تحلیل فعالیت زمین‌ساختی و ارتباط خطواره‌ها با خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه وارک، لرستان)

سیامک بهاروند* ؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، گروه زمین‌شناسی
سلمان سوری؛ باشگاه پژوهش‌گران جوان و نخبگان واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران
جعفر رهنماراد؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، گروه زمین‌شناسی
مسعود جودکی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی لرستان

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۲/۱٤ پذیرش ۹٦/۰٤/۲٦

چکیده

حوضه آبریز وارک، یکی از زیرحوضه‌های رودخانهٔ دز است که با مساحت ۱۳۹/۹ کیلومتر مربع در استان لرستان واقع شده است. این تحقیق با هدف تحلیل فعالیت زمین‌ساختی حوضه و هم‌چنین بررسی ارتباط خطواره‌ها با خطر زمین‌لغزش با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. در این پژوهش از ٤ شاخص مورفوتکتونیکی شامل گرادیان طولی رودخانه (SL)، منحنی هیپسومتری حوضه (HC)، پیچ و خم رودخانه (S) و عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (AF) استفاده و نتایج تجزیه و تحلیل آن‌ها با شاخصی تحت عنوان زمین‌ساخت فعال (Iat) بیان شده است. محاسبهٔ شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی نشان می‌دهد که منطقه از نظر تکتونیکی در کلاس فعال قرار دارد. به‌منظور بررسی ارتباط خطواره‌ها با خطر زمین‌لغزش، ابتدا نقشهٔ خطواره‌ها و عوامل مؤثر بر لغزش با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 و بازدیدهای میدانی تهیه شده است. سپس با استفاده از روش منطق فازی نقشه خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ بررسی شده تهیه و با تلفیق آن با نقشه خطواره‌ها، ارتباط بین خطواره‌ها و نقشهٔ خطر زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزار ArcGIS بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از نقشهٔ خطر

*نویسنده مسئول sbbaharvand53@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

زمین‌لغزش‌های منطقه به‌ترتیب ۱۲/٤۰، ۸/۲۵، ۳۷، ۳۲/٦۱ و ۹/۷۳ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که به‌علت تکتونیک فعال منطقه ارتباط نزدیکی بین خطواره‌ها و مناطق با خطر لغزش بالا وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: حوضهٔ وارک، مورفوتکتونیک، خطواره، زمین‌لغزش، سنجش از دور، سیسنم اطلاعات جغرافیایی

مقدمه

زمین سیستمی پویاست که تغییر و تحول از جمله ویژگی‌های آن است [۱] و در سطح آن تقریباً منطقه‌ای پیدا نمی‌شود که طی چند هزار سال اخیر، فعالیت‌های نو زمین‌ساختی آن را تحت تأثیر خود قرار نداده باشد. در حقیقت می‌توان گفت که نو زمین‌ساخت فعال در حال تغییر شکل سطح زمین است [۲]. در میان روش‌های زمین‌شناختی برای بررسی حرکات تکتونیکی فعال، بررسی‌های ژئومورفولوژی و مورفوتکتونیک نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند، زیرا بسیاری از عوارض ژئومورفیک در مقابل حرکات تکتونیکی فعال حساس هستند[۳] و تحلیل هندسی این عوارض شواهدی پیرامون نوع، میزان و آرایش تغییر شکل‌های تکتونیکی فعال برای ما ارائه می‌دهند. مورفوتکتونیک یکی از شاخه‌های علم تکتونیک است، که با بررسی اشکال و فرم‌های موجود در پوسته خارجی زمین به بررسی نیروها و عوامل به‌وجود آورنده آن‌ها می‌پردازد. در واقع مورفوتکتونیک بررسی چشم اندازهای ایجاد شده به‌وسیلهٔ فرآیندهای زمین‌ساختی است که بیان کننده ارتباط میان ژئومورفولوژی و تکتونیک است [٤].

در این تحقیق فعالیت زمین‌ساختی و ارتباط خطواره‌ها با خطر زمین‌لغزش به‌عنوان دو عامل متأثر از فعالیت‌های تکتونیکی حوضهٔ وارک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در زمینهٔ بررسی زمین‌ساخت، خطواره‌ها و خطر زمین‌لغزش تا کنون پژوهش‌های مجزایی در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به این‌موارد اشاره کرد:

عزتی و آق آتابای (۱۳۹۳) با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی به تحلیل زمین‌ساخت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

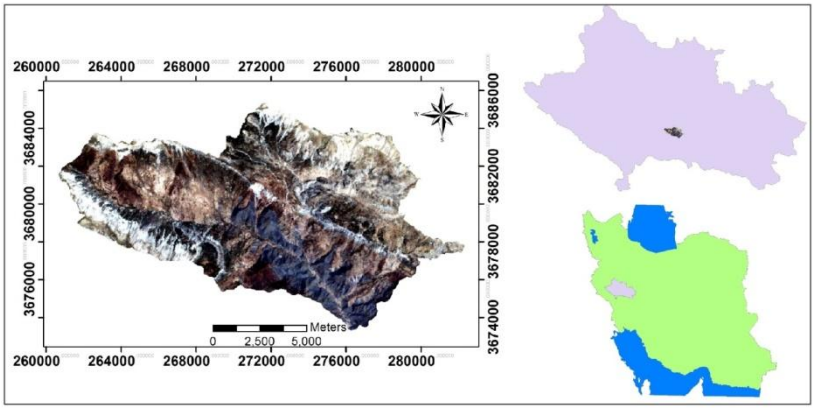
فعال حوضهٔ بجنورد پرداختند. در این تحقیق که از شاخص‌های مختلف شامل شکل حوضه، عدم تقارن حوضهٔ زهکشی، منحنی هیپسومتری، انتگرال هیپسومتری و غیره استفاده شده بود، نتایج به‌دست آمده از شاخص زمین‌ساخت نسبی منطقه نشان داد بخش شرقی حوضه تکتونیک فعال‌تری دارد [۵]. میرنظری و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل سلسله مراتبی و گامای فازی به ارزیابی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ آبریز پشت تنگ در سرپل ذهاب در استان کرمانشاه پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده مدل گامای فازی کارایی بیش‌تری نسبت به مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی داشته است [٦]. جمال‌آبادی و همکاران (۱۳۹٦) به بررسی عوامل مؤثر در پیدایش و تکامل مخروط‌افکنه‌های دامنه‌های جنوبی ارتفاعات جغتای با تأکید بر نقش تکتونیک پرداختند. در این تحقیق که از شاخص‌های نسبت کف دره به عمق، گرادیان طولی رودخانه، نسبت شکل حوضه، تقارن توپوگرافی عرضی و غیره استفاده شده بود، نتایج به‌دست آمده نشان داد که منطقهٔ بررسی شده به‌لحاظ عملکرد نیروهای تکتونیکی در وضعیت فعال تا نیمه‌فعال قرار دارد [۷]. همدونی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شاخص‌های زمین‌ریختی و شاخص نسبی فعالیت زمین‌ساختی، زمین‌ساخت فعال جنوب اسپانیا را طبقه‌بندی و مناطق فعال آن را مشخص کردند [۸]. وی‌دونگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از تئوری فازی اقدام به ارزیابی حساسیت حرکات توده‌ای در اطراف استان گوئیژو چین کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل فازی بر اساس تابع ذوزنقه‌ای روش کارآمدی برای پهنه‌بندی حرکات توده‌ای در این منطقه است [۹]. عبداله و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از باند ۷ سنجنده ETM+ به‌طور اتوماتیک خطواره‌های جنوب غرب بخشی از منطقهٔ تایز یمن را شناسایی و با بررسی‌های میدانی صحت آن‌ها را سنجیدند، نتایج به‌دست آمده نشان داد که روش مذکور دقت زیادی دارد [۱۰]. شارما و سارما (۲۰۱۷) به تحلیل مورفوتکتونیکی قسمت‌هایی از شمال هندوستان پرداختند. در این تحقیق که از شاخص‌ها گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضهٔ زهکشی، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع و غیره استفاده شده بود، نتایج نشان داد که منطقه از نظر تکتونیکی نسبتاً فعال است [۱۱].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های حوضهٔ بررسی شده

حوضه آبریز وارک با مساحت ۱۳۹/۹ کیلومتر مربع در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر خرم‌آباد در استان لرستان قرار دارد (شکل ۱). این حوضه یکی از زیر حوضه‌های رودخانهٔ دز است. بلندترین نقطهٔ ارتفاعی آن ۲۸۰۳ متر و پست‌ترین نقطه ۸۹۳ متر از سطح آزاد دریا قرار دارد. از دیدگاه زمین‌ساختی گسترهٔ بررسی شده در پهنهٔ زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضهٔ وارک

بررسی نوزمین‌ساخت منطقه

برای تحلیل و ارزیابی حرکات زمین‌ساختی در حوضهٔ بررسی شده با توجه به اعتبار شاخص‌های ژئومورفیک در پژوهش‌ها، از شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه (SL)، شاخص پیچ و خم رودخانه (S)، منحنی هیپسومتری حوضه (HC) و عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (AF) استفاده شد و پس از محاسبه شاخص‌های مورد نظر، با استفاده از شاخص زمین‌ساخت فعال (Iat)، فعالیت تکتونیکی منطقه ارزیابی شده است [۸].

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL): برای تعیین شاخص گرادیان طولی رودخانه از رابطهٔ (۱) استفاده می‌شود.

$$SL = (\Delta H/\Delta L)L \qquad (۱)$$

در این رابطه ΔH: اختلاف ارتفاع قطعه مورد نظر، ΔL: طول شاخه مورد نظر و L: مجموع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

طول آبراهه از مرکز نقطه‌ای که شاخص محاسبه می‌شود تا مرتفع‌ترین نقطه آبراهه در بالادست است. بر اساس رابطهٔ (۱) اگر مقدار شاخص گرادیان طولی رودخانه بیش‌تر از ۵۰۰ باشد منطقه از نظر تکتونیکی فعال است.

شاخص پیچ و خم رودخانه (S): مقدار شاخص پیچ و خم رودخانه از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود. در مناطق فعال رودخانه به‌صورت خط مستقیم بوده و اگر مقدار این شاخص کم‌تر از ۱/۱۵ باشد منطقه از نظر تکتونیکی فعال است.

$$S = C/V \qquad (۲)$$

در این رابطه S: شاخص پیچ و خم رودخانه، C: طول رودخانه و V: طول دره در خط مستقیم است.

شاخص منحنی هیپسومتری حوضه: این شاخص پراکنش سطوح ارتفاعی یک حوضه را از سطح آب‌های آزاد ارزیابی و توصیف می‌کند. این منحنی با ترسیم ارتفاع کل در مقابل مساحت کل حوضه ترسیم می‌شود. از طریق مقاسیه منحنی به‌دست آمده با منحنی‌های نظری می‌توان وضعیت نوزمین‌ساخت حوضه را مشخص کرد. در منحنی‌های نظر مذکور، مرحله جوانی با برش‌های عمیق و برجستگی‌های ناهموار و ناصاف مشخص می‌شود.

شاخص عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (AF): این شاخص با استفاده از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید. اگر مقدار عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد بیان‌گر وجود تقارن در سطح حوضه است.

$$AF = 100(\frac{Ar}{At}) \qquad (۳)$$

در این رابطه AF: شاخص عدم تقارن، Ar: مساحت حوضه آبریز در سمت راست آبراهه اصلی و At: مساحت کل حوضه است.

شاخص زمین‌ساخت فعال (IAT): این شاخص از نسبت مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده به تعداد شاخص‌های محاسبه شده به‌دست می‌آید. اگر مقدار عددی محاسبه شده از این شاخص بین ۱ تا ۱/۵ باشد نشان‌دهندهٔ فعالیت شدید تکتونیکی، ۱/۵ تا ۲ فعالیت زیاد، ۲ تا ۲/۵ فعالیت متوسط و بیش‌تر از ۲/۵ نشان‌دهندهٔ فعالیت کم تکتونیکی است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

تهیه نقشه خطواره‌های حوضه وارک

در این بخش پس از تهیه تصاویر ماهواره‌ای منطقه با قدرت تفکیک مناسب، سعی شده است تا با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، همهٔ شکستگی‌ها و خطواره‌های منطقه شناسایی شود؛ سپس با تهیهٔ نمودار گل‌سرخی، روند خطواره‌های منطقه بررسی می‌شود. شناسایی و برداشت آثار شکستگی و گسلش از روی تصاویر ماهواره‌ای به‌طور معمول به دو طریق مستقیم (تفسیر چشمی) و غیرمستقیم (روش اتوماتیک) انجام می‌شود که در این تحقیق با تفسیر چشمی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI لندست ۸ که به‌لحاظ فنی دارای کیفیت بیش‌تری نسبت به تصاویر لندست ۷ است، خطواره‌های منطقه بدین‌شرح شناسایی شده است:

۱. **انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک**: تصاویر ماهواره‌ای اغلب دارای اعوجاج هندسی و رادیومتریک بوده و نیاز به تصحیحات مکانی و طیفی دارند. پردازش تصاویر رقومی مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که برای استفاده از تصاویر با رایانه استفاده می‌شود و به‌طورکلی شامل تصحیحات هندسی، بارزسازی، تعبیر و تفسیر تصاویر خام و غیره است [۱۲].

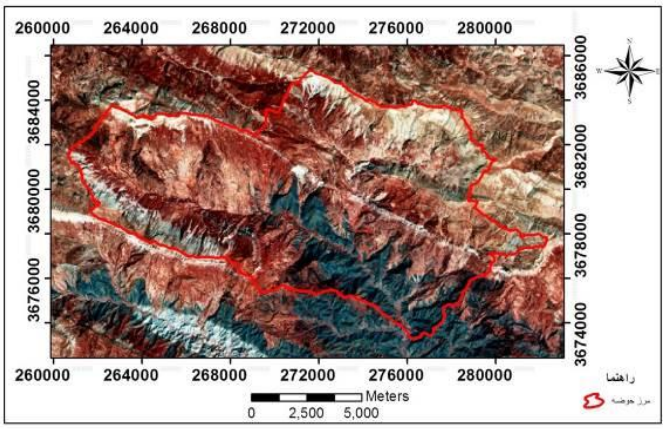
۲. **پردازش تصاویر**: برای تفسیر و شناسایی بهتر عوارض در تصاویر زمین مرجع شده باید فرآیند پردازش صورت گیرد. پردازش تصاویر به عملیات لازم برای ارتقای کیفی تصاویر به سطحی بهتر و قابل درک برای استفاده از توانایی چشم انسان، اطلاق می‌شود. بهبود و بارزسازی تصاویر شامل همهٔ تکنیک‌هایی می‌شود که موجب نمایش هرچه بهتر تصاویر یا استخراج هرچه کامل‌تر اطلاعات از آن‌ها می‌شوند. مرحلهٔ پردازش تصاویر در این تحقیق بدین‌شرح است:

روش ایجاد تصاویر رنگی مجازی: یکی از روش‌های تفکیک ساختارها و واحدهای مختلف از یک‌دیگر استفاده از تصاویر رنگی مرکب و مجازی است. تصاویر رنگی مرکب تصاویری هستند که از تلفیق سه باند به‌وجود می‌آیند. در لندست ۸ ترکیب باندی ٤۳۲ نشان‌دهندهٔ رنگ واقعی منطقه است و تمامی حالات به‌غیر از این ترکیب نشان‌دهندهٔ ترکیب رنگی کاذب است. یکی از بهترین ترکیبات برای جدایش واحدهای زمین‌شناسی از یک‌دیگر در لندست ۸ ترکیب

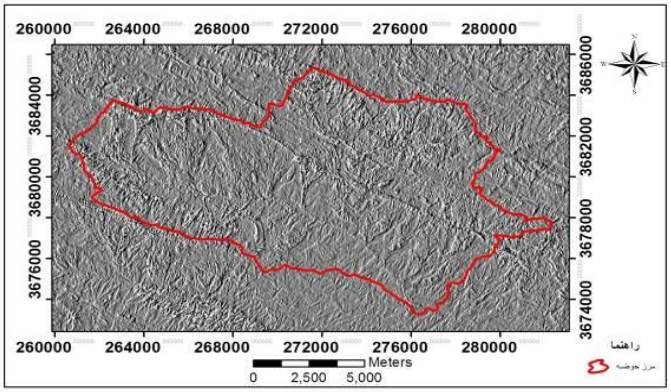
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

۵۳۲ است که بیش‌تر از سایر ترکیبات استفاده می‌شود (شکل ۲).

روش فیلتر گذاری: فیلترها به‌منظور کاهش نویز و حذف اطلاعات اضافه استفاده می‌شوند. اپراتورهای فیلتر معمولاً پنجره‌های ۳×۳، ۵×۵ و یا ۷×۷ هستند و با اعمال بر تصویر، برای هر پیکسل با توجه به پیکسل‌های اطراف، مقدار جدیدی به‌دست آورده و آن را ذخیره می‌کنند. در این تحقیق به‌منظور شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها از فیلتر جهتی Directional در جهات شمالی–جنوبی، شمال شرق–جنوب غرب، شرقی–غربی و جنوب شرق–شمال غرب استفاده شده است (شکل ۳). فیلتر جهت‌دار در جهات خاصی تحت زوایای مختلف تعریف می‌شوند و عوارض خطی را آشکارسازی می‌کنند [۱۳].



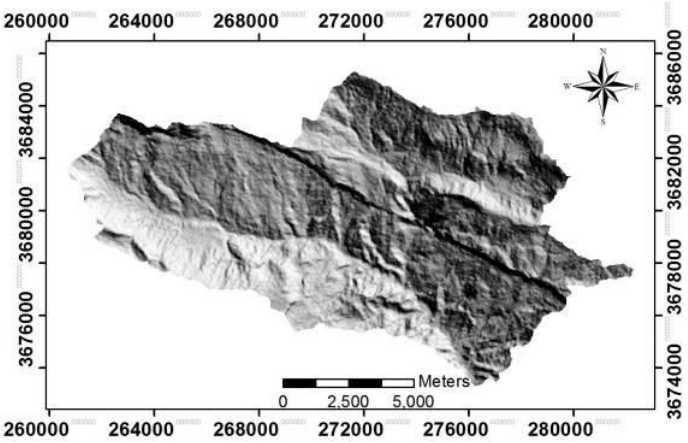
شکل ۲. ترکیب باندی ۵۳۲ حوضهٔ وارک



شکل ۳. اعمال فیلتر جهت‌دار در راستای شمال–جنوب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

روش اعمال تکنیک Hillshade روی تصاویر DEM: با توجه به این‌که ارتفاع نقاط زمین و پستی بلندی‌های آن نقش مؤثری در ایجاد یک محیط سه‌بعدی دارد؛ بنابراین لازم است از مدل رقومی ارتفاع منطقه به‌منظور ایجاد یک سطح پایه استفاده کرد. برای این منظور با اعمال تکنیک HillShade روی نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع حوضهٔ وارک در محیط نرم‌افزار ArcGIS تحت آزیموت‌های مختلف (٤٥، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه) استفاده شده است (شکل ٤).



شکل ٤. اعمال تکنیک HillShade تحت زاویهٔ ٤٥ درجه

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ وارک

عوامل مختلف در نظر گرفته شده به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با توجه به نکاتی از قبیل هدف، مقیاس کار و دقت قابل انتظار، شرایط منطقه، میزان تأثیرگذاری هر عامل و کافی و در دسترس بودن اطلاعات، تعیین می‌شود. بر این اساس علاوه بر نقشه نقاط لغزشی، ۸ عامل دیگر نیز بررسی شده است. به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ عوامل مؤثر بر لغزش از مدل رقومی ارتفاعی (Dem) که از تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 تهیه شد (نقشه‌های شیب دامنه، جهت شیب و طبقات ارتفاعی)، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰خرم‌آباد و مطالعات میدانی (نقشه زمین‌شناسی منطقه)، تفسیر شاخص NDVI و مطالعات میدانی (کاربری اراضی)، نقشه توپوگرافی (آبراهه و خطوط ارتباطی) و آمار بارندگی ایستگاه‌های اطراف حوضه (بارش)؛ استفاده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

در این تحقیق پس از تهیهٔ نقشه عوامل مختلف از روش منطق فازی به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شده است. منطق فازی بر پایه فازی‌سازی لایه‌ها و مرحله استنتاج فازی استوار است. برای استفاده از فاکتورهای تأثیرگذار در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سیستم فازی باید خصوصیات آن‌ها تعیین شود، بدین‌منظور نقشهٔ این عوامل با نقشهٔ پراکنش لغزش‌های حوضهٔ تلفیق و نسبت فراوانی برای هر کلاس محاسبه شده است. برای تعیین نسبت فراوانی هر یک از طبقات عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، ابتدا با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی درصد پیکسل‌های لغزشی و فاقد لغزش منطقه بررسی شده تعیین و سپس نسبت فراوانی برای هر یک از طبقه‌های عوامل از تقسیم نسبت درصد پیکسل‌های لغزشی به درصد پیکسل‌های غیرلغزشی محاسبه شد. اگر نسبت فراوانی بزرگ‌تر از یک باشد هم‌بستگی عامل مؤثر بر لغزش بسیار زیاد و اگر این مقدار کم‌تر از یک باشد این هم‌بستگی بسیار ضعیف است.

فازی‌سازی: عملیات فازی‌سازی، ورودی‌ها را گرفته و با توابع عضویت مربوط، یک درجه مناسب به هر یک نسبت می‌دهد [۱٤]. تابع عضویت را می‌توان به‌صورت درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیرمجموعه‌های آن تعریف کرد و به‌صورت $\mu c(X)$ نمایش داده می‌شود. برای به‌دست آوردن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل‌گیری و تعریف تابع عضویت می‌تواند مؤثر باشد. در این تحقیق با استفاده از تابع عضویت Userdefined نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر لغزش به نقشه‌های فازی تبدیل شده‌اند.

استنتاج فازی: در استنتاج فازی، خروجی با توجه به توابع عضویت تعریف شده، برآورد قواعد و محاسبه نتیجهٔ فازی به‌دست می‌آید. برای طراحی شبکه استنتاج فازی روش‌ها و عملگرهایی مانند اشتراک فازی و اجتماع فازی، ضرب جبری، جمع جبری و گامای فازی استفاده می‌شوند که در این تحقیق از عملگر گامای فازی استفاده شده است (رابطهٔ ٤).

$$\mu_{combination} = (\prod_{i=1}^{n} \mu(x))^{\gamma} \times (1 \prod_{i=1}^{n} (1-\mu(x))).^{1-\gamma} \qquad (٤)$$

این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبر فازی و حاصل جمع جبری فازی تعریف می‌شود که در آن γ پارامتر انتخاب شده در محدودهٔ (۰ و ۱) است. وقتی γ برابر ۱ باشد ترکیب همان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

جمع جبری فازی است و وقتی y=0 باشد ترکیب اصلی برابر با حاصل ضرب جبری فازی است.

ارزیابی روش استفاده شده: برای ارزیابی نقشه تهیه شده بر اساس روش منطق فازی، با تلفیق نقشه نقاط لغزشی و نقشه خطر زمین‌لغزش، مقدار لغزش‌ها در طبقات مختلف خطر محاسبه و در مرحلهٔ بعد با استفاده از رابطهٔ (۵) میزان دقت مدل بر حسب درصد محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{KS}{S} \quad (۵)$$

در این رابطه، P: احتمال تجربی، KS: مساحت لغزش یافته در رده‌های خطر متوسط به بالا و S: مساحت کل لغزش‌های منطقه است. هرچه احتمال تجربی مدل استفاده شده به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

بررسی نوزمین‌ساخت منطقه

شاخص‌های مورفوتکتونیکی در سال‌های اخیر یکی از ابزارهای مهم برای شناسایی و تعیین میزان فعالیت زمین‌ساختی در مناطق فعال به‌شمار می‌روند. در پژوهش‌های مورفوتکتونیک، استفاده از نرم‌افزارهای سنجش از دور که به‌صورت خودکار شاخص‌ها را محاسبه می‌کنند اهمیت به‌سزایی دارد. زیرا با وجود چنین نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای، در صورتی‌که کاربر در روند محاسبات سهیم شود همواره دو مسئله خطا و زمان طولانی محاسبات، مانع از حصول نتایج قطعی می‌شود.

شاخص گرادیان طول رودخانه (SL): این شاخص به تغییرات شیب رودخانه حساس و وابسته بوده است که این وابستگی و حساسیت می‌تواند، معیار و برآوردی از میزان ارتباط موجود بین فعالیت‌های زمین‌ساختی و هم‌چنین توپوگرافی مسیر را ارائه کند [۱۵]. بر این اساس، تغییر در شیب یا گرادیان رودخانه می‌تواند SL را تغییر دهد. چنان‌چه بر اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی بستر رودخانه با بالاآمدگی و افزایش ارتفاع همراه شود، به طبع شیب بستر آن رودخانه تغییر می‌کند و این مسئله باعث تغییر در مقدار شاخص SL می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

روش‌های اندازه‌گیری شاخص گرادیان طولی رودخانه متفاوت است، ولی بهترین روش اندازه‌گیری، استفاده از پروفیل طولی آبراهه اصلی است [۱٦]. در منطقهٔ بررسی شده شاخص SL، در ۵ نقطه برای آبراهه اصلی در جاهایی که شیب نی‌مرخ تغییر پیدا می‌کند محاسبه شد (شکل ۵) که بزرگ‌ترین عدد به‌دست آمده نشان‌دهندهٔ شاخص SL آن رودخانه است (جدول ۱). بر اساس نتایج به‌دست آمده از شاخص گرادیان طولی رودخانه منطقهٔ بررسی شده در کلاس تکتونیک فعال قرار دارد.



شکل ۵. نیم‌رخ طولی آبراهه اصلی حوضهٔ وارک

جدول ۱. نتایج به‌دست آمده از بررسی شاخص گرادیان طولی رودخانه در حوضهٔ وارک

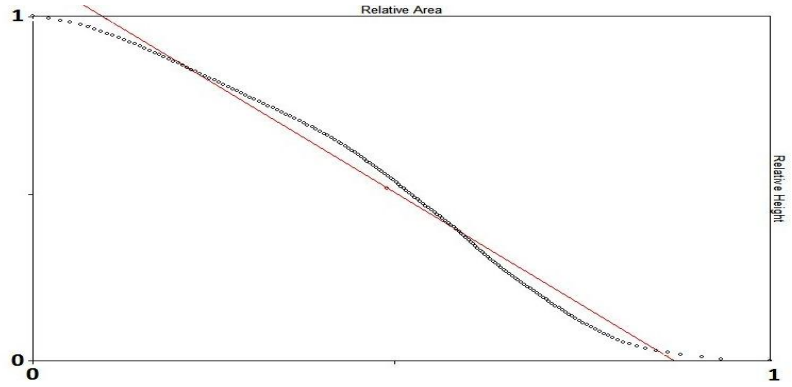
شماره نقطه	ΔH (m)	ΔL (m)	L (m)	SL
۱	۱۸۰	۱۵۵۰	۲۰۰۰	۲۳۲/۲۵
۲	۲۵۰	۸۰۰	۹۰۰۰	۲۸۱۲/۵
۳	۲۹۰	۱۳۰۰	۱۰۲۰۰	۲۲۷۵/۳
٤	۲٤۰	۷۰۰	۱۲۰۰۰	٤۱۱٤/۲
۵	۲۱۰	۱٦۰۰	۱٤٦۵۰	۱۹۲۲/۸

شاخص پیچ و خم رودخانه (S): هرچه شاخص S بیش‌تر باشد نشان می‌دهد که رودخانه به‌حالت تعادل نزدیک شده است و در نتیجه میزان فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه پایین‌تر است [۱۷]. بنابراین در بررسی این شاخص با مشاهده سیمای کلی رودخانه چنان‌چه میزان پیچ و خم زیاد باشد اولین نتیجه مورفوتکتونیکی می‌تواند پایدار بودن نسبی منطقه از نظر فعالیت‌های زمین‌ساختی باشد. در منطقهٔ بررسی شده با محاسبه پارامترهای شاخص پیچ و خم رودخانه (طول رودخانه برابر با ۲۰۵۰۰ متر و طول رودخانه در خط مستقیم برابر ۱۷۹۰۰ متر)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

مقدار شاخص S ، ۱/۱٤ برآورد شده است که نشان می‌دهد حوضهٔ وارک دارای تکتونیک فعال است.

شاخص منحنی هیپسومتری (HC): این منحنی برای بیان پراکندگی ارتفاعات در پهنای یک حوضهٔ آبریز به‌کار برده می‌شود، بنابراین به‌کمک این شاخص تغییرات نسبی ارتفاع به مساحت پهنهٔ بررسی شده تحت بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ٦ منحنی هیپسومتری حوضهٔ آبریز نشان می‌دهد که منطقهٔ بررسی شده در مرحله جوانی است. هم‌چنین تحدب در منحنی بی‌بعد هیپسومتری نشان‌دهندهٔ غلبه فعالیت نو زمین‌ساخت حوضه بر فعالیت‌های فرسایشی است در حالی‌که تقعر در منحنی نشان‌دهندهٔ غلبه فعالیت‌های فرسایشی بر فعالیت نوزمین‌ساختی است. با توجه به نوع شکل، می‌توان گفت که این حوضه از نظر نوزمین‌ساختی وضعیتی فعال دارد.

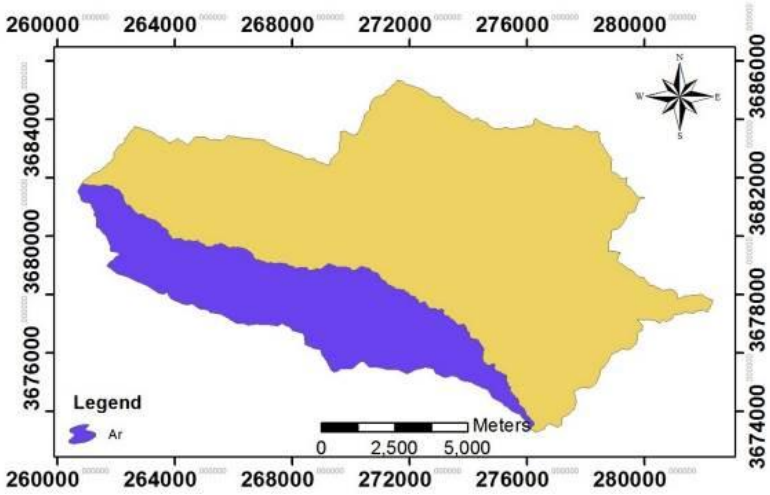


شکل ٦ منحنی هیپسومتری حوضه وارک

شاخص عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (AF): بررسی شکل هندسی شبکه آبراهه‌های موجود در حوضه، اساس تعیین این شاخص و متناسب با بررسی میزان فعالیت زمین‌ساختی است. در مناطقی که میزان فعالیت‌های زمین‌ساختی زیاد باشد، عدم تقارن در هندسه آبراهه‌ها و حوضه آبریز قابل شناسایی و ردیابی است [۱۷]. بنابراین با استفاده از این شاخص، کج‌شدگی و عدم تقارن ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی در حوضه قابل تشخیص خواهد بود. چنان‌چه مقدار AF کم‌تر یا بیش‌تر از ۵۰ شود، حوضه تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی قرار گرفته و در این حالت عدم تقارن در حوضه رخ داده است. در چنین شرایطی در صورتی‌که مقدار AF بیش‌تر از ۵۰ شود، کج‌شدگی و بالاآمدگی مربوط به‌سمت راست است و چنان‌چه کم‌تر از ۵۰ شود،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

مربوط به‌سمت چپ حوضه خواهد بود (شکل ۷). برای توصیف زمین‌ساخت از تفاضل مقدار AF و عدد ۵۰ استفاده می‌کنند. در صورتی‌که حاصل قدرمطلق این تفاضل بیش از ۱۵ شود نشان‌گر مناطق فعال تکتونیکی، بین ۷ تا ۱۵ مربوط به مناطق نیمه‌فعال و کم‌تر از ۷ مربوط به مناطق غیرفعال است [۱۷]. در این تحقیق مقدار AF ، ۲۴/۴۲ و قدرمطلق تفاضل AF با عدد ۵۰، ۲۵/۵۸ محاسبه شده است که نشان‌دهندهٔ منطقه فعال زمین‌ساختی و کج‌شدگی در سمت چپ حوضه است.



شکل ۷. تعیین پارامترهای شاخص عدم تقارن در حوضهٔ وارک

شاخص نسبی زمین‌ساخت فعال (IAT): این شاخص از متوسط‌گیری رده شاخص‌های مورفوتکتونیکی حاصل می‌شود. در این حالت پس از بررسی شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی گسترهٔ بررسی شده و تعیین میزان فعالیت‌های هر شاخص، کلاس‌بندی یا اولویت‌بندی این فعالیت‌ها انجام می‌پذیرد (جدول ۲)[۸].

نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص زمین‌ساخت فعال نشان می‌دهد که منطقهٔ بررسی شده با مقدار IAT برابر با یک دارای زمین‌ساخت فعال است.

تهیه نقشه خطواره‌های منطقه

در این تحقیق هدف از پردازش داده‌ها اعم از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع شناسایی و استخراج شکستگی‌ها و گسل‌های حوضه وارک است. برای این منظور می‌توان از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

جدول ۲. محدوده تغییرات شاخص‌های مورفوتکتونیکی و رده‌بندی آن‌ها

شاخص مورفوتکتونیکی	کلاس فعالیت		
	زیاد (۱)	متوسط (۲)	کم (۳)
SL	۵۰۰<	۵۰۰-۳۰۰	۳۰۰>
VF	۱>	۱-۲	۲<
HC	جوان	بلوغ	پیر
S	۱/۱۵>	۱/۱۵-۱/۵	۱/۵<

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی حاصل از پردازش‌های ذکر شده استفاده کرد. در این مرحله تمامی لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار ArcGIS می‌شوند تا بتوان از هم‌پوشانی آن‌ها، نقشه شکستگی‌ها و گسل‌ها را تهیه کرد.

روی هر لایه اطلاعاتی پردازش شده یک‌سری خطواره قابل شناسایی است که به‌صورت چشمی قابل تشخیص هستند. پس از استخراج خطواره‌ها با مقایسه آن‌ها با ترکیبات باندی و نقشه‌های به‌دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و هم‌چنین نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه؛ خطواره‌های مربوط به شکستگی‌ها و گسل‌های از سایر خطواره‌ها جدا و نقشه ShapeFill آن‌ها تهیه شده است (شکل ۸).

به‌منظور ترسیم نمودار گل‌سرخی شکستگی و گسل‌ها از اکستنشن Polar-Plots در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است (شکل ۸). نتایج به‌دست آمده از این نمودار نشان داد که روند غالب شکستگی‌ها شمال غرب-جنوب شرق است که از روند حاکم بر منطقه پیروی می‌کنند.

تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

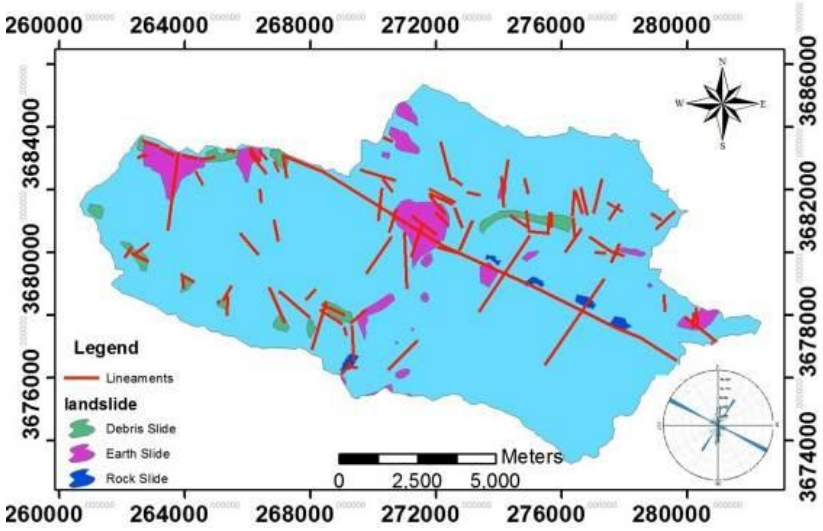
اولین گام در تهیهٔ نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، تهیهٔ نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در آن منطقه است. این نقشه مبنای تصمیم‌گیری‌های بعدی است. بدین‌منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر گوگل ارث زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده و مناطق مشکوک به لغزش در منطقه شناسایی شدند، از این رو، برای تکمیل اطلاعات و ثبت لغزش‌های جدید، بازدید صحرایی انجام شده و تمامی لغزش‌های مورد بازدید صحرایی قرار گرفت و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مطابق شکل ۸ تهیه شده است. بررسی میدانی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

زمین‌لغزش‌ها نشان‌دهندهٔ سه سازوکار زمین‌لغزشی در سطح منطقه است (جدول ۳).

جدول ۳. سازوکار زمین‌لغزش‌های حوضهٔ وارک

نوع زمین‌لغزش	مساحت (مترمربع)
Debris Slide	۲۵۹۸۸۰٤/٤٥
Earth Slide	۷۰۷٤۹۰۰/٥٤
Rock Slide	٦٦۷۷٥٥/٦۸



شکل ۸. نقشه خطواره‌ها و پراکنش زمین‌لغزش در حوضهٔ وارک

حرکت توده‌ای پدیده یا فرایندی مرکب و چند عامله است که وقوع آن از چند فرآیند متفاوت حاصل می‌شود. در این تحقیق برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه ۸ عامل بررسی شده است. این عوامل شامل شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، جاده و آبراهه هستند. به‌منظور استفاده از این لایه‌های اطلاعاتی در روش منطق فازی با استفاده از نسبت فراوانی تأثیر آن‌ها در رخداد لغزش‌های منطقه محاسبه شده است (جدول ٤). نتایج به‌دست آمده از بررسی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش با استفاده از نسبت فراوانی بدین‌شرح است:

نتایج بررسی کلاس‌های شیب نشان می‌دهد بیش‌ترین حساسیت نسبت به لغزش‌های رخ داده در منطقه؛ در کلاس بیش‌تر از ٤٥ درجه قرار دارد که با توجه به نوع ساز و کار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

لغزش‌ها (سقوط سنگ) می‌توان آن را توجیه کرد.

جدول ٤. تحلیل عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی

عامل	کلاس	درصد مساحت هر کلاس	درصد لغزش در هر کلاس	درصد مساحت غیرلغزشی هر کلاس	نسبت فراوانی
شیب	۵–۰	۲/۳۲	۱/٤۸	۲/۳۸	۰/٦۲
	۱۵–۵	۳۰/۹۲	۲۷/۲۷	۳۱/۲۱	۰/۸۷
	۲۵–۱۵	۳۹/۳۲	۳۲/۸٦	۳۹/۸٤	۰/۸۲
	۳۵–۲۵	۲۰/٦۰	۲۳/٤۲	۲۰/۳۷	۱/۱٤
	٤۵–۳۵	۵/٦۷	۱۱/۳۷	۵/۲۲	۲/۱۷
	٤۵<	۱/۱٤	۳/۵٦	۰/۹۵	۳/۷٤
زمین‌شناسی	رسوبات آبرفتی	۰/۳۷	۰	۰/٤۰	۰
	سازند گچساران	۷/۰۸	۸/٦۹	٦/۹۵	۱/۲٤
	سازند آسماری	٤٤/۸۳	٦٦/٦٦	٤۳/۰۸	۱/۵٤
	سازند کشکان	۲۹/۲۵	۲۱/۳۹	۲۹/۸۸	۰/۷۱
	سازند امیران	۱۸/٤۵	۳/۲٤	۱۹/٦٦	۰/۱٦
جهت شیب	مسطح	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۰۵	۰
	۰–۲۲/۵	۵/۷٤	٦/٦٤	۵/٦٦	۱/۱۷
	۲۲/۵–٦۷/۵	۱۱/۲۱	۱۱/۵۹	۱۱/۱۸	۱/۰۳
	٦۷/۵–۱۱۲/۵	۸/۵۰	۸/۹۲	۸/٤٦	۱/۰۵
	۱۱۲/۵–۱۵۷/۵	۱۲/۷۸	۱۸/۳۳	۱۲/۳٤	۱/٤۸
	۱۵۷/۵–۲۰۲/۵	۲٤/۳۸	۲۹/۳۸	۲۳/۹۸	۱/۲۲
	۲۰۲/۵–۲٤۷/۵	۲۱/۰۱	۱۵/۲٤	۲۱/٤۷	۰/۷۱
	۲٤۷/۵–۲۹۲/۵	۸/۳۷	۳/۲٦	۸/۷۸	۰/۳۷
	۲۹۲/۵–۳۳۷/۵	٤/۷۲	۲/۸۱	٤/۸۷	۰/۵۷
	۳۳۷/۵–۳٦۰	۳/۲٤	۳/۷۹	۳/۲۰	۱/۱۸
فاصله از	۰–۱۰۰	۳۲/۹۰	۲۲/۷٤	۳۳/۷۱	۰/٦۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

عامل	کلاس	درصد مساحت هر کلاس	درصد لغزش در هر کلاس	درصد مساحت غیرلغزشی هر کلاس	نسبت فراوانی
آبراهه	۱۰۰–۲۰۰	۲۳/۲۲	۲۰/۶۲	۲۳/۴۳	۰/۸۸
	۲۰۰–۳۰۰	۱۸/۳۷	۲۲/۱۷	۱۸/۰۷	۱/۲۲
	۳۰۰–۴۰۰	۱۰/۹۰	۱۵/۰۶	۱۰/۵۷	۱/۴۲
	۴۰۰<	۱۴/۵۸	۱۹/۳۸	۱۴/۲۰	۱/۳۶
فاصله از جاده	۰–۱۰۰	۸/۴۰	۵/۹۷	۸/۵۹	۰/۶۹
	۱۰۰–۲۰۰	۶/۶۱	۵/۸۶	۶/۶۷	۰/۸۷
	۲۰۰–۳۰۰	۶/۷۹	۷/۰۲	۶/۷۷	۱/۰۳
	۳۰۰–۴۰۰	۵/۵۹	۶/۲۱	۵/۵۴	۱/۱۲
	۴۰۰<	۷۲/۵۹	۷۴/۹۲	۷۲/۴۰	۱/۰۳
کاربری اراضی	جنگل پر تراکم	۵/۶۹	۳/۶۱	۵/۸۶	۰/۶۱
	جنگل کم تراکم	۲۶/۷۹	۲۱/۷۷	۲۷/۱۹	۰/۸۰
	اراضی زراعی	۱۰/۷۱	۸/۶۷	۱۰/۸۷	۰/۷۹
	جنگل با تراکم متوسط	۴۱/۵۵	۴۲/۸۶	۴۱/۴۴	۱/۰۳
	اراضی مرتعی	۸/۳۵	۲۰/۷۱	۷/۳۷	۲/۸۰
	بیشه و بوته‌زار	۶/۸۸	۲/۳۶	۷/۲۴	۰/۳۲
طبقات ارتفاعی	۸۹۳–۱۲۷۵	۱۱/۹۹	۰/۲۳	۱۲/۹۳	۰/۰۱
	۱۲۷۵–۱۶۵۷	۲۰/۷۷	۱۸/۵۵	۲۰/۹۴	۰/۸۸
	۱۶۵۷–۲۰۳۹	۳۱/۵۵	۳۷/۶۸	۳۱/۰۷	۱/۲۱
	۲۰۳۹–۲۴۲۱	۲۹/۵۳	۳۷/۸۱	۲۸/۸۷	۱/۳۰
	۲۴۲۱–۲۸۰۳	۶/۱۳	۵/۷۱	۶/۱۷	۰/۹۲
بارش	۴۸۴–۵۶۹	۱۷/۰۵	۳/۰۲	۱۸/۱۷	۰/۱۶
	۵۶۹–۶۵۴	۹۸/۲۹	۲۹/۴۰	۳۰/۰۳	۰/۹۷
	۶۵۴–۷۳۹	۴۱/۴۴	۵۳/۳۸	۴۰/۴۹	۱/۳۱
	۷۳۹–۸۲۴	۱۱/۵۱	۱۴/۱۹	۱۱/۳۰	۱/۲۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

بررسی نتایج به‌دست آمده از زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد به‌دلیل جنس سازند آسماری (آهک)، این سازند حساسیت بیش‌تری در برابر زمین‌لغزش دارد.

نتایج به‌دست آمده از کاربری اراضی نشان داد که بیش‌ترین حساسیت به لغزش در واحد اراضی مرتعی وجود دارد که این امر ناشی از نقش انسان در تغییر اکوسیستم و چرای بی‌رویه دام‌ها است.

بررسی جهات جغرافیایی نسبت به پراکندگی لغزش‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین حساسیت به زمین‌لغزش در جهات جنوب و جنوب شرق است که این امر به‌دلیل تبخیر زیاد و وجود سیکل مرطوب و خشک شدن مصالح در این جهت‌های جغرافیایی است.

بررسی طبقات ارتفاعی نشان می‌دهد که بیش‌ترین حساسیت به طبقات با ارتفاع متوسط تعلق دارد و با افزایش ارتفاع به دلیل تأثیر کم‌تر سایر عوامل این مقدار کاهش می‌یابد.

بررسی طبقات بارندگی نشان می‌دهد که بیش‌ترین حساسیت نسبت به لغزش در طبقات با بارندگی بیش‌تر وجود دارد. علت این امر را می‌توان به افزایش فشار آب منفذی و نقش انحلالی بارندگی نسبت داد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیش‌ترین حساسیت عوامل فاصله از جاده و آبراهه در کلاس ٤۰۰-۳۰۰ متر قرار دارد. این امر نشان می‌دهد که این عوامل تا حدودی تحت تأثیر سایر پارامترها هستند.

پس از محاسبه نسبت فراوانی، مرحلهٔ فازی سازی لایه‌ها با استفاده از تابع عضویت User defined و بر اساس نسبت‌های فراوانی نرمال‌سازی شده انجام گرفته است. از مزیت‌های تابع عضویت Userdefined نسبت به سایر توابع در نظر گرفتن بیش از چهار نقطه عطف یا کنترل است. در این تحقیق به‌منظور هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی از عملگر گامای فازی ۰/۹ استفاده و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های حوضهٔ وارک تهیه شده است (شکل ۹). بر اساس نتایج به‌دست آمده به‌ترتیب ۱۲/٤۰، ۸/۲۵، ۳۷، ۳۲/٦۱ و ۹/۷۳ درصد از مساحت حوضه در کلاس‌های خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد.

ارزیابی نتایج: به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش منطق فازی، پس از تهیهٔ نقشه نقاط لغزشی، با تلفیق آن با نقشه خطر زمین‌لغزش‌های منطقه؛ مساحت لغزش در هر کلاس خطر تعیین و با استفاده از رابطهٔ (۵) دقت مدل استفاده شده برآورد شده است (جدول ۵). نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش استفاده شده دقت زیادی در پهنه‌بندی خطر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

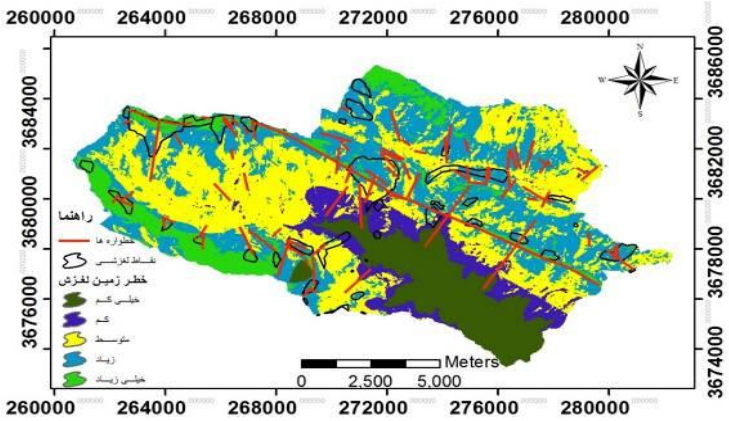
زمین‌لغزش‌های منطقه دارد.

بررسی ارتباط خطواره‌ها با نقشه خطر زمین‌لغزش

به‌منظور بررسی ارتباط خطواره‌ها و نقشهٔ خطر زمین‌لغزش به‌عنوان پارامترهایی که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی منطقه قرار دارند؛ نقشهٔ خطواره‌ها با نقشهٔ خطر زمین‌لغزش منطقه تلفیق شده است. بر اساس شکل ۹ غالب خطواره‌هایی که در محدودهٔ بررسی شده شناسایی شده‌اند، دارای روند شمال غرب–جنوب شرق هستند که هم‌روند با چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های اصلی منطقه و زاگرس هستند. از این‌رو می‌توان عنوان کرد خطواره‌ها تحت تأثیر سازوکار گسل‌ها و چین‌خوردگی‌های منطقه است و با توجه به تراکم خطواره‌ها در جاهایی که در معرض زمین‌لغزش قرار دارند، می‌توان ارتباط تنگاتنگ خطواره‌ها و پدیده زمین‌لغزش را درک کرد.

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از ارزیابی روش منطق فازی

کلاس خطر	تعداد پیکسل‌های لغزش در هر کلاس (ابعاد ۳۰*۳۰ متر)	درصد لغزش در هر کلاس خطر	دقت (درصد)
خیلی کم	۲۹	۰/۲۵	۹۵/۷
کم	٤٦٣	٤/٠٤	
متوسط	۲٤۹۱	۲۱/۷۳	
زیاد	٥٥۸۳	٤۸/۷۲	
خیلی زیاد	۲۸۹۳	۲٥/۲٤	



شکل ۹. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ وارک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

نتیجه‌گیری

محاسبه شاخص‌های ژئومورفولوژیکی یکی از مهم‌ترین ابزارهایی است که برای بررسی میزان فعالیت تکتونیکی یک منطقه به‌کار می‌رود. در این پژوهش شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه (SL)، منحنی هیپسومتری حوضه (HC)، پیچ و خم رودخانه (S) و عدم تقارن حوضهٔ زهکشی (AF) برای بررسی تکتونیک فعال حوضهٔ وارک محاسبه شد و از میانگین‌گیری شاخص‌های مذکور، شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی، حوضهٔ وارک دارای زمین‌ساخت فعال است که در اثر آن شاهد بالاآمدگی در قسمت‌هایی از سطح حوضه و هم‌چنین کج‌شدگی در قسمت جنوبی منطقه هستیم.

در این تحقیق پس از بررسی زمین‌ساخت منطقه به بررسی و ارتباط خطواره‌ها و نقشه خطر زمین‌لغزش به‌عنوان دو پدیدهٔ متأثر از زمین‌ساخت فعال پرداخته شد. بررسی خطواره‌های منطقه نشان می‌دهد که روند غالب شکستگی‌ها شمال غرب–جنوب شرق است و از روند حاکم بر منطقه پیروی می‌کنند. هم‌چنین بررسی ارتباط خطواره‌ها با نقشهٔ خطر زمین‌لغزش‌های منطقه نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی بین خطواره‌ها و پهنه‌های با خطر لغزش زیاد برقرار است.

به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ وارک با استفاده از ۸ عامل شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، جهت‌شیب، ظبقات ارتفاعی، بارش، جاده و آبراهه، از عملگر گامای فازی استفاده شده است. ارزیابی روش فازی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ وارک نشان‌دهندهٔ دقت زیاد (۹۵/۷ درصد) این روش است. بر اساس نتایج حاصل از عملگر گامای فازی بیش از ٤۲ درصد از کل گستره منطقه در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارد. با توجه به این‌که نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ابزاری برای پیش‌بینی و احیاناً پیش‌گیری از وقوع زمین‌لغزش‌ها هستند، پیشنهاد می‌شود نقشه تهیه شده به‌منظور برنامه‌ریزی برای هرگونه فعالیت عمرانی و تغییر کاربری اراضی به‌وسیلهٔ مسئولان مربوط به‌کار گرفته شود.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد و در قالب طرح

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

پژوهشی به انجام رسیده است. از این رو، به موجب همکاری صمیمانه معاونت پژوهشی این دانشگاه، نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را نسبت به ایشان ابراز می‌دارند.

منابع

۱. رامشت م.ح.، سیف ع.، شاه‌زیدی س.س.، انتظاری م.، "تأثیر تکتونیک جنبا بر مورفولوژی مخروطه افکنه درختنگان در منطقه شهداد کرمان"، نشریهٔ جغرافیا و توسعه، ۷ (۱۶) (۱۳۸۸) ۲۹-٤٦.

2. Wallace R. E., "Profiles and ages of young fault scarps north central Nevada", Geological Society of America Bulletin, 6 (1977) 114-132.

۳. جباری ن.، ثروتی م.ر.، حسین‌زاده م.م.، "مورفوتکتونیک فعال حوضهٔ آبریز حصارک با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک"، فصلنامهٔ پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲ (۱۳۹۱) ۱۷-٤۳.

٤. سامانی ب.، متین ن.، چرچی ع.، "تحلیل مورفوتکتونیکی گسل قره (جنوب شرق شیراز)"، دومین همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز (۱۳۹٤).

۵. عزتی م.، آق‌آتابای م.، "تحلیل زمین‌ساخت فعال حوضهٔ بجنورد با کمک شاخص‌های مورفوتکتونیکی"، نشریهٔ پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲ (٤) (۱۳۹۳) ۱٤٤-۱۳۰.

٦. میرنظری ج.، شهابی ه.، خضری س.، "ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل AHP و عملگرهای منطق فازی در حوضهٔ آبریز پشت تنگ سرپل ذهاب (استان کرمانشاه)"، نشریهٔ جغرافیا و توسعه، ۱۲(۳۷) (۱۳۹۳) ۵۳-۷۰.

۷. جمال‌آبادی ج.، زنگنه‌اسدی م.ع.، امیراحمدی ا.، "بررسی عوامل مؤثر در پیدایش و تکامل مخروط‌افکنه‌های دامنه‌های جنوبی ارتفاعات جغتای با تأکید بر نقش تکتونیک (در محدوده غرب سبزوار)"، نشریهٔ جغرافیا و توسعه، ٤۷ (۱۳۹٦) ٦۹-۸۸.

8. Hamdouni R., Irigaray C., Fernandez T., Chacon J., Keller E. A., "Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain)", Geomorphology, 969 (2008) 150-173.

9. Wei dong W., Cui-ming X., Xiang-gang D., "Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory", Mining Science and Technology, 19 (2009) 0399-0404.

10. Abdullah A., Nasser S., Ghaleeb A., "Landsat ETM-7 for Lineament

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]

Mapping using Automatic Extraction Technique in the SW part of Taiz area, Yemen", Global Journal of HUMAN SOCIAL SCIENCE Geography, Geo Sciences, Environmental & Disaster Management, 13 (3) (2013) 34-38.

11. Sharma S., Sarma N. J., "Application of drainage basin morphotectonic analysis for assessment of tectonic activities over two regional structures of the northeast India", Journal of the Geological Society of India, 89 (3) (2017) 271-280.
12. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J., "Remote Sensing and Image Interpretation", New York, John Wiley, 7 edition (2015) 736.

۱۳. پیرنظر م.، زند کریمی آ.، **"راهنمای کاربردی نرم‌افزار ENVI و پردازش تصاویر ماهواره ای"**، انتشارات ناقوس، (۱۳۹٤) ۲٤۲.

۱٤. مهجوری ر.، "سنجش توزیع مکانی سوانح آتش‌سوزی، تعیین بهترین محل ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مسیر بهینه با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی و منطق فازی در شهر اهواز"، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ علوم دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۹۱) ۱۱٤.

15. Molin P, Pazzaglia F. J, Dramis F., "Geomorphic Expression of Active Tectonics in a Rapidly Deforming Arc, Sila Massif, Calabria, Southern Italy", American Journal of Science, 304 (7) (2004) 559-589.
16. Burbank D. W., Anderson R. S., "Tectonic Geomorphology", 2nd Edition, Wiley E-Text (2011) 472.
17. Keller E. A., Pinter N., "Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape", Prentice Hall, New Jersey (1996) 359.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.5.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.237]