نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

صفحات ۱۱۳ - ۱۳۰

مدل‌سازی آماری- فضایی پتانسیل رخداد زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد یامچی

فهیمه پورفراش‌زاده؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

فریبا بیگی‌پور مطلق؛ دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مرتضی قراچورلو؛ دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تبیین سیستمی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در جهت ارائه مدل پیش‌بین احتمال رخداد آن در حوضه آبخیز یامچی واقع در استان اردبیل انجام گرفت. در این راستا، از هر دو رویکرد متغیرهای گسسته و پیوسته، به ترتیب از طریق عملیات هم‌پوشانی و رگرسیون لجستیک استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت دامنه، لیتولوژی، بارندگی سالانه، ناهمواری، انحناء زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری و پوشش زمین، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده بود. در وهله نخست، انطباق لایه‌های متغیرهای مستقل با لایه زمین‌لغزش‌های موجود در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقاط دارای پتانسیل بالا برای رخداد زمین‌لغزش‌ها را آشکار ساخت. این نقاط در ارتفاعات میانی، شیب‌های زیاد، جهت دامنه شمالی، گودی‌ها، ناهمواری بالا، رسوبات فرسایش‌پذیر (کواترنری)، بارندگی‌های بالا، پوشش گیاهی متوسط، پیرامون گسل‌ها و رودها قرار داشتند. در وهله دوم، نتایج اجرای مدل رگرسیون لجستیک با ارائه معادله پیش بین احتمال رخداد زمین‌لغزش نشان داد که مدل حاصل با داشتن $Pseudo\ R^2$ و ROC به ترتیب برابر با ۰/۲۲ و ۰/۸۶، از توان و کارایی خوبی جهت پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در سطح حوضه برخوردار بود. به‌علاوه ضرایب بتای حاصل برای متغیرهای مستقل نشان داد که ترتیب اهمیت متغیرها در وقوع زمین‌لغزش بدین صورت بود: شاخص پوشش گیاهی، فاصله از جاده، بارندگی، لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص ناهمواری، جهت دامنه، شیب، فاصله از رود. در پایان، لزوم توجه جدی به حفاظت و حمایت از پوشش گیاهی مراتع میان‌دست و بالادست حوضه با توجه به شرایط ژئومورفیک ناپایدار این نقاط مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لغزش، مخاطره، مدل رگرسیون لجستیک، یامچی.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که موجب تغییرات جدی در مورفولوژی زمین شده و به سازه‌های طبیعی و مصنوعی در روی زمین خسارت وارد می‌سازد (Kavzoglu *et al*., 2014: 425). زمین‌لغزش‌ها ممکن است منجر به مرگ و میر و ایجاد خسارات به تسهیلات زیربنایی، زمین‌های کشاورزی و دارایی‌های عمومی و شخصی شوند (Sujatha & Sridhar, 2021: 2). طبق اذعان سازمان یونسکو، زمین‌لغزش به عنوان یک مخاطره زمین‌شناختی جهانی، نزدیک به ۱۴ درصد تلفات انسانی ناشی از مخاطرات طبیعی را شامل می‌شود (Froude *et al*., 2018: 2161). از طرفی، بروز پدیده گرمایش جهانی به واسطه افزایش فرکانس و شدت حوادث بارشی شدید و راه‌اندازی زمین‌لغزش‌ها بر نگرانی‌ها افزوده و طبق تحقیقات Garriano & Guzzetti (۲۰۱۶) پیش‌بینی می‌شود به تبع تغییر اقلیم در آینده افراد بیشتری در معرض خطر زمین‌لغزش قرار گیرند. ناپایداری دامنه یا زمین‌لغزش در ایران نیز به دلیل وجود شرایط متنوع زمین‌شناسی، توپوگرافی، آب و هوایی و کاربری زمین از یک طرف و فرسایش قابل‌توجه آنتروپوژنیک در نواحی شهری و روستایی از طرف دیگر، در خور توجه جدی است (کیانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۶). سهم خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (بابلی موخر و همکارن، ۱۳۹۷: ۱۸۸).

رشد سریع جمعیت، گسترش شهرها در نواحی کوهستانی، مشکل بودن پیش‌بینی زمان رویداد زمین‌لغزش و متعدد بودن عامل‌های مؤثر در رویداد این پدیده، ضرورت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را آشکار می‌سازد (خالدی و همکاران، ۱۳۹۱: ۶۶). پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی و قطعات مجزایی با درجات حساسیت از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌کند. این کار بر اساس ویژگی‌های طبیعی موثر بر زمین‌لغزش چون زمین‌شناسی، هیدروکلیما، ژئومورفولوژی، کاربری و پوشش زمین و از طریق مدل‌سازی آماری- فضایی داده‌ها واطلاعات محیطی صورت می‌گیرد. نقشه‌های نهایی پیش‌بینی و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع حرکات توده‌ای به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی آتی مدیریت منابع طبیعی (حفاظت خاک، ممانعت از تخریب جنگل و مرتع، درختکاری و ...)، برنامه‌ریزی توسعه فیزیکی (شناخت نواحی مستعد ساخت و ساز، نواحی مستعد انتقال و جابه‌جایی روستا)، نواحی مستعد عبور خطوط و مسیرهای انتقال نیرو و نیز برنامه‌ریزی توریستی مورد استفاده می‌باشد (کرم و محمودی، ۱۳۸۴: ۱۳).

جهت ارزیابی پتانسیل و استعداد زمین‌لغزش از روش‌های مختلف آماری، جبری، و اکتشافی استفاده می‌شود که از میان آن‌ها، روش‌های آماری در تلفیق با تحلیل‌های مکانی بسیار رایج می‌باشند. Mathew et al. (2007) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک به بررسی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه Garhwal همیالایا پرداختند. نتایج کار نشان داد که در قسمت اعظم منطقه، شیب‌های بین ۳۵ تا ۶۰ درجه در معرض شکست دامنه هستند. به علاوه، متغیرهای پوشش گیاهی و توپوگرافی جزو مهم‌ترین متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش شناخته شدند.Simea & Todica (2012) روابط آماری - فضایی بین فراوانی زمین‌لغزش و پارامترهای فیزیکی سهیم در بروز زمین‌لغزش‌ها در حوضه Solca کشور رومانی را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان با ارائه نقشه حساسیت زمین‌لغزش دریافتند که نواحی مرکزی حوضه که شامل ارتفاعات میان‌دست بود، جزو مناطق با حساسیت بالا بود. Kavzoglu et al. (2014) جهت تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در استان Trabzon ترکیه از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک استفاده کردند. متغیرهای مستقل شامل لیتولوژی، شیب، پوشش زمین، جهت دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی، طول دامنه، ارتفاع و فاصله از جاده بودند. نتایج حاصل نشان داد که لیتولوژی و شیب، موثرترین متغیرها در

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

وقوع زمین‌لغزش بودند. Reichenbach *et al*. (2018) طی پژوهشی ارزنده، مروری بر روش‌های آماری مدل‌ساز حساسیت زمین‌لغزش داشت. ایشان پی بردند که تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای بین تحقیقات به لحاظ نوع داده‌های موضوعی، مقیاس، رویکرد مدل‌سازی و معیارهای ارزیابی مدل وجود دارد. چنین نتیجه گیری شد که کیفیت مدل آماری حساسیت بستگی به کیفیت و تناسب اطلاعات زمین‌محیطی مورد استفاده برای آن مدل دارد. Sujatha & Sridhar (2021) حساسیت زمین‌لغزش در منطقه Coonoor کشور هند را از طریق روش رگرسیون لجستیک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که موثرترین متغیرهای مستقل به ترتیب اهمیت عبارت بودند از: بارندگی سالانه، کاربری زمین، شیب. Pokharel et al. (2020) به تهیه نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش بر اساس واحدهای کاری شیب زمین و اجرای رگرسیون لجستیک در کشور نپال همت گماشتند. ایشان پی بردند که کارایی مدل رگرسیونی بستگی به تعداد لغزش‌ها و کامل بودن سیاهه مربوط دارد.

در کنار مطالعات خارج از کشور، ادبیات وسیعی در خصوص استفاده از روش‌های آماری – فضایی جهت ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت و خطر زمین‌لغزش در داخل کشور دیده می‌شود. در این‌جا جهت اختصار می‌توان به مطالعات خالدی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز طالقان؛ صمدزاده (۱۳۹۴) در ناحیه اردبیل ـ سرچم، خدایی و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه حاجیلرچای شهرستان ورزقان، خسروی و جمالی (۱۳۹۷) در شمال شهرستان قوچان، دارابی شهماری و صفاری (۱۳۹۸) در ارتفاعات شهرستان دالاهو، عبدی بسطامی و همکاران (۱۳۹۸) در شمال شرق خراسان؛ کیانی و همکاران (۱۴۰۰) در حوضه هشتجین اردبیل اشاره کرد که عمدتا از مدل رگرسیون لجستیک جهت ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش استفاده نموده‌اند.

با توجه به کارایی بیشتر روش رگرسیون لجستیک به لحاظ ارائه هم مدل پیش‌بین و هم آماره‌های مناسب ارزیابی مدل شامل مشخصه عملکرد نسبی (ROC) و شبه ضریب تعیین ($Pseudo\text{-}R^2$)، در پژوهش حاضر سعی گردید تا از تحلیل رگرسیون لجستیک جهت مدل‌سازی مکانی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش استفاده شود. مبانی روش‌شناختی رگرسیون لجستیک در مطالعات Bai et la., (2010)، Reichenbach *et al*. (2018)، Sujatha & Sridhar (2021)، خدایی و همکاران (۱۳۹۶)، دارابی شهماری و صفاری (۱۳۹۸) و عبدی بسطامی و همکاران (۱۳۹۸) قابل پی‌گیری است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل حوضه آبخیز سد یامچی واقع در استان اردبیل می‌باشد که یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز استان به لحاظ تامین آب مصارف مختلف کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. وقوع حرکات توده‌ای و از جمله زمین‌لغزش در گستره این حوضه به دلیل وجود شرایط مورفودینامیک فعال، جنبش‌های زمین‌ساختی، مجاورت و لایه‌بندی متناوب سازندهای سخت و نرم، بارندگی‌های نامنظم و رگباری شایع می‌باشد. فرسایش آنتروپوژنیک از طریق جاده‌سازی غیراصولی و نامتوازن با طبیعت، چرای بی‌رویه و تنزل کیفیت مراتع و .. نیز بر شدت و تعدد وقوع زمین‌لغزش‌ها و پیامدهای زیان‌بار اقتصادی – اجتماعی حاصل از از بروز این مخاطره افزوده است. وقوع زمین‌لغزش‌های ساری قیه و ایلانجیق در سال ۱۳۶۹ (طلایی و همکاران، ۱۳۹۸) و نیز زمین‌لغزش جاده نیر به سراب در سال ۱۳۸۴ (مددی و همکاران، ۱۳۸۶) نمونه‌های بارزی از این حوادث مخاطره‌بار بوده است که آسیب‌ها و خسارات جدی به جاده‌ها، خانه‌ها و مزارع و خطوط انتقال نیرو وارد ساخته است. این پژوهش با درنظر گرفتن اهمیت این موضوع، با هدف تحلیل و مدل‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش در گستره حوضه سد یامچی انجام گرفت تا از طریق شناساندن نقاط پرپتانسیل و کم‌پتانسیل به جهت رخداد زمین‌لغزش، و نیز تعیین اهمیت (سهم) هریک از عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش،

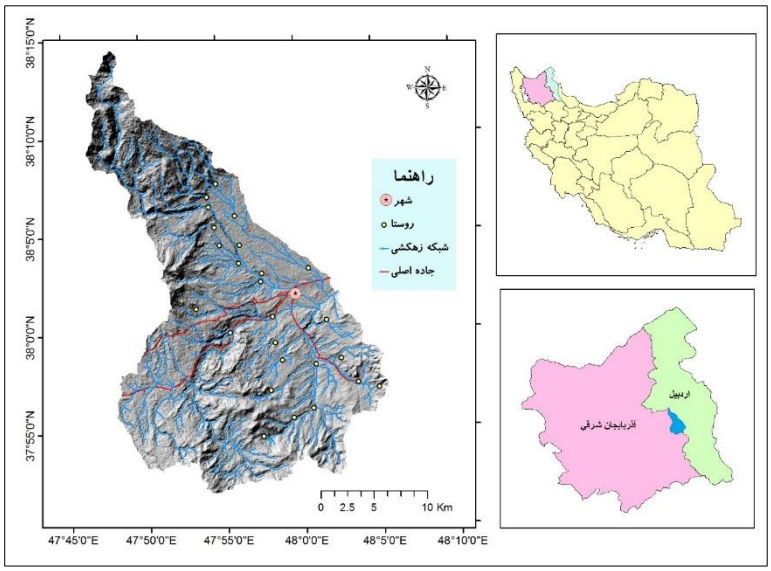
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

رهنمودهایی برای اتخاذ راهکارها و اقدامات مدیریتی مناسب جهت کنترل و کاهش اثرات زیان‌بار ناشی از مخاطره زمین‌لغزش در منطقه ارائه کرده باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد یامچی به وسعت ۵۶۷ کیلومترمربع، مابین استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی و حدود عرض‌های جغرافیایی "۲۲ '۵۱ °۳۷ تا "۵۸ '۱۴ °۳۸ شمالی و طول‌های جغرافیایی "۲۰ '۴۶ °۴۷ تا "۰۰ '۶ °۴۸ شرقی واقع شده است (شکل ۱). محدوده حوضه به لحاظ تقسیمات سیاسی شامل شهرستان‌های سرعین و نیر از استان اردبیل و سراب از استان آذربایجان شرقی می‌باشد. شرایط توپوکلیمایی حوضه یامچی به گونه‌ای است که سایر شرایط محیطی را تحت تاثیر خود قرار داده است. گره کوهستانی سبلان و بزغوش در غرب و کوه سبلان در شمال که سرشاخه‌های رودخانه بالیخلی از آن‌ها نشأت می‌گیرد، از همه سمت به غیر از سمت شرق آن را دربرگرفته و با توپوگرافی خشن و ناهموار خود از مورفودینامیک فعال و شرایط ناپایدار دامنه‌ها برخوردارند. عوارض ناپایدار ژئومورفیک قویا تحت تاثیر شرایط مورفوتکتونیکی و وجود گسلش‌های فراوان در سطح حوضه یامچی است. خود رودخانه بالیخلی در راستای گسلی با جهت جنوب شرق- شمال شرق جریان دارد. وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی متعدد و وجود چشمه‌های ترمال گویای زمین‌شناسی فعال حوضه می‌باشد. دامنه ارتفاعی زیاد حوضه (۱۵۵۰ تا ۴۳۶۰ متر از سطح دریا) همراه با شکست شیب‌های پیاپی (که خود راه‌انداز فرایندهای دامنه‌ای است)، باعث ایجاد نوسانات دمایی و بارشی زیاد و بروز فرایندهای کریوکلاستی، ترموکلاستی به‌ویژه در ارتفاعات بالا و مرز بین طبقات مورفوکلیمایی می‌شود. این رویدادها زمینه‌ساز هوازدگی و تخریب سنگ‌ها و فراهم شدن مواد لازم برای رخداد حرکات توده‌ای است. بارندگی‌های کافی با دامنه ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلیمتر به ایجاد رواناب بالا و فرسایش رودها به‌ویژه در دامنه‌های سبلان می‌انجامد. عملیات کشاورزی در زمین‌های پرشیب همراه با افت کیفی مراتع که ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه و نامتوازن با طبیعت است، به‌خصوص در جاهایی که رواناب فرساینده و فرایند زیربری رودخانه شایع است، یکی دیگر از عوامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه است که به جهت تمرکز جمعیتی، با خطرات و خسارات اقتصادی بیشتری همراه است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیای حوضه آبخیز سد یامچی (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

روش تحقیق

پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی و از نظر روش توصیفی ـ تحلیلی می‌باشد. منابع کتابخانه‌ای مورد استفاده شامل نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای لندست و گوگل ارث بود. جهت مدل‌سازی و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش از روش آماری رگرسیون لجستیک و با تکیه بر قابلیت نرم‌افزارهای GIS و IDRISI استفاده گردید. همچنین جهت آگاهی از تاثیرگذاری متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش، علاوه بر رگرسیون لجستیک (رویکرد کمی و پیوسته) از طبقه‌بندی ارزش‌های متغیرها (رویکرد کیفی و گسسسته) نیز کمک گرفته شد. متغیرهای مستقل جهت پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش شامل ۱۳ متغیر محیطی بدین ترتیب بود: ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص ناهمواری، انحناء عمومی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارندگی متوسط سالانه، کاربری و پوشش زمین، شاخص پوشش گیاهی NDVI.

- شاخص انحناء عمومی (GC). شاخص‌های انحناء زمین جزو شاخص‌های ثانویه‌ای هستند که از مدل رقومی ارتفاع (DEM) مشتق شده و گودی یا برآمدگی زمین را در ابعاد مختلف طولی و عرضی بازمی‌تابانند. در این بین، شاخص انحناء عمومی همان‌گونه که از نامش پیداست، یکی از رایج‌ترین انحناءها در تحلیل ژئومورفومتری محسوب می‌شود. این انحناء مقیاسی از تحدب چشم‌انداز است. مقادیر مثبت و منفی این شاخص به ترتیب نشانگر سطوح محدب و سطوح مقعر می‌باشد. مقدار صفر نیز به سطوح هموار اختصاص دارد.

- شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI). این شاخص سنجه‌ای از میزان رطوبت خاک بر پایه توپوگرافی محلی است. این شاخص بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$TWI = \ln(A_s / \tan(\beta))$$

که در آن As عبارت از مساحت تجمعی بالادست دامنه است (مساحت ویژه حوضه) و β زاویه شیب محلی است. سلول‌های با مقادیر TWI بالا معرف نم زارها و سلول‌های با مقادیر TWI پایین جزو پهنه‌های خشک محسوب می‌شوند (Agren et al. 2014: 4113).

- شاخص ناهمواری. این شاخص میزان ناهمواری و تلویحا مورفودینامیک پایدار یا ناپایدار یک محل را نشان می‌دهد. میزان ناهمواری سطح از طریق تفاضل ارتفاع ماکزیمم (Zmax) و مینیمم (Zmin) (متر) در پهنه آبخیز تقسیم بر جذر مساحت حوضه (A) آبخیز (مترمربع) محاسبه می‌شود. هر چه میزان این شاخص بیشتر باشد، ناهمواری سطح زمین بیشتر است (Olaya et al., 2009).

$$MRN = (Zmax - Zmin) \ / \ Sqrt(A)$$

- شاخص پوشش گیاهی (NDVI). شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده یکی از پرکاربردترین شاخص‌های گیاهی در برآورد میزان سبزینگی، سلامت و فراوانی پوشش گیاهی است. NDVI، تشعشع بازتابیده قرمز (RED) و مادون‌قرمز نزدیک (NIR) را طبق معادله زیر ترکیب می‌نماید:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

مقادیر این شاخص بین اعداد ۱+ و ۱- در نوسان است و ثابت شده هر چه به عدد ۱+ نزدیک شود، بر میزان پوشش گیاهی افزوده می‌شود (محمدیاری و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۷).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

مراحل انجام پژوهش بدین ترتیب بود که در ابتدا فهرستی از زمین‌لغزش‌های رخداده در سطح حوضه با استفاده از تصاویر بروز گوگل ارث مورد شناسایی و ترسیم قرار گرفت. سپس این نمونه‌ها با با سیاهه زمین‌لغزش متعلق به سازمان جنگل‌ها و مراتع و نیز نقشه زمین‌شناسی مطابقت داده شد. پس از تهیه نقشه سیاهه زمین‌لغزش، اقدام به استخراج و محاسبه متغیرهای مستقل در قالب لایه‌های رستری در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) گردید. در گام بعدی، هر یک از متغیرهای مستقل در قالب کلاس‌های ارزشی طبق جدول (۱) طبقه‌بندی شده و نقشه‌های حاصل به نوبت با لایه سیاهه زمین‌لغزش هم‌پوشانی داده شد تا ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته با رویکرد گسسته مشخص شود. تعیین طبقات متغیرها بر اساس مطالعات پیشین و با درنظر گرفتن دامنه مقادیر متغیرها صورت گرفت. در بخش دوم و رویکرد پیوسته، لایه‌های رستری متغیرهای مستقل و متغیر وابسته جهت انجام آزمون رگرسیون لجستیک فضایی وارد محیط نرم‌افزار IDRISI شد تا مدل پیش‌بینی پتانسیل رخداد زمین‌لغزش به دست آید.

جدول ۱- طبقات متغیرهای مستقل موثر بر رخداد زمین‌لغزش

متغیر مستقل	طبقات ارزشی متغیرهای مستقل					
ارتفاع (متر)	<۲۰۰۰	۲۴۰۰-۲۰۰۰	۲۸۰۰-۲۴۰۰	۳۲۰۰-۲۸۰۰	۳۶۰۰-۳۲۰۰	>۳۶۰۰
شیب (درجه)	<۵	۵-۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۴۰	>۴۰
جهت دامنه (درجه)	شمال	شرق	جنوب	غرب	-	-
انحناء عمومی	< (-۱/۸)	(-۱/۸) -(-۰/۵)	(-۰/۵)- (+۰/۵)	(+۰/۵)- (+۱/۸)	> (+۱/۸)	-
شاخص رطوبت توپوگرافی	< ۶	۸-۶	۱۰-۸	۱۵-۱۰	> ۱۵	-
شاخص ناهمواری	< ۱	۱-۲	۲-۴	۴-۶	> ۶	-
لیتولوژی	Qviv	Mvai	Qt1	Evbv	Qt2	Plms
بارندگی (میلی متر)	۴۵۰-۴۰۰	۵۰۰-۴۵۰	۵۵۰-۵۰۰	۶۰۰-۵۵۰	-	-
کاربری و پوشش زمین	مرتع	زراعت دیم	زراعت آبی	رخنمون سنگی	باغ	مسکونی
شاخص پوشش گیاهی	<۰/۱	۰/۲۵ - ۰/۱	۰/۳۵ - ۰/۲۵	۰/۵۵ - ۰/۳۵	> ۰/۵۵	-
فاصله از گسل (متر)	<۵۰۰	۱۵۰۰-۵۰۰	۲۵۰۰-۱۵۰۰	۵۰۰۰-۲۵۰۰	> ۵۰۰۰	-
فاصله از آبراهه (متر)	<۲۰۰	۴۰۰-۲۰۰	۶۰۰-۴۰۰	۱۰۰۰-۶۰۰	> ۱۰۰۰	-
فاصله از جاده (متر)	< ۲۰۰	۴۰۰-۲۰۰	۶۰۰-۴۰۰	۱۰۰۰-۶۰۰	> ۱۰۰۰	-

- روش رگرسیون لجستیک

مدل رگرسیون لجستیک به عنوان مدل تحلیلی چندمتغیره برای مدل‌سازی احتمال وقوع یک رویداد دوحالتی، حضور و عدم حضور عوامل مختلف و معنی‌داری این حضور یا عدم حضور است. نکته مهم در رگرسیون لجستیک این است که متغیر وابسته یک متغیر دوحالته است، یعنی این که می‌تواند فقط عدد صفر به معنی عدم وقوع و یک به معنی وقوع رویداد باشد. مزیت رگرسیون لجستیک این است که می‌توان از هر دو متغیرهای گسسته و پیوسته استفاده نموده و نیز نیازی به توزیع نرمال متغیرها نیست (Bai *et al.*, 2010: 25). در مورد تهیه نقشه پتانسیل یا احتمال وقوع زمین‌لغزش، هدف رگرسیون لجستیک، یافتن بهترین مدل برای تشریح روابط میان وقوع و یا عدم وقوع متغیر وابسته (زمین‌لغزش) و مجموعه گروه‌هایی از متغیرهای مستقل است. رگرسیون لجستیک از روش برآورد حداکثر احتمال (MLE) برای پیدا کردن بهترین مجموعه پارامترهایی که مدل را بهتر برازش می‌کنند، استفاده می‌کند. خروجی مدل، ضریب‌هایی بین ۰ و ۱ خواهد داشت که از طریق تئوری فازی به احتمالات بالاتر از ۰/۵ ارزش ۱ (تخریب) و کمتر از ۰/۵ ارزش صفر (بدون

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

تخریب) می‌دهد و نقشه بولین رخداد را تولید می‌کند که احتمال یک بودن متغیر وابسته از منحنی لگاریتمی پیروی می‌کند و مقدار آن از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$P(y=1/X)=\exp(\sum BX)/1+\exp(\sum BX)$$

که در آن، P، احتمال یک بودن متغیر وابسته؛ X، متغیر مستقل؛ B، پارامتر برآوردشده و Y، همان متغیر وابسته است که در این‌جا، رخداد زمین‌لغزش می‌باشد. به منظور خطی‌سازی رابطه بالا، تغییر لگاریتمی روی آن صورت می‌گیرد و به صورت رابطه زیر درمی‌آید:

$$Log(P/1+P))=b_0+b_1x_1+b_2x_2+...+b_kx_k+e$$

این تغییر لگاریتمی سبب می‌شود احتمال پیش‌بینی‌شده در دامنه ۰ تا ۱ پیوسته باشد و خروجی مدل به صورت یک نقشه پیش‌بینی مکانی احتمال وقوع زمین‌لغزش ارائه شود. مدل حاصل با استفاده از درصدی از نقاط برگرفته از نقشه اولیه رخداد زمین‌لغزش (سیاهه زمین‌لغزش) و با استفاده از آماره‌های مشخصه عملکرد نسبی (ROC) و شبه‌ضریب تعیین ($Pseudo\text{-}R^2$) اعتبارسنجی می‌شود. $Pseudo\text{-}R^2$ مساوی با یک بیانگر برازش کامل و $Pseudo\text{-}R^2$ برابر با صفر به معنای عدم وجود رابطه معنادار بین متغیرهای مستقل و وابسته است. ROC آماره مناسبی برای ارزیابی اعتبار مدل است. هنگامی که بین نقشه واقعی و نقشه حاصل از شبیه‌سازی تطابق کامل وجود داشته باشد، شاخص ROC برابر با یک خواهد بود و در مواردی که تطابق مکانی دو نقشه کاملا تصادفی باشد مقدار ROC برابر با ۰/۵ می‌شود (زارع گاریزی و همکاران، ۱۳۹۱: ۶۲). درجه‌بندی اعداد حاصل برای ROC بدین صورت است: عالی (۱ – ۰/۹)؛ خوب (۰/۹- ۰/۸)؛ متوسط (۰/۷- ۰/۶)؛ و ضعیف (۰/۶- ۰/۵) (دارابی شهماری و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۷۳).

در اجرای مدل رگرسیون لجستیک، لازم است تمام عوامل موثر بر وقوع حرکات توده‌ای، کمی‌سازی شوند. عواملی چون لیتولوژی، کاربری و پوشش زمین، و جهت دامنه کیفی هستند و نیاز به کدهای معنی‌داری دارند که به جای کیفیت آن‌ها نوشته شود. بدین ترتیب، لایه‌های کیفی بر اساس میزان تاثیر بر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه به صورت صعودی یا نزولی مرتب شده و کددهی می‌شوند (دارابی شهماری و صفاری، ۱۳۹۸). سپس بر اساس همین درجات به صورت لایه‌های رستری درآمدند. در پروهش حاضر جهت اعمال روش رگرسیون لجستیک با رویکرد فضایی از قابلیت نرم‌افزار IDRISI بهره گرفته شد. منتها قبل از ورود متغیرهای مستقل به مدل لازم بود تا همسان‌سازی مقیاس در مورد آن‌ها صورت گیرد. این کار بر اساس فرمول زیر میسر گردید (قراچورلو و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۳۱).

$$X_{standardized}=\frac{x-\min(x)}{\max(x)-\min(x)}$$

که در آن، x، مقدار اولیه متغیر مورد نظر؛ min (x)، کمینه متغیر مزبور؛ و max (x)، بیشینه متغیر مزبور می‌باشد.

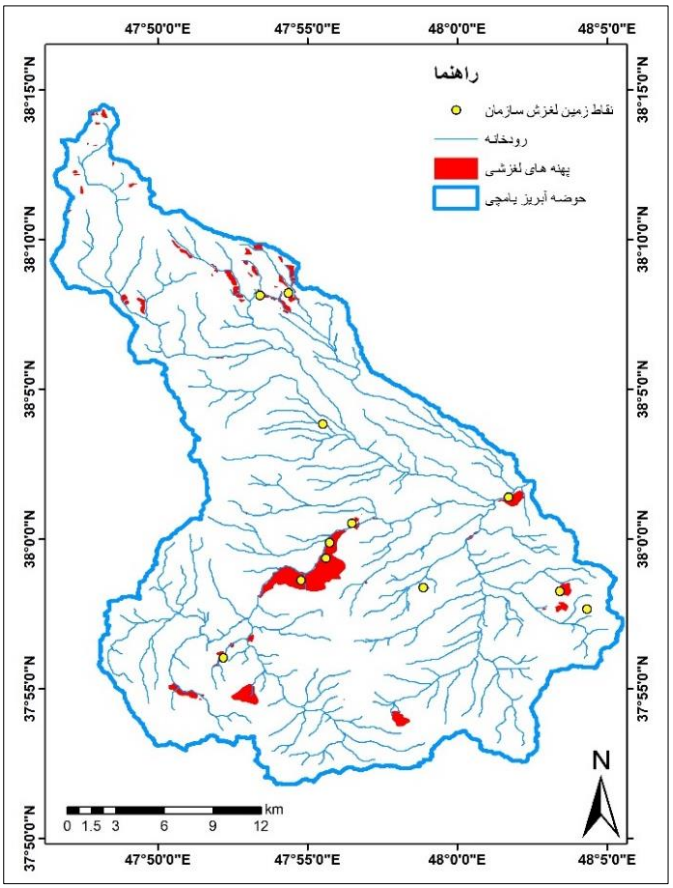
یافته‌های پژوهش

سیاهه زمین‌لغزش

نقطه شروع معمول در شناسایی نواحی مستعد زمین‌لغزش، ثبت و گزارش موقعیت و ویژگی‌های زمین‌لغزه‌های موجود است که راهگشای کشف مکان و علل رخداد زمین‌لغزش در ناحیه مورد مطالعه است. در حوضه آبخیز یامچی حدود ۸۵ پهنه لغزشی به صورت پولیگون از روی تصاویر گوگل ارث برداشت شد (شکل ۲). این پهنه‌ها با نقاط زمین‌لغزش مهم که توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع تهیه شده بود، مطابقت داشت. مساحت این توده‌های لغزشی از ۰/۰۶ تا ۵۷۱ هکتار

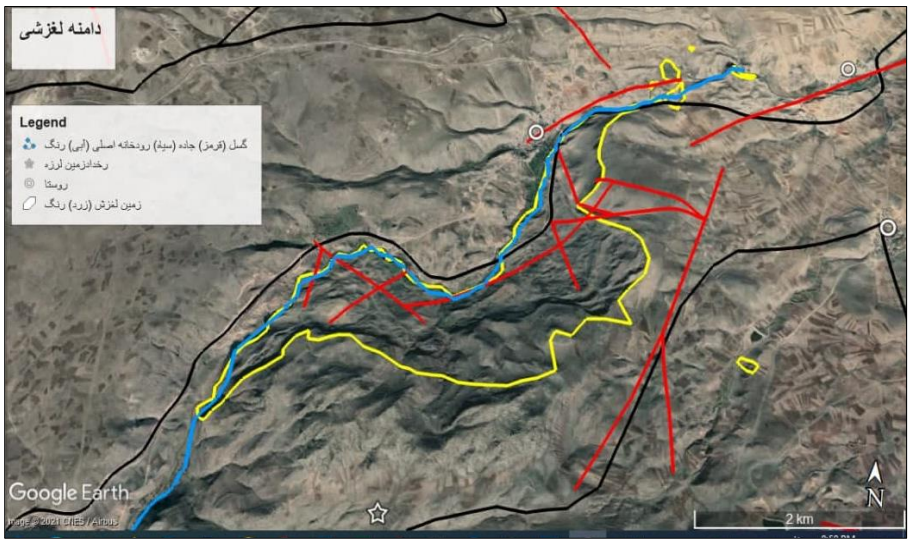
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

متغیر بوده و میانگین آن‌ها برابر با ۱۴ هکتار بود. البته تنها یک پهنه بزرگ که در واقع مجموعه‌ای از زمین‌لغزش‌های متعدد بود، با مساحت ۵۷۱ هکتار شناسایی و تعیین گردید و پس از آن بالاترین مساحت متعلق به پهنه لغزشی واقع در جنوب غرب حوضه به مساحت ۹۸ هکتار بود. نگاهی به مجموعه لغزشی واقع در میانه حوضه به لحاظ تاریخی و تبیین سازوکار وقوع زمین‌لغزش‌ها مهم می‌نماید. همان‌طور که از شکل ۳ پیداست، در قاعده این پهنه لغزشی رودخانه بالیخلی‌چای و جاده نیر به سراب جای گرفته‌اند. زیرشویی پای دامنه‌ها توسط رودخانه که در این قسمت حالت سینوسی به خود گرفته است از یک طرف و برداشت تکیه‌گاه دامنه به واسطه احداث جاده که بدون مطالعات محیطی و آگاهی از ناپایداری بالقوه محل صورت گرفته است، از علل اصلی وقوع زمین‌لغزش‌ها در این بخش از حوضه بوده است. از طرف دیگر وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد تاریخی در پیرامون پهنه لغزشی با توجه به تکتونیزه بودن منطقه، در ایجاد گسیختگی‌های لازم جهت وقوع زمین‌لغزش موثر بوده است. با درنظر گرفتن این نکته که زمین‌لغزه‌های بزرگ از انرژی بالقوه بیشتر و فاصله رانش طولانی‌تر برخوردارند، اهمیت مخاطره‌آمیز بودن چنین پهنه‌های لغزشی معلوم می‌شود. مطالعات مددی و همکاران (۱۳۸۶) و حفیظی و همکاران (۱۳۸۹) اشاره به زمین‌لغزش خطرناک رخداده در این محل به تاریخ ۱۶ خردادماه سال ۱۳۸۴ دارد که باعث شد تا ۶ دستگاه خودرو به داخل دره پرتاب شده و یک نفر نیز جان خود را از دست داد. همچنین در حدود ۳۵۰ متر از جاده به کلی تخریب شد و حدود ۱۰۰ میلیارد ریال خسارت به بارآمد. وقوع چنین حوادثی خبر از اوضاع حساس و خطرساز منطقه به لحاظ وقوع حرکات توده‌ای دارد. در این خصوص، خسارات ناشی از ورود رسوبات زمین‌لغزه‌ها به رودخانه بالیخلی و همچنین ورودی مخزن سد یامچی را نیز بایستی درنظر گرفت.



شکل ۲. نقشه سیاهه زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد یامچی

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]



شکل ۳. پهنه لغزشی بزرگ در دامنه‌های مشرف به رودخانه اصلی حوضه بالیخلی

تحلیل فضایی رخداد زمین‌لغزش با رویکرد گسسته

نتایج هم‌پوشی طبقات ارزشی متغیرهای مستقل با متغیر وابسته، نحوه اثرگذاری هر یک متغیرها در وقوع زمین‌لغزش را مشخص ساخت که در ادامه شرح داده شده است.

- ارتفاع از سطح دریا

ارتفاع از سطح دریا، مهم‌ترین عامل توپوگرافی است که مشخص‌کننده طبقات مورفوکلیماتیک و اختلاف انواع فرسایش از مرتفعات به سمت دشت‌ها و برعکس می‌باشد. در این بین، عموما نقل و انتقال مواد هوازده در ارتفاعات میانی بیشتر می‌باشد. تطابق لایه ارتفاعی با سیاهه زمین‌لغزش در حوضه یامچی نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین فراوانی زمین‌لغزش به ترتیب در طبقات سوم (۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ متر) و پنجم (۳۲۰۰ تا ۳۶۰۰ متر) مشاهده می‌شود. گذشته از این، در ارتفاعات بالای ۳۶۰۰ متر، فراوانی زمین‌لغزش‌ها تقریبا با ارتفاعات پایین ۲۰۰۰ متر مساوی است.

- شیب زمین

عموما با افزایش شیب زمین، نیروی ثقل لازم برای وقوع رواناب فرساینده و حرکات توده‌ای، فزونی می‌یابد. بررسی توزیع زمین‌لغزش‌ها در طبقات شیب حوضه یامچی نشان می‌دهد که تا شیب ۴۰ درجه فراوانی زمین‌لغزش‌ها با میزان شیب رابطه مستقیمی دارد (شکل ۴)، به‌طوری که بالاترین فراوانی در طبقه شیب ۴۰-۳۰ درجه دیده می‌شود. اما از طبقه آخر یعنی بالای ۴۰ درجه، فراوانی زمین‌لغزش‌ها کمی کاهش می‌یابد.

- جهت دامنه

دامنه هایی که بیشتر در معرض نور آفتاب قرار می‌گیرند، نسبت به دامنه‌هایی که مدت زمان کمتری در برابر نور آفتاب قرار می‌گیرند، پایدارتر هستند. علت این پدیده را می‌توان به میزان تبخیر بیشتر و رطوبت کمتر این دامنه‌ها نسبت داد. بنابراین، مستعدترین شیب برای خطر زمین‌لغزش، شیب شمالی است (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۱۱). نگاهی به توزیع طبقات چهارگانه جهت دامنه در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین زمین‌لغزش‌ها در جهت شمالی رخ داده است. پس از آن جهت دامنه غربی در رتبه دوم جای دارد. کمترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش به جهت جنوبی تعلق دارد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]



شکل ۴. وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های پرشیب مرتفعات سبلان (عکس از مرتضی قراچورلو، ۱۳۹۸)

- انحناء عمومی

نگاهی به توزیع زمین‌لغزش‌ها در طبقات انحناء نشان می‌دهد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در زمین‌های کاو رخ داده‌اند. در مقابل، کمترین فراونی زمین‌لغزش‌ها به زمین‌های نسبتا هموار تا نسبتا کوژ تعلق دارد.

- شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

نتایج هم‌پوشی این لایه با لایه زمین‌لغزش نشان می‌دهد که تا طبقه میانی (TWI= 8-10) میزان زمین‌لغزش‌ها افزایش یافته و سپس از فراوانی آن‌ها کاسته می‌شود. بنابراین یک حد آستانه‌ای می‌توان از این لحاظ برای رخداد زمین‌لغزش در نظر گرفت.

- شاخص ناهمواری (Ruggedness)

نتایج حاصل از هم‌پوشی این متغیر با متغیر وابسته نشان می‌دهد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در طبقه آخر ناهمواری (Rug> 6) رخ داده و طبقه اول (Rug< 1) از کمترین فراوانی زمین‌لغزش برخوردار بوده است.

- لیتولوژی

ویژگی‌های سنگ‌شناختی از قبیل سختی و نرمی، مقاومت کانی‌ها در برابر هوازدگی، نفوذپذیری، و میزان اتصال دانه‌ها در رخداد زمین‌لغزش موثرند. در این راستا، اغلب مواد تحکیم‌نیافته در برابر آب اضافه‌شده، مستعد واریختگی هستند (چورلی و همکاران ۱۳۹۲: ۹۴). بررسی توزیع زمین‌لغزش‌ها در هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی در حوضه یامچی نشان می‌دهد که واحدهای سنگ‌شناسی سست و نامقاوم شامل مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (Plms) و نیز نهشته‌های تراسی و مخروطی جدید (Qt2) از بالاترین فراوانی زمین‌لغزش برخوردارند. کمترین رخداد زمین‌لغزش مربوط به رسوبات آبرفتی قدیمی (Qt1) و ساب‌ولکانوهای داسیتی- آندزیتی (Mvai) است که از مقاومت و استحکام بیشتری در برابر فرایندهای فرسایشی برخوردارند.

- بارندگی

میزان بارندگی به عنوان ورودی چرخه هیدرولوژی نقش موثری در هوازدگی سنگ‌ها و رطوبت خاک دارد. عموما هرچه میزان بارش بیشتر باشد، مخاطرات دامنه‌ای اثرات بیشتری را برجای می‌گذارد (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۲:

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

۱۱۱). به لحاظ توزیع زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف بارندگی ملاحظه می‌شود که بیشترین زمین‌لغزش‌ها در طبقه سوم (۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر) و کمترین آن‌ها در طبقه آخر (۵۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر) رخ داده است. در این‌جا نیز به مانند متغیر رطوبت توپوگرافی می‌توان آستانه‌ای (۵۵۰ میلی‌متر) برای رخداد زمین‌لغزش متصور شد.

- کاربری و پوشش زمین

کاربری زمین نشانگر نحوه تعامل انسان با طبیعت و نحوه کنش وی در قبال توانمندی‌ها و تنگناهای محیطی است. بنابراین این عامل نقش موثری در بروز مخاطرات زمین‌شناختی دارد. اثرات انواع کاربری و پوشش زمین بر رخداد زمین‌لغزش‌های در حوضه یامچی بدین صورت بوده است که اغلب زمین‌لغزش‌ها در اراضی مخلوط زراعت دیم و مرتع فقیر اتفاق افتاده است. پس از آن مراتع فقیر بیشترین تعداد زمین‌لغزش‌ها را دارند. کمترین زمین‌لغزش در اراضی ساخته‌شده و زراعی دیده می‌شود.

- شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

در خصوص حرکات توده‌ای زمین، عموما ریشه گیاهان به عنوان آرماتور عمل کرده و مقاومت برشی دامنه را بهبود می‌بخشد (Sujatha & Sridhar, 2021: 12). در حوضه مورد مطالعه، با این که فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقه اول (NDVI< ۰/۱) و در مناطق با پوشش گیاهی ناچیز، بالاست، با این حال این فراوانی در طبقات چهارم (۰/۵۵- ۰/۳۵ = NDVI) و پنجم (۰/۵۵ <NDVI) بالاتر از طبقه اول می‌باشد.

- فاصله از گسل

گسل‌ها عوارض مهم سطح زمین هستند که در ایجاد ناهمواری‌ها و تشکیل شکستگی‌ها و درز و شکاف و تخریب سنگ و تشکیل خاک تأثیرگذار هستند. نتایج انطباق طبقات فاصله از گسل با پراکنش زمین‌لغزش‌ها در حوضه یامچی نشانگر وقوع بیشترین زمین‌لغزش‌ها در طبقه اول و فاصله کمتر از ۵۰۰ متری گسل‌ها می‌باشد. با افزایش فاصله از گسل به‌تدریج از فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌های کاسته می‌شود.

- فاصله از آبراهه

عامل بسیاری از پدیده‌های لغزشی، فرسایش و زیرشویی پای شیب‌ها و دامنه‌ها به‌وسیله جریان‌های پرسرعت سیلابی یا رواناب‌های سطحی و جریان رودخانه‌ای است (Sujatha & Sridhar, 2021: 5). به لحاظ فاصله از آبراهه، در حوضه آبخیز یامچی، بیشترین زمین‌لغزش‌ها در طبقه اول (کمتر از ۲۰۰ متری آبراهه‌ها) رخ داده است. در طبقه پنجم و بالای یک کیلومتری رودها، تقریبا زمین‌لغزشی دیده نمی‌شود.

- فاصله از جاده

فعالیت‌های انسانی نظیر جاده‌سازی و عبور و مرور وسایط نقلیه ممکن است باعث ترک‌ها و شکاف‌هایی شود که منجر به جذب آب توسط خاک و اشباع آن و درنهایت به‌راه‌اندازی زمین‌لغزش شود (Kavzoglu *et al*., 2014: 428). نتایج هم‌پوشی لایه فاصله از جاده با لایه زمین‌لغزش‌های نمونه نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از جاده، فراوانی زمین‌لغزش‌ها رو به افزایش دارد. در این بین، بیشترین زمین‌لغزش‌ها در طبقه چهارم یعنی فاصله ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از جاده‌ها رخ داده است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

تحلیل فضایی احتمال رخداد زمین‌لغزش با رویکرد پیوسته (مدل رگرسیون لجستیک)

پس از تحلیل ارتباط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته در قالب رویکرد گسسته نوبت به تحلیل این ارتباط با رویکرد پیوسته رسید. رویکرد پیوسته به دلیل بهره‌گیری از متغیرهای پیوسته (رستری) امکان تحلیل فضایی دقیق و پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش را در جای‌جای محدوده مورد مطالعه میسر می‌سازد. همگی متغیرهای مستقل جهت ورود به آزمون رگرسیون لجستییک فضایی بایستی به فرمت رستری درآیند. در مورد متغیرهای ارتفاع، شیب، انحناء عمومی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص ناهمواری، بارندگی متوسط سالانه، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، و فاصله از جاده که به شکل رستری در محیط نرم‌افزار GIS محاسبه شده بودند، پیش‌فرضی اعمال نشده و به همان صورت وارد آزمون رگسیون لجستیک شدند. البته جهت همسان‌سازی مقیاس متغیرهای مستقل فقط تبدیل نرمال بر روی لایه‌های رستری این متغیرها انجام گرفت تا در دامنه صفر تا یک قرار گیرند. اما متغیرهای جهت دامنه، کاربری زمین و لیتولوژی که به صورت کیفی بودند، لازم بود تا قبل از نرمال‌سازی تبدیل کمی روی آن‌ها صورت گیرد. این کمی‌سازی و به عبارتی رسترسازی لایه‌ها بر اساس معیار فراوانی زمین‌لغزش‌ها در مقوله‌های آن‌ها و نیز پیشینه مطالعاتی صورت گرفت. برای مثال، در مورد متغیر جهت دامنه، به ترتیب جهات شمالی، غربی، شرقی و جنوبی از بیشترین تا کمترین نمره را دریافت کردند. علاوه بر لایه‌های متغیرهای مستقل، لایه اطلاعاتی متغیر وابسته نیز که به صورت وکتوری بود، ابتدا به صورت لایه رستری درآمده و سپس وارد محیط نرم‌افزاری IDRISI شد. لایه مورد نظر در محیط این نرم‌افزار مورد بازطبقه‌بندی واقع شد، به این صورت که پهنه‌های دارای زمین‌لغزش، مقادیر یک گرفته و به پهنه‌های بدون زمین‌لغزش، مقادیر صفر داده شد.

نتایج حاصل از آزمون رگرسیون لجستیک، کم و کیف اثرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته و مدل پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش را مشخص ساخت. جدول (۲) ضرایب b هر یک از متغیرهای مستقل و مقدار ثابت (a) مدل رگرسیون پیش‌بین را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نتایج رویکرد گسسته مشخص گردید، اکثر متغیرها از رابطه مستقیمی با رخداد زمین‌لغزش‌ها برخوردار هستند، به عبارتی با افزایش مقدار متغیرهای مستقل، مقدار متغیر وابسته افزایش می‌یابد. تنها دو متغیر فاصله از گسل و فاصله از رودخانه دارای رابطه معکوس با احتمال رخداد زمین‌لغزش هستند که نوع رابطه‌شان قابل انتظار است. با استفاده از ضرایب حاصل می‌توان معادله پیش‌بین احتمال رخداد زمین‌لغزش را برای حوضه یامچی ارائه داد. در این راستا برخی از متغیرها که تاثیر بسیار ضعیف و غامضی بر رخداد زمین‌لغزش داشتند، از معادله نهایی حذف شدند. این متغیرها عبارت بودند از: شیب زمین، جهت دامنه، انحناء عمومی، شاخص ناهمواری، فاصله از رودخانه. معادله نهایی بدین شکل حاصل شد:

Logit (landslide) = -6.2745 + 0.996960*altitude - 1.129399*fault-distance + 1.859607*lithology + 5.146193*NDVI + 3.349147*rain - 3.847404*road- distance + 0.996819*TWI + 2.858761*lulc

جدول ۲– ضرایب متغیرهای مستقل و ضرایب a در مدل رگرسیون لجستیک زمین‌لغزش

ردیف	متغیر مستقل	ضریب بتا
۱	ارتفاع از سطح دریا	+ ۱,۱۳۶۹۶۰
۲	شیب زمین	+ ۰,۰۰۰۰۸۳
۳	جهت دامنه	+ ۰,۰۰۰۱۱۹

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

۴	انحناء عمومی	+۰,۰۰۰۰۹۳
۵	شاخص رطوبت توپوگرافی	+ ۰,۹۹۶۸۱۹
۶	شاخص ناهمواری	+ ۰,۰۰۰۱۱۲
۷	لیتولوژی	+ ۱,۸۵۹۶۰۷
۸	بارندگی متوسط سالانه	+ ۳,۳۴۹۱۴۷
۹	کاربری و پوشش زمین	+ ۲,۸۵۸۷۶۱
۱۰	شاخص پوشش گیاهی	+ ۵,۱۴۶۱۹۳
۱۱	فاصله از گسل	-۱,۱۲۹۳۹۹
۱۲	فاصله از آبراهه	- ۰,۰۰۰۰۵۱
۱۳	فاصله از جاده	+ ۳,۸۴۷۴۰۴
ضریب a مدل رگرسیون لجستیک		- ۶,۲۷۴۵

مقایسه ارقام ضرایب b متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که شاخص پوشش گیاهی، با داشتن بالاترین ضریب (۵/۱۴) مهم‌ترین متغیر مستقل محسوب می‌شود. ترتیب اهمیت متغیرهای بعدی بدین صورت است: فاصله از جاده، بارندگی متوسط سالانه، کاربری و پوشش زمین، لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع از سطح دریا، شاخص رطوبت توپوگرافی.

در کنار کم و کیف اهمیت متغیرهای مستقل رگرسیون لجستیک در پیش‌بینی رخداد یک پدیده مخاطره‌بار، اعتبار و کارایی خود مدل رگرسیونی اهمیت خاصی دارد، چرا که پیش‌بینی نارسا و نادقیق یک مخاطره ممکن است علاوه بر هدررفت هزینه و زمان در پروژه‌های توسعه و عمران ناحیه‌ای و منابع طبیعی، موجب وارد ساختن خسارات اقتصادی – اجتماعی به جوامع انسانی در معرض خطر شود. همان‌طور که پیش‌تر بدان اشاره شد، اعتبار و کارایی مدل‌های رگرسیون لجستیک بر اساس آماره‌های شبه ضریب تعیین ($Pseudo\ R^2$) و مشخصه عملکرد نسبی (ROC) سنجیده می‌شود که در جدول (۳) آورده شد. مقدار $Pseudo\ R^2$ حاصل برای مدل رگرسیونی نشانگر برازش مناسب مدل و وجود رابطه معنی‌دار بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته می‌باشد. اما مقدار ROC حاصل برای مدل رگرسیون لجستیک، دلالت بر دقت و اعتبار خوب مدل مذکور دارد، به‌طوری‌که می‌تـوان با اطمینان کافی، از مدل حاصل برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در سطح حوضه مورد مطالعه استفاده نمود.

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی مدل رگرسیون لجستیک جهت پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش در حوضه یامچی

آماره	$Pseudo\ R^2$	ROC	Chi-Square
مقدار	۰/۱۹	۰/۸۴	۲۶۴۱۲

نتیجه‌گیری و بحث

نتایج تحقیق نشان می دهد که هر چند عوامل مختلف توپوگرافی، ناهمواری، زمین‌شناسی، هیدروکلیما و ... به نسبت‌های مختلف در بروز حرکات توده‌ای در حوضه سد یامچی نقش داشته‌اند، اما چگونگی روابط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته در هر دو رویکرد گسسته و پیوسته شبیه به هم بوده و به نوعی این دو رویکرد مکمل هم می‌توانند باشند. مزیت رویکرد گسسته این است که برخی آستانه‌های محیطی جهت رخداد زمین‌لغزش در این رویکرد مشخص‌تر است. با این

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

حال رویکرد پیوسته به جهت تعمیم جغرافیایی، دقیق‌تر و جامع‌تر است. هر چند که نتایج حاصل از کم و کیف تاثیر فاکتورهای دخیل در بروز زمین‌لغزش، تفاوت‌هایی را با نتایج سایر مطالعات نشان می‌دهد، اما در بیشتر موارد، واقعیات موجود با اصول کلی حاکم بر فرایندهای دامنه‌ای مطابقت دارد. به لحاظ ارتفاعی، گرچه با افزایش ارتفاع از سطح دریا بر شمار زمین‌لغزش‌ها افزوده می‌شود، اما وقوع زمین‌لغزش در ارتفاعات میانی شایع‌تر است. بیشتر محققین از جمله خدایی و همکاران (۱۳۹۶)، دارابی شهماری و صفاری (۱۳۹۸)، کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز بر این واقعیت اذعان داشتند. علت این امر به انباشت مواد هوازده و رسوبات انتقالی در ارتفاعات میانی برمی‌گردد که سنگینی لازم جهت غلبه بر مقاومت برشی را فراهم می‌سازد. در خصوص اثرات شیب زمین بر رخداد زمین‌لغزش می‌توان گفت با این که با افزایش شیب زمین بر شدت فرایندهای فرسایشی و انتقال رسوب افزوده می‌شود، اما یک آستانه‌ای معمولا در این خصوص وجود دارد، به‌طوری‌که شیب‌های بالای ۴۰ درجه غالبا سنگی بوده و فاقد خاک است که لازمه حرکت توده‌ای می‌باشد. همچینن، در شیب‌های تند، عامل شستشوی باران و فرایندهای تخریبی باعث نازک شدن لایه خاکی و خرده‌سنگی شده و مانع حرکت توده‌ای می‌گردد (چورلی و همکاران ۱۳۹۲: ۹۴). در حوضه یامچی هرچند با این که شیب‌های بالای ۴۰ درجه به عنوان یک طبقه (طبقه نهایی) درنظر گرفته شد و شاید رسیدن به واقعیات فوق نیازمند طبقه‌بندی جزئی‌تر در شیب‌های بالای ۴۰ درجه باشد، اما کاهش شمار زمین‌لغزش‌ها از طبقه ماقبل (۴-۳۰ درجه) به طبقه نهایی مشخص بوده و در نتیجه با نتایج مطالعات Sujatha and Sridhar (2021)؛ صمدزاده (۱۳۹۴)، عبدی بسطامی و همکاران (۱۳۹۸)، دارابی شهماری و صفاری (۱۳۹۸) همخوانی دارد. اما نتایج حاصل در خصوص اثر جهت دامنه بر رخداد زمین لغزش در حوضه یامچی مبنی بر وقوع بیشترین زمین‌لغزش‌ها در دامنه شمالی و کمترین فراوانی زمین‌لغزش در دامنه جنوبی با اصول حاکم بر دامنه‌ها مطابقت دارد، چرا که وجود رطوبت و هوازدگی بیشتر مواد در دامنه‌های شمالی، شرایط لازم برای وقوع حرکات توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش را فراهم می‌سازد. نتایج مطالعات Mathew et al. (2007)، خالدی و همکاران (۱۳۹۱)، خدایی و همکاران (۱۳۹۶)، و کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز منطبق بر این واقعیت بوده است. اما دارابی شاهماری و صفاری (۱۳۹۷) بر خلاف قاعده مرسوم بر وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در در شیب‌های غربی و جنوب غربی اذعان داشتند.

در کنار متغیرهای اولیه توپوگرافی، متغیرهای ثانویه که عمدتا در ارتباط با شکل زمین و اثر ناهمواری بر فرایندهای هیدرژئومورفیک می‌باشند، اثر قابل‌توجهی بر وقوع حرکات توده‌ای دارند. در این بین، عموما گودافتادگی‌ها در شیب تپه‌ها و محل‌های نفوذ آب، محل‌های احتمالی حرکت توده‌ای مواد هستند. در این محل‌ها خاک‌ها مرطوب است و بارش جوی سبب افزایش این رطوبت شده و باعث زمین‌لغزه می‌گردد (چورلی و همکاران ۱۳۹۲: ۹۴). با توجه به وجود رابطه مستقیم بین شاخص انحناء عمومی و رخداد زمین‌لغزش‌ها می‌توان گفت که در حوضه ابخیز یامچی نیز بیشتر زمین‌لغزش‌ها در زمین‌های کاو رخ داده‌اند. علاوه بر کاوی و کوژی سطح زمین، شدت ناهمواری نیز اثر مهمی بر فرایندهای ژئومورفیک دارد. با افزایش میزان ناهمواری زمین احتمال می‌رود که محیط ژئومورفیک به سمت ناپایدار شدن پیش برود. این واقعیت در حوضه آبخیز یامچی مشاهده شد، به‌طوری که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در طبقه با بیشترین میزان ناهمواری رخ داده و طبقه با کمترین میزان ناهمواری از کمترین فراوانی زمین‌لغزش برخوردار بوده است. اما در خصوص سومین متغیر ثانویه توپوگرافی می‌توان گفت که نتیجه حاصل مبننی بر افزایش فراوانی زمین‌لغزش‌ها با افزایش میزان رطوبت توپوگرافی، با

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

واقعیات هیدرژئومورفیک حاکم بر دامنه‌ها مطابقت دارد. Sujatha and Sridhar (2021) پی بردند که زمین‌لغزش‌ها در مناطق با TWI بالا، بیشتر شایع هستند.

هرچند متغیرهای توپوگرافی و در مقیاس فراگیرتر، ژئومورفولوژی نقش کلیدی و مهمی در بروز حرکات توده‌ای دارند، اما متغیرهای زمین‌شناسی گویا نقش نسبتا بارزتری نسبت به متغیرهای مذکور در رخداد زمین‌لغزش حوضه یامچی دارند. در خصوص متغیر لیتولوژی همان‌گونه که انتظار می‌رفت، واحدهای سنگ‌شناسی سست و نامقاوم شامل مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (Plms) و نیز نهشته‌های تراسی و مخروطی جدید (Qt2) از بالاترین فراوانی زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه برخوردارند، در حالی که رسوبات آبرفتی قدیمی (Qt1) به دلیل تحکیم‌یافتگی از کمترین رخداد زمین‌لغزش برخوردارند. این نتیجه با یافته‌های کیانی و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر وقوع بیشترین زمین‌لغزش‌ها در واحدهای تراکی بازالت و تراکی آندزیت و آبرفت‌ها کواترنری قدیمی ناهمسو می‌باشد. بخشی از این ناهمسویی به نوع قرارگیری سازندها و طبقات چینه‌شناسی و نیز کم و کیف پراکنش واحدهای سنگ‌شناسی در سطح مناطق مختلف برمی‌گردد. اما در خصوص عامل گسل و اثر آن بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه می‌توان گفت که نتیجه حاصل مبنی بر وجود رابطه معکوس فاصله از گسل با فراوانی رخداد زمین‌لغزش قابل انتظار می‌باشد، چرا که گسل‌ها و حرکات تکتونیکی نه تنها باعث خرد و ریزشدن سنگ‌ها و سهولت حمل آن‌ها می‌شود، بلکه بالاآمدگی آب زیرزمینی در نقاط شکسته و گسل‌خورده می‌تواند باعث به راه‌اندازی حرکات توده‌ای می‌شود. صمدزاده، (۱۳۹۴) و دارابی شاهماری و صفاری (۱۳۹۷) نیز بر وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در در فواصل نزدیک به گسل‌ها اذعان نمودند.

نتایج حاصل در خصوص کم و کیف اثر عوامل هیدروکلیمایی و هیدرولوژیک شامل میزان بارندگی و فاصله از رود بر وقوع زمین‌لغزش با واقعیت طبیعی و اصول اولیه ناپایداری دامنه‌ها مطابقت نشان می‌دهد. وجود رابطه مستقیم بین میزان بارندگی و فراوانی زمین‌لغزش‌ها اشاره به اثر قاطع بارش به عنوان نقطه شروع چرخه هیدرولوژی دارد. در همین راستا، کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز به وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در طبقات بالای ۴۴۰ میلی‌متر اذعان داشتند. اما در خصوص متغیر فاصله از رودخانه، مشاهده می‌شود که عمده زمین‌لغزش‌ها در طبقه اول (کمتر از ۲۰۰ متری آبراهه‌ها) رخ داده است. در طبقه پنجم و بالای یک کیلومتری رودها، تقریبا زمین‌لغزشی دیده نمی‌شود. طبیعی است که تمرکز جریان زیرزمینی و اثرات ناپایدارساز برش رود، شرایط مساعد برای ناپایداری را فراهم می‌سازد (Reichenbach et al., 2018: 75). Mathew et al. (2007) نیز پی بردند که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در نزدیکی رودخانه اصلی اتفاق افتاده‌اند. دارابی شاهماری و صفاری (۱۳۹۷) نیز فواصل بالای یک کیلومتری رودها را به عنوان پهنه‌های کم‌خطر به لحاظ وقوع زمین‌لغزش معرفی کردند.

عامل پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک اثر بارزی بر وقوع رواناب و فرسایش دارد. با این که پوشش گیاهی مرتفعات حوضه یامچی شامل مراتع متوسط و نزدیک به متوسط می‌باشد، اما در همین نقاط نیز وقوع حرکات توده‌ای به چشم می‌خورد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که علاوه بر طبقه اول (NDVI< ۰/۱) فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقات چهارم (NDVI = ۰/۳۵ -۰/۵۵) و پنجم (NDVI> ۰/۵۵) نیز بالاست. بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش پوشش گیاهی اثر کاهنده‌ای بر رخداد زمین‌لغزش‌ها در حوضه مورد مطالعه ندارد. کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز به همین واقعیت اذعان داشتند. در هر حال، Reichenbach et al. (2018) اشاره داشتند که روابط روشنی که موجب پیوند بین پوشش گیاهی و پایداری یا ناپایداری دامنه شود، اندک بوده و این موضوع هنوز چالش‌برانگیز می‌نماید. در همین راستا، نقشه‌های

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

کاربری و پوشش زمین می‌تواند کارساز بوده و اثرات پوشش زمین بر وقوع زمین‌لغزش را بهتر نشان دهد. نتایج هم‌پوشانی لایه کاربری زمین با لایه پراکنش زمین‌لغزش‌ها نشان می‌دهد که دستکاری طبیعت توسط انسان و بر هم زدن تعادل اکولوژیک در رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه یامچی موثر بوده است، به‌گونه‌ای که اغلب زمین‌لغزش‌ها در اراضی مخلوط زراعت دیم و مرتع فقیر روی داده است. این نتیجه با نتایج مطالعات خسروی و جمالی (۱۳۹۷)، دارابی شاهماری و صفاری (۱۳۹۷)، و عبدی بسطامی و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد. بر خلاف زراعت دیم، در پهنه‌های تحت زراعت آبی شمار زمین‌لغزش‌های بسیار کم است. زراعت دیم بر خلاف زراعت آبی گرایش به اشغال زمین‌های کم‌بازده، پرشیب، و در معرض فرسایش داشته و بنابراین احتمال رویداد زمین‌لغزش در زمین‌های تحت این نوع زراعت بالاتر است. دارابی شاهماری و صفاری (۱۳۹۷ اراضی کشاورزی آبی را جزو پهنه‌های کم‌خطر به لحاظ وقوع زمین‌لغزش قلمداد کردند.

کسب شناخت لازم در خصوص اهمیت متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش یکی از نکات برجسته و مهم در مطالعات مربوط به حرکات دامنه‌ای است. نتایج حاصل از این تحقیق ما را به این هدف تحقیق رهنمون ساخته و نشان داد که شاخص پوشش گیاهی به عنوان مهم‌ترین متغیر موثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه یامچی شناخته می‌شود. این نتیجه در همخوانی با نتایج مطالعات Mathew et al. (2007)، Sujatha and Sridhar (2021)؛ خسروی و جمالی (۱۳۹۷) می‌باشد. اما محققینی چون خدایی و همکاران (۱۳۹۶) و عبدی بسطامی و همکاران (۱۳۹۸) عامل توپوگرافی را مهم‌ترین عامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش قلمداد نمودند. برخی محققین چون Kavzoglu et al. (2014) ، کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز پی بردند که عامل لیتولوژی، مهم‌ترین عامل موثر بر رخداد زمین‌لغزش است. بدیهی است که نتایج حاصل به دلیل تفاوت در کم و کیف داده‌های ورودی، نظرات کارشناسی و مهم‌تر از همه آن‌ها، خصوصیات فیزیوگرافی و آنتروپوزنیک حاکم بر مناطق مختلف، متفاوت از یکدیگر باشد.

در کل، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که آگاهی از پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در ارتباط با گرادیان‌های مولفه‌های فیزیکی موثر بر رویداد مذکور از طریق کاربست آزمون رگرسیون لجستیک به خوبی میسر می‌شود. مزیت استفاده از هر دو متغیرهای گسسته و پیوسته در مدل رگرسیون لجستیک بر ارجحیت این مدل آماری می‌افزاید. در تحقیق حاضر این مزیت‌ها و توان پیش‌بینی مدل رگرسیونی روشن شده و نتایج حاصل نشان داد که پیش‌بینی مفید و معتبر احتمال رخداد زمین لغزش بر اساس روش رگرسیون لجستیک امکان‌پذیر است. هر چند مقدار $Pseudo\ R^2$ حاصل برای مدل پیش‌بین از مقدار برازش کامل فاصله دارد، اما بایستی توجه داشت که عدم تطابق مقیاس اولیه نقشه‌ها و نیز پراکنش ناموزون نقاط زمین‌لغزش بر این آماره تاثیرگذار است، مسئله‌ای که اکثر تحقیقات موضوعی زمین‌لغزش با آن مواجه بوده و بسته به مکان مورد تحقیق متفاوت می‌نماید. Reichenbach et al. (2018) نیز اشاره داشتند که کیفیت مدل آماری حساسیت بستگی به کیفیت و تناسب اطلاعات زمین‌محیطی مورد استفاده برای آن مدل دارد. مقدار ROC مدل رگرسیون لجستیک برابر با ۰/۸۴ حاصل شد که دقت خوب مدل را نشان می‌دهد. در تحقیقات مشابه نیز مقدار مشابهی برای این آماره حاصل شده است. Mathew et al. (2007) به مقدار ۰/۸۸ دست یافتند. در مدل رگرسیون کیانی و همکاران (۱۴۰۰) نیز مقدار ROC برابر با ۰/۸۶ بود.

با درنظر گرفتن میزان اهمیت عوامل موثر در رخداد زمین‌لغزش، آن‌چه که در منطقه مورد مطالعه مهم می‌نماید، تغییرات محیطی و بالاخص آنتروپوژنیک موثر بر رخداد حرکات توده‌ای است که نگران‌کننده است. تاثیرگذاری بالای متغیرهای فاصله از جاده و کاربری و پوشش زمین بر رخداد زمین‌لغزش‌ها در حوضه یامچی نیز دلالت بر این چالش

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

زیست‌محیطی دارد که نیازمند اقدامات حفاظتی و حمایتی در قبال منابع طبیعی دارد. در این راستا بهتر است توجه ویژه‌ای به حفاظت و حمایت از پوشش گیاهی مرتفعات از طریق جلوگیری از انجام کشت و زرع در مراتع بالادست حوضه‌ها و نیز چرای بی‌رویه دام‌ها شود. به‌علاوه، تنوع و درهم‌بافتگی عوامل طبیعی و انسانی در احتمال بروز مخاطره زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه لزوم اتخاذ رویکرد همه‌جانبه و سیستمی را در قبال اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه گوشزد می‌نماید.

منابع

- بابلی موخر، حمید؛ کورش شیرانی و علیرضا تقیان. ۱۳۹۷. کارایی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه فهلیان. *فصلنامه علوم زمین*، ۲۸(۱۰۹): ۲۰۰-۱۸۷.

- دارابی شهماری، سحر و امیر صفاری ۱۳۹۸. برآورد حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و شاخص آنتروپی مطالعه موردی: ارتفاعات شهرستان دالاهو. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶(۲): ۱۸۰-۱۶۵.

- حفیظی، محمدکاظم؛ بهمن عباسی و احمد اشتری تلخستانی. ۱۳۸۹. بررسی زمین‌لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تأمین ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دوبُعدی و سه‌بُعدی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۶(۱): ۲۸-۱۷.

- خسروی، محسن؛ و علی‌اکبرجمالی. ۱۳۹۷. پیش‌بینی روند تغییرات زمین‌لغزش منطقه شمل قوچان با توجه به عوامل موثر بر لغزش به روش شبکه عصبی، اتومات سلولی – مارکوف و رگرسیون لجستیک. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲۷: ۱-۱۷.

- خالدی، شهریار؛ خه‌بات درفشی، اکبر مهرجونژاد، سعیده قره‌چاهی و شاهین خالدی. ۱۳۹۱. ارزیابی عامل‌های مؤثر در رویداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط GIS مطالعه موردی: حوضه آبخیز طالقان. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱: ۸۲-۶۵.

- خدائی قشلاق، لیلا؛ شهرام روستائی، و سید اسدا... حجازی. ۱۳۹۶. ارزیابی روش رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه حاجیلرچای. *فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۱۰ (۳۷): ۵۷-۴۵.

- چورلی، ریچارد جی؛ استانلی ای شوم، دیوید ای سودن. ۱۳۹۲. ژئومورفولوژی، جلد سوم: فرآیندهای دامنه‌ای، آبراهه‌ای، ساحلی و بادی. ترجمه ابراهمیم مقیمی و احمد معتمد، انتشارات سمت، تهران، ۴۵۵ ص.

- صمدزاده، رسول. ۱۳۹۴. ارزیابی پهنه‌های خطر زمین‌لغزش در جاده اردبیل ـ سرچم. فصلنامه *پژوهش‌های دانش زمین*، ۶(۳): ۱۹-۳۳.

- زارع گاریزی، آرش؛ واحد بردی‌شیخ، امیر سعدالدین و عبدالرسول سلمان‌ماهینی. ۱۳۹۱. کاربرد روش رگرسیون لجستیک در مدل‌سازی الگوی مکانی احتمال تغییر پوشش گیاهی (مطالعه موردی: آبخیز چهل‌چای استان گلستان). *نشریه فضای جغرافیایی*، ۱۲(۳۷): ۵۵-۶۸.

- طلایی، رضا؛ محسن شریعت جعفری و بیرامعلی بیرامی. ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر زمین‌لغزش بر بار رسوبی حوضه بالخلوچای در استان اردبیل. *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۱): ۲۱۰-۱۹۳.

- عبدی بسطامی، شیوا؛ هادی معماریان، سید محمد تاجبخش و محمود اعظمی راد. ۱۳۹۸. اولویت‌بندی عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۰(۱۹): ۱۷۰-۱۵۴.

- قراچورلو، مرتضی؛ فریبا اسفندیاری و علی دلال‌اوغلی. ۱۳۹۷. بررسی نقش پارامترهای ژئومورفولوژی در پراکنش پوشش گیاهی با استفاده از تحلیل رگرسیونی فضایی، *فصلنامه فضای جغرافیایی*، ۱۸(۶۳): ۲۴۸-۲۲۵.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]

- کرم، عبدالامیر و فرجا... محمودی. ۱۳۸۴. مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در زاگرس چین‌خورده (مطالعه موردی: حوضه آبریز سرخون واقع در استان چهارمحال و بختیاری). *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی*، ۵۱: ۱۴-۱.

- کیانی، شکراله؛ اکرم کریمخانی و احمد مزیدی. ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و آنفیس در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل. *فصلنامه جغرافیا و پایداری محیط*، ۳۹: ۷۳-۵۵.

- محمدیاری، فاطمه؛ حمیدرضا پورخباز، مرتضی توکلی و حسین اقدر. ۱۳۹۳. تهیه نقشه پوشش گیاهی و پایش تغییرات آن با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان)، *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۳(۹۳): ۳۴- ۲۳.

- مددی، عقیل. ۱۳۸۶. علل وقوع و پیامدهای ژئومورفولوژیک زمین‌لغزه ۱۶ خرداد ماه ۱۳۸۴ محور اردبیل- تبریز در گردنه صایین (منطقه آذربایجان، غرب استان اردبیل). *نشریه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۳(۳): ۱۶۴-۱۴۳.

- مقیمی، ابراهیم؛ مجتبی یمانی و سعید رحیمی هرآبادی. ۱۳۹۲. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شهر رودبار با استفاده از فرایند تحلیل شبکه. فصلنامه *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۴: ۱۱۸-۱۰۳.

- Agren, A.M., Lidberg, W., Stromgren, M., Oglive, J., Arp, P.A. 2014. Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping- a Swedish case study, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 4103-4129.

- Bai, F., W. Sang, and J. C. Axmacher. 2011. Forest vegetation responses to climate and environmental change: A case study from Changbai Mountain, NE China. *Forest Ecology and Management*, 262(11): 2052-2060.

- Froude, M. J., and D. N. Petley. 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 2161–2181.

- Gariano, S. L., and F. Guzzetti. 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162: 227-252.

- Kavzoglu, T., E. K. Sahin, & I. Colkesen. 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11, 425-439.

- Mathew, J., V.K. Jha, and G.S. Rawat. 2007. Application of binary logistic regression analysis and its validation for landslide susceptibility mapping in part of Garhwal Himalaya, India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2257-2275.

- Olaya, V. 2009. Basic Land-Surface Parameters. In T. Hengl & H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (pp. 141-169). Amsterdam, Elsevier.

- Pokharel, B., M. Alvioli, and S. Lim. 2020. Relevance of morphometric predictors and completeness of inventories in earthquake-induced landslide susceptibility. In Proceedings of the Geomorphometry Conference, pp. 182-185.

- Reichenbach, P., M. Rossi, BD. Malamud, M. Mihir, and F. Guzzetti. 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180: 60-91.

- Simea, I., and S. Todica. 2012. Statistical landslide hazard analysis in Solca catchment area. *Geographia*, 1: 15-22.

- Sujatha, E. R., and V. Sridhar. 2021. Landslide susceptibility analysis: a logistic regression model case study in Coonoor, India. *Hydrology*, 8(1): 1-18.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.1.7.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.1.4]