجی انجام شده به‌صورت تجربی و هم‌چنین با استفاده از پارامترهای صحت‌سنجی "ضریب تراکم"، "جمع مطلوبیت"، "درصد منطقه بحرانی" و منحنی مشخصه عملکرد سیستم به‌نظر می‌رسد، نقشهٔ احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل براساس تحلیل سلسله مراتبی فازی مطابقت و هم‌خوانی خیلی‌خوبی را

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های رخداده در قطعهٔ ۵ راه‌آهن میانه–اردبیل دارد و دقت بیش‌تری نسبت به منطق فازی و مثلث سلسله مراتبی فولر دارد.

منابع

1. Bagheri V., Uromeihy A., Razifard M., "Evaluation of MLP and RBF methods for hazard zonation of landslides triggered by the Twin Ahar-Varzeghan earthquakes", Geotechnical and Geological Engineering, 35 (5) (2017) 2163-2190.

۲. کورکی‌نژاد م.، اونق م.، سپهری ع.، "مقایسهٔ کارائی دو مدل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (حائری و مورا) در آبخیز سیاه رودبار گرگان"، فصلنامهٔ علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شمارهٔ ۳ (پیاپی ٤٧)، (١٣٨٤) ٩٩–٩١.

۳. حافظی مقدس ن.، غفوری م.، "زمین‌شناسی زیست‌محیطی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، (١٣٩٦) ٤٠٢ .

4. Sarkar S., Kanungo D. P., Mehrotra G. S., "Landslide hazard zonation: a case study in Garhwal Himalaya, India", Mountain Research and Development (1995) 301-309.
5. Fatemi Aghda S. M., Giamian J., Eshgheli Farahani A., "Investigation landslide hazard using Fuzzy logic (case study: Roudbar area)", J. Science Tehran University, 31 (2006) 43- 64.
6. Pachauri A. K., Pant M., "Landslide hazard mapping based on geological attributes", Engineering geology, 32 (1-2) (1992) 81-100.
7. Nagarajan R., Roy A., Kumar R. V., Mukherjee A., Khire M. V., "Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58 (4) (2000) 275-287.
8. Lee S., Min K., "Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea", Environmental geology, 40 (9) (2002) 1095-1113.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

9. Qin S., Jiao J. J., Wang S., "A nonlinear dynamical model of landslide evolution", Geomorphology, 43 (1-2) (2002) 77-85.
10. Zhou C. H., Lee C. F., Li J., Xu Z. W., "On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong", Geomorphology, 43 (3-4) (2002) 197-207.
11. Ayalew L., Yamagishi H., "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 65 (1-2) (2005) 15-31.
12. Pradhan B., Lee S., "Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia", Landslides, 7 (1) (2010) 13-30.
13. Banshtu R. S., Prakash C., "Application of remote sensing and GIS techniques in landslide hazard zonation of Hilly Terrain", In Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Springer, Cham (2014) (313-317).
14. He X., Hong Y., Yu X., Cerato A. B., Zhang, X., Komac M., "Landslides susceptibility mapping in Oklahoma state using GIS-based weighted linear combination method", In Landslide science for a safer geoenvironment (2014) 371-377.
15. Daneshvar M. R. M., "Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran", Landslides, 11 (6) (2014) 1079-1091.
16. Ahmed B., "Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh", Landslides, 12 (6) (2015) 1077-1095.
17. Leonardi G., Palamara R., Cirianni F., "Landslide susceptibility mapping using a fuzzy approach", Procedia engineering, 161 (2016) 380-387.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

18. Hong H., Ilia I., Tsangaratos P., Chen W., Xu C., "A hybrid fuzzy weight of evidence method in landslide susceptibility analysis on the Wuyuan area, China", Geomorphology, 290 (2017) 1-16.

19. Feizizadeh B., Blaschke T., Tiede D., Moghaddam M. H. R., "Evaluating fuzzy operators of an object-based image analysis for detecting landslides and their changes", Geomorphology, 293 (2017) 240-254.

20. Gheshlaghi H. A., Feizizadeh B., "An integrated approach of analytical network process and fuzzy based spatial decision making systems applied to landslide risk mapping", Journal of African Earth Sciences, 133 (2017) 15-24.

21. Mandal B., Mandal S., "Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India", Advances in Space Research, 62(11) (2018) 3114-3132.

22. Aghda S. M., Bagheri V., Razifard, M., "Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic System and Its Influences on Mainlines in Lashgarak Region, Tehran, Iran", Geotechnical and Geological Engineering (2018) 1-23.

۲۳. مشاور فربر.، "گزارش زمین‌شناسی قطعه ۵ راه‌آهن میانه-اردبیل"، وزارت راه و شهرسازی، شرکت ساخت و توسعه زیر بناهای حمل و نقل کشور، معاونت ساخت و توسعه راه‌آهن، بنادر و فرودگاه‌ها، مجری طرح راه‌آهن میانه- اردبیل. شرکت مهندسین مشاور فربر، (۱۳۹۲)۱۲۱.

24. Fatemi Aghda S. M., Bagheri V., "Evaluation of earthquake-induced landslides hazard zonation methods: a case study of Sarein, Iran, earthquake (1997)", Arabian Journal of Geosciences, 8 (9) (2015)7207-7227.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

25. Jin S., Sader S. A., "Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances", Remote Sensing of Environment, 94 (3) (2005)364-372.

26. Florina C. R., "Climatic dysfunctional ties observed with the aid of NDMI and SAVI indices in the LEU-ROTUNDA and DĂBULENI plains. Academic Journal of the Air & Water Components of the Environment / Aerul si Apa Compone (2013) 500-507.

27. Ryan L., "Creating a normalized difference vegetation index (NDVI) image using multispec", University of New Hampshire (1997).

28. Saaty T. L., Vargas L. G., "Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports", Kluwer Academic Pub (1991) 251.

۲۹. شیرمرد ح. بحرودی ع. عادلی ا.، "روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در سامانه اطلاعات مکانی به منظور تعیین نقاط بهینه حفاری در کانسار مس پرفیری نیسیان"، فصل‌نامه اطلاعات جغرافیایی، دوره ٢٤، شمارهٔ ۹۳، (۱۳۹٤) ۹۱ –۱۰۰.

30. Moradi M., Bazyar M. H., Mohammadi Z., "GIS-based landslide susceptibility mapping by AHP method, a case study, Dena City, Iran", Journal of Basic and Applied Scientific Research, 2 (7) (2012) 6715-6723.

31. Mondal S., Maiti R., "Integrating the analytical hierarchy process (AHP) and the frequency ratio (FR) model in landslide susceptibility mapping of Shiv-khola watershed, Darjeeling Himalaya", International Journal of Disaster Risk Science, 4 (4) (2013) 200-212.

۳۲. ارومیه‌ای ع.، رضوی ا. ا.، باقری و.، "ارزیابی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو رشت با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی"، فصلنامهٔ علوم‌زمین، شمارهٔ ۱۰۳ (۱۳۹۵) ۱۰–۱.

33. Kampf R., "Estimation Methods for Weight Criteria. Scientific Papers of the University of Pardubice: Series B-The Jan Perner Transport Faculty, 9 (2003) 255-261.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

34. Paszek L., Gurecky J., Prokop L., "Determination of Criteria Weights in Terms of Computer Software", Advances in Electrical and Electronic Engineering, 7 (1-2) (2008) 154.
35. Bata R., Obrsalova I., "Sustainable environment indicators and possibilities of their aggregation by means of Petri nets", In Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and DEVELOPMENT (EED'09) (2009) 14-16.
36. Jablonský J., "Software support for multiple criteria decision making problems", Management Information Systems, 4 (2) (2009) 29-34.
37. Porhinčák M., Eštoková A., "Process of selection of building materials towards sustainable development", Chemical Engineering Transactions, 29 (2012) 547-552.
38. Perzina R., Ramik J., "DAME–Microsoft Excel add-in for solving multicriteria decision problems with scenarios", In Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics (2012) 697-702.
39. Miles S. B., Keefer D. K., "Comprehensive areal model of earthquake-induced landslides: technical specification and user guide", U.S. Geological Survey Open-File Report 2007–1072 (2007) 69 .
40. Moradi H. R., Poorghasemi H. R., Mohammadi M., Mahdavifar M. R., "Landslide hazard zonation using Fuzzy Gamma operator (case study: Haraz watershed)", Environmental Sciences journal, 7 (4) (2010) 129-142.
41. Lee S.,Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping", Environmental Geology, 50 (2007) 847-855.
42. Gee M. D., "Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability. In Proc", 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, 2 (1992) 947-952.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]

۴۳. شریعت جعفری م.، "پهنه‌بندی خطر ریسک ویژه زمین‌لغزش در حوزه‌های بحرانی (البرز مرکزی)"، سازمان مدیریت بحران کشور، کارگروه تخصصی زلزله و لغزش لایه‌های زمین (۱۳۸۸) ۹۵.

44. Jade S., Sarkar S., "Statistical models for slope instability classification", Engineering Geology, 36 (1-2) (1993) 91-98.

45. Kornejady A., Kohzad H., Sarparast M., Khosravi G., Mombeini M., "Performance assessment of two “LNRF” and “AHP-Area Density” models in landslide susceptibility zonation", Journal of Life Science and Biomedicine, 4 (3) (2014) 169-176.

46. Yesilnacar E. K., "The Application of Computational Intelligence to Landslide Susceptibility Mapping in Turkey, Ph.D Thesis", Department of Geomatics the University of Melbourne (2005) 423.

47. Nefeslioglu H. A., Gokceoglu C., Sonmez H., "An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps", Engineering Geology, 97 (3) (2008) 171-191.

48. Mathew J., Jha V. K., Rawat G. S., "Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve method", Landslides, 6 (1) (2009) 17-26.

49. Pourghasemi H. R., Pradhan B., Gokceoglu C., Moezzi K. D., "Landslide susceptibility mapping using a spatial multi criteria evaluation model at Haraz Watershed, Iran", In Terrigenous mass movements, Springer, Berlin, Heidelberg (2012a) 23-49.

50. Pourghasemi H. R., Pradhan B., Gokceoglu C., "Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran", Natural hazards, 63 (2) (2012b) 965-996.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.3.3]