



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 2 - Number 42, Summer 2022

<https://geoeh.um.ac.ir>




<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.72256.1103>



جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و دوم، تابستان ۱۴۰۱، صص ۵۹-۴۱

مقاله پژوهشی

ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش آماری در حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی)

فهیمة پورفراش‌زاده - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.  صیاد اصغری سراسکانرود^۱ - استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۳۰ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۱۶

چکیده

این پژوهش با هدف تشخیص و تعیین میزان حساسیت وقوع زمین‌لغزش و عوامل زمینه‌ساز آن در حوضه آبخیز بالیخلی واقع در استان اردبیل انجام گرفت. در این راستا، با استفاده از روش ارزش اطلاعاتی (LIM) و با تکیه بر منابع کتابخانه‌ای از قبیل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای، لایه‌های رستری مربوط به متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (سیاهه زمین‌لغزش) تهیه گردید. متغیرهای مستقل شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، بارندگی سالانه، ناهمواری، انحنا، زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از آبراه و فاصله از جاده بود. نتایج هم‌پوشی لایه‌های متغیرهای مستقل با لایه متغیر وابسته در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان داد که شرایط رخداد زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ متر، شیب بالای ۴۰ درجه، جهت شیب شمالی، زمین‌های مقعر، ناهمواری بالا، رسوبات سست و کم‌مقاوم (مارن، شیل و کنگلومرا)، بارندگی‌های ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر، شاخص پوشش گیاهی متوسط (۰/۵۵ - ۰/۳۵)، فاصله کمتر از ۵۰۰ متری گسل‌ها، فاصله کمتر از ۲۰۰ متری رودها و فاصله ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از جاده‌ها، بیشتر از سایر جاها مهیاست. در بین متغیرهای مستقل، سه متغیر شیب، ناهمواری و گسل جزو مهم‌ترین عوامل

Email: s.asghar@uma.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۰۴۰۲۰۲۵۱

نحوه ارجاع به این مقاله:

پورفراش‌زاده، فهیمة؛ اصغری، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش آماری در حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۲). صص ۵۹-۴۱

<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.72256.1103>

اولیه در وقوع زمین لغزش شناخته شدند؛ اما نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش نشان داد که ۵۶ درصد حوضه در طبقات با حساسیت بالا و خیلی بالا واقع شده و نشانگر پتانسیل قابل توجه منطقه از نظر خطر حرکات توده‌ای است. در مقابل، ۲۳ درصد حوضه نیز از پتانسیل خطر پایینی برخوردار بود. با توجه به بروز زمین لغزش‌ها در مراتع منطقه پیشنهاد شد تا از دخل و تصرف، چرای بی‌رویه دام‌ها و نیز احداث جاده در پهنه‌های مرتعی ممانعت به عمل آید.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، حساسیت، مدل LIM، بالینلی.

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌روند که همه ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز به همراه داشته و نقش موثری در تخریب جاده‌های ارتباطی، مراتع، مناطق مسکونی و ایجاد فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبخیز دارند (آرمین و قربان‌نیا خیری، ۱۳۹۸). سازمان یونسکو زمین لغزش‌ها را به عنوان یک مخاطره زمینی جهانی قلمداد می‌نماید که ۱۴ درصد مرگ‌ومیرهای ناشی از مخاطرات طبیعی مختلف را به خود اختصاص داده است (فروود^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). کشور ما نیز به دلیل فراهم بودن و گستردگی عوامل دخیل در بروز این مخاطره از قبیل توپوگرافی کوهستانی و دامنه‌ای جوان (ارتفاع و شیب)، تکنونیک و به‌ویژه گسل‌های سراسری و محلی فراوان و وضعیت اقلیمی مناطق و وجود رسوبات سست مثل لایه‌های رسی و ماری و شیل و فعالیت رودخانه و فرسایش جانبی آن به همراه نقش انسان و اقدامات ناآگاهانه و تخریبی در ارتباط با محیط (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰) همواره در معرض رخداد حوادث زمین لغزشی است. سهم خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (صدوق‌ونینی و همکاران، ۱۳۹۴، به نقل از بابلی موخر و همکاران، ۱۳۹۷).

پیامدهای تهدیدساز و زیان‌بار پدیده زمین لغزش در قبال محیط‌زیست ما را بر آن می‌دارد تا به فکر مقابله و تخفیف خطرات و آسیب‌های ناشی از این مخاطره برآییم. در این راستا، تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت یا خطر زمین لغزش ضرورت می‌یابد. حساسیت زمین لغزش عبارت است از احتمال وقوع زمین لغزش در یک منطقه بسته به شرایط محیطی که در نهایت، به برآورد کجایی احتمال رخداد زمین لغزش می‌انجامد (ریچنباچ^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و بالقوه حساس از هیچ تا بسیار زیاد تقسیم می‌کند. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل‌سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه‌ای صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس

1. Froude et al.

2. Reichenbach et al.

منطقه‌ای، ناحیه‌ای و محلی باشد. جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش از روش‌های مختلف آماری، جبری و اکتشافی استفاده می‌شود (سوجاتا^۱ و سریدار، ۲۰۲۱) که از میان آن‌ها، روش‌های آماری جزو شایع‌ترین و پرکاربردترین روش‌های کمی تعیین حساسیت وقوع زمین‌لغزش به شمار می‌روند. روش‌های آماری بر اساس تحلیل روابط تابعی بین عوامل ناپایداری و توزیع زمین‌لغزش‌ها استوار هستند (ریچنباچ و همکاران، ۲۰۱۸).

متیو^۲ و همکاران (۲۰۰۷) جهت تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در منطقه گاروال^۳ همیالایا از تحلیل رگرسیون لجستیک بر اساس ۷ متغیر مستقل شامل ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، شیب، جهت شیب، کاربری و پوشش زمین، فاصله از خطوط‌اره‌ها بهره جستند. بای^۴ و همکاران (۲۰۱۰) از طریق تحلیل رگرسیون چندمتغیره در محیط ساج به نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش در ناحیه تری‌گورج^۵ کشور چین دست یافتند. متغیرهای نوع دانه‌بندی سنگ، نوع خاک، زاویه شیب، فاصله تا خطوط زهکشی، انحنای سطح، پوشش زمین، ارتفاع و جهت شیب به عنوان متغیرهای مؤثر شناخته شدند. کالیموتو^۶ و همکاران (۲۰۱۵) یک ارزیابی و پهنه‌بندی از استعداد زمین‌لغزش در ارتفاعات کامرون^۷ کشور مالزی از طریق روش نسبت فراوانی انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که شیب‌های ۴۰ تا ۵۰ درجه، ارتفاعات بالای ۱۰۰۰ متر، مناطق نزدیک جاده‌ها و مناطق با بارندگی بیش از ۲۰۰ میلی‌متر، جزو متغیرهای اصلی مؤثر بر زمین‌لغزش هستند. روبک^۸ و همکاران (۲۰۱۸) طی بررسی خصوصیات حوادث زمین‌لغزشی ناشی از بروز یک زمین‌لرزه بزرگ در کشور نپال به این نتیجه رسیدند که تراکم زمین‌لغزه‌ها از طریق ترکیبی از خصوصیات منبع زمین‌لرزه، توزیع شیب و تأثیر بارندگی روی مقاومت سنگ تعیین می‌شود. سوچاتا و سریدار (۲۰۲۱) طی تحلیل حساسیت زمین‌لغزش در منطقه کونور^۹ کشور هند پی بردند که موثرترین متغیرهای مستقل در وقوع زمین‌لغزش به ترتیب اهمیت عبارت بودند از: بارندگی سالانه، کاربری زمین، شیب و خاک. در ایران نیز طیف قابل توجهی از مطالعات مخاطرات محیطی به موضوع ارزیابی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش مربوط می‌شود. از جمله می‌توان یمانی و همکاران (۱۳۸۹) در حوضه توتکابن شهرستان رودبار، عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) در شهرستان بیجار، صمدزاده (۱۳۹۴) در ناحیه اردبیل — سرچم، خدایی و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه حاجیلرچای شهرستان ورزقان، بروغنی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه بقیع شهرستان نیشابور، کرمی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه اهرچای و مجد باوی و مومی‌پور (۱۴۰۰) در حوضه سد شهید عباسپور را برشمرد.

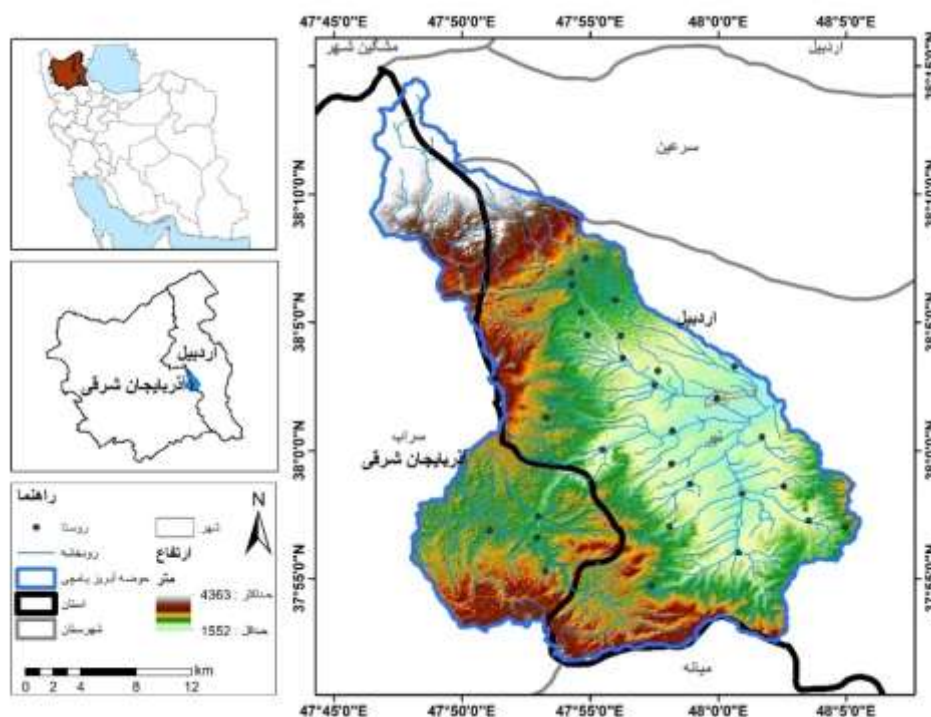
1. Sujatha & Sridhar
2. Mathew et al.
3. Garhwal
4. Bai et al.
5. Three Gorges
6. Kalimuthu et al.
7. Cameron
8. Roback et al.
9. Coonoor

حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی) واقع در استان اردبیل یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز استان به لحاظ تأمین آب مصارف مختلف کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. این حوضه به دلیل ویژگی‌هایی چون تکنونیزه بودن و توان لرزه‌خیزی، مجاورت و لایه‌بندی متناوب سازندهای سخت و نرم، اقلیم مرطوب و بارش‌های شدید بهاره، توپوگرافی خشن از شرایط بالقوه حساس از نظر وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. به طور مثال می‌توان به زمین‌لغزش خطرناک رخ داده به تاریخ ۱۶ خردادماه سال ۱۳۸۴ اشاره کرد که باعث شد 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 (مددی و همکاران، ۱۳۸۶؛ حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹). این پژوهش با در نظر گرفتن اهمیت این موضوع و نبود مطالعه‌ای در خصوص پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه بالیخلی، قصد داشت تا با استفاده از روش‌های آماری - فضایی ضمن شناسایی و تعیین مناطق کم‌خطر تا پرخطر به لحاظ وقوع زمین‌لغزش، به شناخت عوامل و شرایط مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در این حوضه دست یابد. انتظار می‌رود نتایج تحقیق رهنمودی برای اتخاذ راهکارها و اقدامات مدیریتی مناسب جهت کنترل و کاهش اثرات زیان‌بار ناشی از مخاطره زمین‌لغزش در منطقه باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی) با مساحت ۵۶۷ کیلومتر مربع مابین استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی و حدود عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 51' 22''$ تا $38^{\circ} 14' 58''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $47^{\circ} 46' 20''$ تا $48^{\circ} 00' 00''$ شرقی جای گرفته است (شکل ۱). این حوضه به لحاظ تقسیمات سیاسی در شهرستان‌های سرعین، میانه و نیر از استان اردبیل و سراب از استان آذربایجان شرقی واقع است. حوضه بالیخلی یکی از زیرحوضه‌های اصلی قره‌سو می‌باشد که آن هم جزو حوضه آبریز درجه دو ارس در شمال غرب ایران محسوب می‌شود. سرشاخه‌های بالیخلی از رشته بزغوش در جنوب و جنوب غرب و رشته سبلان در شمال سرچشمه گرفته و بر سر راه خود روستاهای چندی را مشروب می‌سازند. حوضه بالیخلی از دامنه ارتفاعی بالا مابین ۱۵۵۰ تا ۴۳۶۰ متر از سطح دریا برخوردار بوده و با میانگین ارتفاع ۲۱۱۶ متر، حوضه‌ای کوهستانی به شمار می‌رود. شیب حوضه نیز از صفر تا ۶۳ درجه متغیر بوده و متوسط آن ۱۱/۱۵ درجه می‌باشد. حاکمیت اقلیم مرطوب حوضه با بارندگی‌های از ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر باعث شده تا رودها از آب‌دهی و قدرت فرسایشی قابل توجه برخوردار باشند، به طوری که رسوبات هنگفتی وارد سد یامچی در فاصله چند کیلومتری خروجی حوضه می‌شوند.



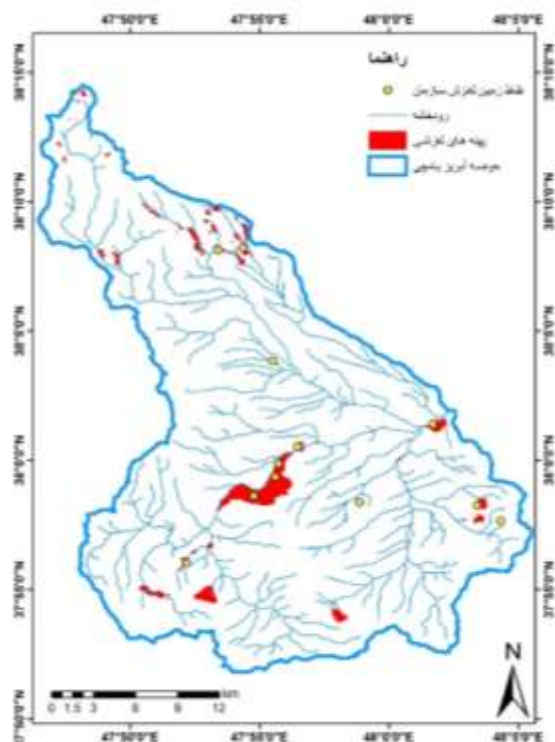
شکل ۱- موقعیت جغرافیای حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی) (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰)

۲-۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی و از نظر روش توصیفی — تحلیلی می‌باشد. منابع کتابخانه‌ای مورد استفاده شامل نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع (۳۰ متر)، تصاویر ماهواره‌ای لندست و گوگل ارث (سال ۲۰۲۱) بود. جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی آن از روش آماری ارزش اطلاعاتی (LIM) با تکیه بر قابلیت نرم‌افزار GIS استفاده گردید. مراحل کار به شرح زیر بود:

الف- تهیه سیاهه زمین‌لغزش

اولین گام در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، تهیه فهرستی از زمین‌لغزش‌های گذشته و حال است که راهنما و کلیدی برای پیش‌بینی احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های آتی می‌باشد. در حوضه آبخیز بالیخلی حدود ۸۵ پهنه لغزشی با مساحت کل ۱۲/۸ کیلومتر مربع (دو درصد حوضه) به صورت پولیگون از روی تصاویر گوگل ارث برداشت شد (شکل ۲). این پهنه‌ها با نقاط زمین‌لغزش مهم منطقه که توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع تهیه شده بود، مطابقت داشت. مساحت این توده‌های لغزشی از ۰/۰۶ تا ۵۷۱ هکتار متغیر بوده و میانگین آن‌ها برابر با ۱۴ هکتار بود.



شکل ۲. نقشه سیاهه زمین لغزش در حوضه آبخیز بالیخلی (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰)

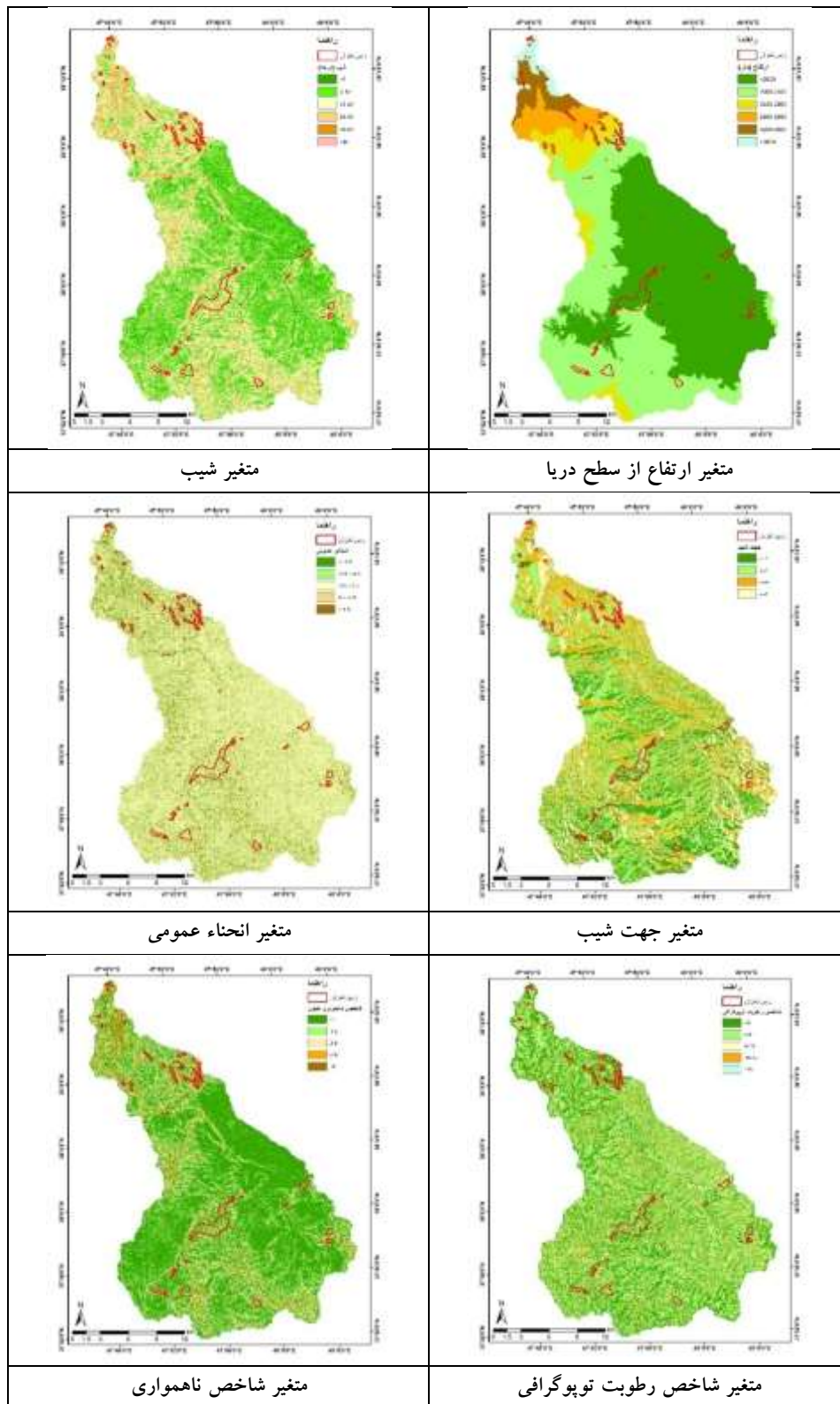
ب- انتخاب متغیرهای مستقل و تهیه نقشه‌های مربوط

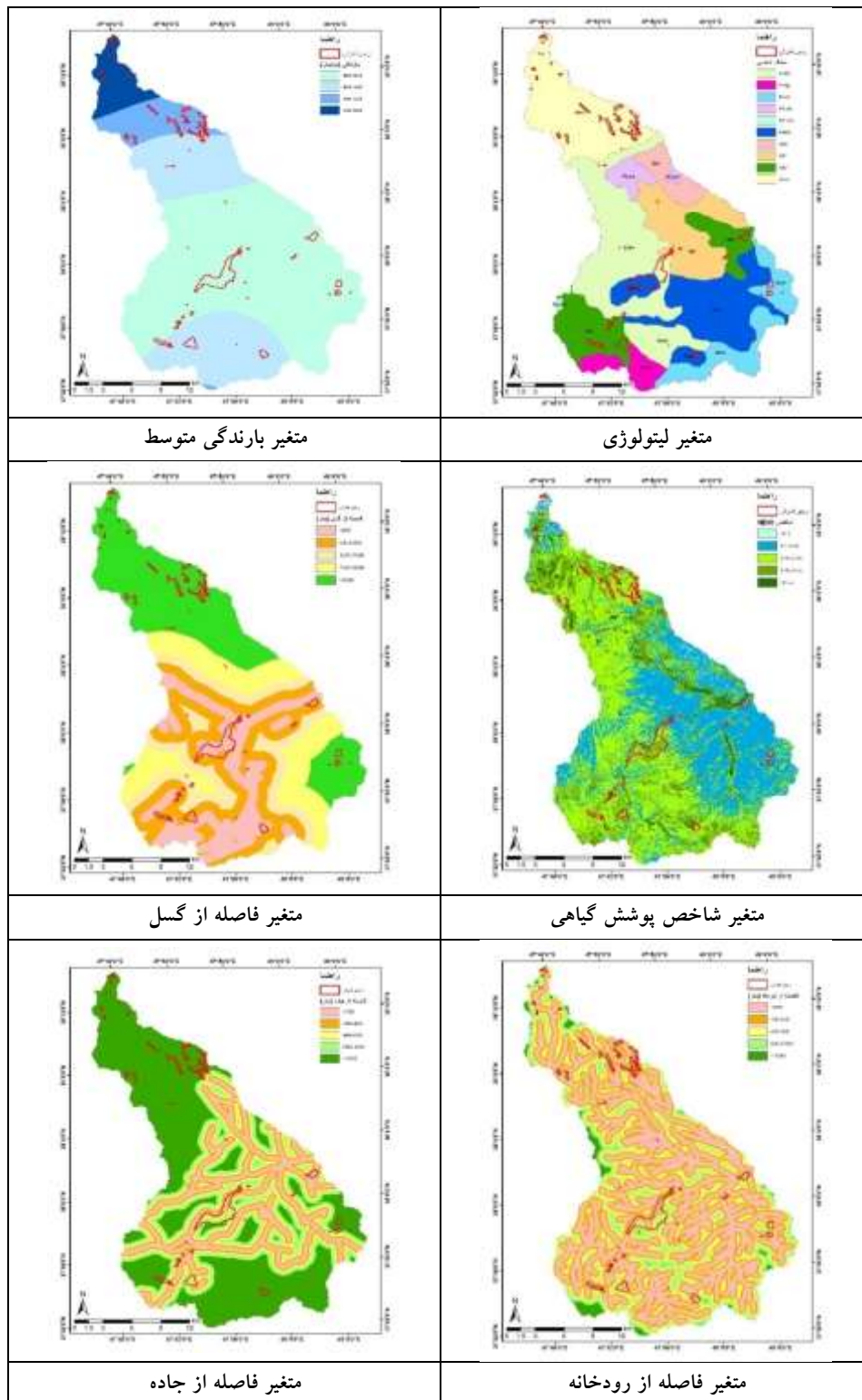
متغیرهای مستقل دخیل در مدل حساسیت زمین لغزش شامل ۱۲ متغیر محیطی بود که به شکل لایه‌های رستری در تحلیل‌های آماری — فضایی به خدمت گرفته شدند (شکل ۳). معیارهای منتخب و داده‌های مورد نیاز برای استخراج آن‌ها به شرح زیر بود:

- ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص ناهمواری، انحناء عمومی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر.
- لیتولوژی، فاصله از گسل از نقشه زمین‌شناسی
- فاصله از آبراهه، فاصله از جاده از نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی
- بارندگی متوسط سالانه از طریق درون‌یابی میانگین بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی نیر، لای، یامچی، صابین و

سرعین

- شاخص پوشش گیاهی NDVI از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ اخذشده در ماه ژوئن سال ۲۰۲۱.





شکل ۳- نقشه لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه بالیخلی (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰)

ج- اجرای روش ارزش اطلاعاتی (LIM)

ون وستن^۱ (۱۹۹۵) روش ارزش اطلاعاتی را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پیشنهاد داد که یک روش آماری برای پیش‌بینی فضایی یک رویداد براساس رابطه پارامتر و رویداد می‌باشد. روش ارزش اطلاعاتی، روش بسیار مفیدی برای بررسی حساسیت زمین‌لغزش به واسطه تعیین تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده رخداد زمین‌لغزش در یک منطقه است. این روش مبتنی بر همبستگی آماری — فضایی (هم‌پوشانی نقشه) نقشه زمین‌لغزش با نقشه‌های عاملی مختلف می‌باشد. در این روش، ارزش وزنی برای هر کلاس عاملی بوسیله لگاریتم طبیعی تراکم زمین‌لغزش در کلاس، تقسیم بر تراکم زمین‌لغزش در کل نقشه تعریف می‌شود. با این مدل می‌توان متغیرهای کیفی را کمی نمود و با تغییر متغیر یعنی گرفتن لگاریتم طبیعی (Ln)، وزن متغیرهای دارای وزن بسیار کم، زیاد و وارد محاسبات می‌شوند (مقیمی و همکاران، ۱۳۸۷). این روش بر اساس معادله زیر انجام می‌شود:

$$W_i = \ln \left(\frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \frac{N_{\text{pix}}(S_i) / N_{\text{pix}}(N_i)}{\sum_{i=1}^n N_{\text{pix}}(S_i) / \sum_{i=1}^n N_{\text{pix}}(N_i)}$$

که در آن:

W_i : ارزش وزنی کلاس i

DensClas: تراکم زمین‌لغزش‌ها در کلاس i

DensMap: تراکم زمین‌لغزش‌ها در کل منطقه مورد مطالعه

$N_{\text{pix}}S_i$: تعداد پیکسل‌های لغزشی موجود در کلاس i

$N_{\text{pix}}N_i$: تعداد پیکسل‌های کلاس i

$\sum N_{\text{pix}}S_i$: تعداد کل پیکسل‌های لغزشی در کل منطقه مورد مطالعه؛

$\sum N_{\text{pix}}N_i$: تعداد کل پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه.

پس از هم‌پوشانی نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده متغیرهای مستقل با نقشه متغیر وابسته (سیاهه زمین‌لغزش)، مقادیر نسبت فراوانی و وزن‌های مؤثر برای کلاس‌های مختلف هر لایه موضوعی محاسبه شد (جدول ۱). سپس، این لایه‌ها بر اساس مقادیر وزنی با همدیگر هم‌پوشانی شده و لایه جدید تحت عنوان «حساسیت زمین‌لغزش» به دست آمد. در نهایت، این لایه بر اساس منحنی فراوانی تجمعی به پنج کلاس با میزان خطر زمین‌لغزش بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی گردید. جهت انجام محاسبات مربوط به انقطاع سیاهه زمین‌لغزش با طبقات متغیرهای مستقل از نرم‌افزار Excel و تهیه لایه‌های رستری از نرم‌افزار GIS کمک گرفته شد.

جدول ۱- نتایج آماری مربوط به نسبت فراوانی زمین لغزش‌ها در طبقات متغیرهای مستقل مدل LIM

نسبت فراوانی زمین لغزش در طبقات متغیرهای مستقل						متغیر	
>۳۶۰۰	۳۶۰۰-۳۲۰۰	۳۲۰۰-۲۸۰۰	۲۸۰۰-۲۴۰۰	۲۴۰۰-۲۰۰۰	<۲۰۰۰	کلاس	ارتفاع
۱/۱۶	۰/۴۱	۰/۶۰	۱/۵۴	۰/۷۷	۱/۱۸	نسبت فراوانی	
>۴۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	۱۰-۲۰	۵-۱۰	<۵	کلاس	شیب
۴/۱۹	۳/۰۹	۱/۹۸	۱/۱۶	۰/۵۹	۰/۳۶	نسبت فراوانی	
-	-	غرب	جنوب	شرق	شمال	کلاس	جهت شیب
-	-	۱/۴۶	۰/۳۲	۰/۷۴	۱/۶۲	نسبت فراوانی	
-	> (+۱/۸)	(+۱/۸) - (+۰/۵)	(+۰/۵) - (-۰/۵)	(-۰/۵) - (-۱/۸)	< (-۱/۸)	کلاس	انحناء عمومی
-	۱/۵۲	۰/۹۸	۰/۸۲	۱/۰۲	۱/۶۵	نسبت فراوانی	
-	> ۱۵	۱۵-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	< ۶	کلاس	رطوبت
-	۰/۷۰	۰/۸۳	۱/۰۰	۰/۹۶	۱/۱۴	نسبت فراوانی	
-	> ۶	۴-۶	۲-۴	۱-۲	< ۱	کلاس	ناهمواری
-	۳/۱۵	۲/۷۹	۱/۸۴	۰/۹۷	۰/۷۰	نسبت فراوانی	
Plms	Qt2	Evbv	Qt1	Mvai	Qviv	کلاس	لیتولوژی
۱/۸۷	۱/۶۶	۰/۷۱	۰/۳۷	۰/۵۳	۱/۴۴	نسبت فراوانی	
-	-	۵۵۰-۶۰۰	۵۰۰-۵۵۰	۴۵۰-۵۰۰	۴۰۰-۴۵۰	کلاس	بارندگی
-	-	۰/۵۸	۲/۳۱	۰/۶۴	۱/۰۶	نسبت فراوانی	
-	> ۰/۵۵	۰/۳۵ - ۰/۵۵	۰/۲۵ - ۰/۳۵	۰/۱ - ۰/۲۵	< ۰/۱	کلاس	پوشش گیاهی
-	۱/۸۰	۲	۱/۰۳	۰/۳۷	۱/۲۰	نسبت فراوانی	
-	> ۵۰۰۰	۲۵۰۰-۵۰۰۰	۱۵۰۰-۲۵۰۰	۵۰۰-۱۵۰۰	< ۵۰۰	کلاس	فاصله از گسل
-	۰/۹۸	۰/۰۰	۱/۰۸	۱/۱۵	۲/۸۰	نسبت فراوانی	
-	> ۱۰۰۰	۶۰۰-۱۰۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۲۰۰-۴۰۰	< ۲۰۰	کلاس	فاصله از آبراهه
-	۰/۰۰	۱/۱۱	۰/۹۴	۰/۸۵	۱/۱۸	نسبت فراوانی	
-	> ۱۰۰۰	۶۰۰-۱۰۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۲۰۰-۴۰۰	< ۲۰۰	کلاس	فاصله از جاده
-	۰/۸	۱/۴۷	۱/۲۰	۱/۱۱	۰/۹۸	نسبت فراوانی	

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر متغیرهای مستقل بر وقوع زمین لغزش

در وهله نخست، تاثیر خصوصیات توپوگرافی بر وقوع زمین لغزش‌ها مهم می‌نماید. هم‌پوشی عامل ارتفاع از سطح دریا با پهنه‌های لغزشی نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین نسبت فراوانی‌ها به ترتیب به طبقات سوم (۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ متر) و پنجم (۳۲۰۰ تا ۳۶۰۰ متر) اختصاص دارد. در ارتفاعات بالای ۳۶۰۰ متر، نسبت فراوانی زمین لغزش‌ها

تقریباً با ارتفاعات پایین ۲۰۰۰ متر برابری می‌کند. با این احتساب معلوم می‌شود که نظم یکنواختی در فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌ها با افزایش یا کاهش ارتفاع از سطح دریا در حوضه بالیخلی وجود ندارد. در این زمینه بیشتر محققین به تراکم بالای زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات میانی و تراکم کم آن در ارتفاعات بالا اشاره داشته‌اند (رویک و همکاران، ۲۰۱۸؛ عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳؛ خدایی و همکاران، ۱۳۹۶؛ بروغنی و همکاران، ۱۳۹۷). اثر این عامل توپوگرافی بر وقوع زمین‌لغزش را شاید بتوان در تأثیر روشن‌تر دیگر متغیر توپوگرافی یعنی شیب زمین پیگیری کرد. مقادیر نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقات شیب مختلف حوضه نشان می‌دهد هرچند طبقه شیب بالای ۴۰ درجه تنها یک درصد مساحت حوضه را شامل می‌شود، اما بالاترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها در همین طبقه دیده می‌شود. در مقابل، طبقه شیب پایین‌تر از ۵ درجه کمترین نسبت فراوانی لغزش‌ها را به خود اختصاص داده است. عموماً شیب‌های بالای ۴۰ درجه غالباً سنگی بوده و فاقد خاک است که لازمه حرکت توده‌ای می‌باشد (چورلی و همکاران ۱۳۹۲). نتایج حاصل بر خلاف این اصل بوده و نشانگر افزایش فراوانی زمین‌لغزش‌ها با افزایش میزان شیب است که دلالت بر اثر قاطع و تعیین‌کننده شیب زمین بر وقوع حرکات توده‌ای در منطقه دارد. محققینی چون متیو و همکاران (۲۰۰۷)، رویک و همکاران (۲۰۱۸) نیز به تراکم و مخاطره‌آمیز بودن بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های بالا اذعان نموده‌اند. در مقابل، سوچاتا و سریدار (۲۰۲۱)، یمانی و همکاران (۱۳۸۹)، عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) و صمدزاده (۱۳۹۴) به تراکم بالای زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های نسبتاً ملایم تا متوسط اشاره داشتند. در خصوص تأثیرگذاری سومین عامل توپوگرافی یعنی جهت شیب بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش می‌توان گفت دامنه‌های شمالی که مدت زمان کمتری در برابر نور آفتاب قرار می‌گیرند، نسبت به دامنه‌های جنوبی که بیشتر در معرض نور آفتاب هستند، از استعداد بیشتری به جهت خطر وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. نگاهی به توزیع طبقات چهارگانه جهت شیب در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها به جهت شیب شمالی (۱/۶) تعلق دارد. جهت شیب غربی در مقام دوم از این لحاظ قرار دارد. در مقابل، جهت جنوبی از کمترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش (۰/۳۲) برخوردار بوده و کم‌تأثیرگذارترین جهت دامنه در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. این نتیجه هم‌سو با نتایج بیشتر محققین چون عابدینی و همکاران (۱۳۹۳)، خدایی و همکاران (۱۳۹۶) و بروغنی و همکاران (۱۳۹۷) می‌باشد.

در کنار متغیرهای اولیه توپوگرافی، متغیرهای ثانویه توپوگرافی نیز وجود دارند که در مدل‌سازی مخاطرات زمین‌شناختی کاربرد وسیع یافته‌اند. در این بین، پارامترهای انحنای زمین، سنج‌های از شکل چشم‌انداز هستند که میزان تقعر یا تحدب سطح زمین را در جهات مختلف تعیین می‌نمایند. مقادیر نسبت فراوانی طبقات انحنای زمین در حوضه مورد مطالعه نشانگر این است که زمین‌های مقعر بالاترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها را دارند. این نتیجه به دلیل انباشت بیشتر رطوبت و فرسایش متمرکز خطی در این نقاط، منطبق بر واقعیات هیدروژئومورفیکی پذیرفته‌شده است. در

مقابل، کمترین فراوانی زمین لغزش‌ها در زمین‌های نسبتاً هموار تا نسبتاً محدب مشاهده می‌شود که یا پایدار بوده و یا در معرض پخش مواد فرسوده روی دامنه‌ها هستند؛ اما شاخص رطوبت توپوگرافی سنج‌ای از میزان رطوبت خاک بر پایه توپوگرافی محلی است. نتایج حاصل از هم‌پوشی متغیر رطوبت توپوگرافی با متغیر وابسته نشان می‌دهد که فراوانی لغزش‌ها با افزایش میزان رطوبت توپوگرافی رو به کاهش می‌گذارد که دور از انتظار می‌باشد. این نتیجه مغایر با نتایج کار **سوجاتا و سریدار (۲۰۲۱)** می‌باشد که اشاره به گسترش بیشتر زمین لغزش‌ها در مناطق با TWI بالا داشت. به نظر می‌رسد که متغیر مذکور قادر به تبیین تغییرات متغیر وابسته در منطقه مورد مطالعه نمی‌باشد. شاخص ناهمواری نمایانگر میزان خشونت توپوگرافی بوده و با افزایش میزان ناهمواری، فرایندهای مورفوزن راه‌انداز حرکات توده‌ای تسریع و تشدید می‌بایند. نتیجه حاصل در خصوص تأثیر این متغیر بر وقوع زمین لغزش اشاره به افزایش فراوانی زمین لغزش‌ها با افزایش میزان ناهمواری دارد. این نتیجه هم‌سو با نتیجه کار **روبک و همکاران (۲۰۱۸)** بوده و در مقابل، مغایر با نتایج **سوجاتا و سریدار (۲۰۲۱)** می‌باشد.

در کنار عوامل توپوگرافی، عوامل زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و سازندها در بروز پدیده زمین لغزش از اهمیت اساسی برخوردارند. ویژگی‌های سنگ‌شناختی از قبیل سختی و نرمی، مقاومت کانی‌ها در برابر هوازدگی، نفوذپذیری و میزان اتصال دانه‌ها در رخداد زمین لغزش موثرند (**چورلی و همکاران ۱۳۹۲**). واحدهای سنگ‌شناسی حوضه بالیخلی عمدتاً از سنگ‌های آذرین بازالتی (Evbv) و آندزیتی - بالتی (Qviv) و سنگ‌های رسوبی متشکل از مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (Plms) و نهشته‌های کواترنری (Qt1, Qt2) تشکیل یافته است. بالاترین نسبت فراوانی لغزش‌ها به سنگ‌های مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (Plms) و سپس، نهشته‌های تراسی و مخروطی جدید (Qt2) تعلق دارد. در مقابل، پایین‌ترین نسبت فراوانی به نهشته‌های تراسی و مخروطی قدیمی (Qt1) که از استحکام بیشتری برخوردارند، اختصاص دارد. نتیجه حاصل قابل انتظار بوده و با نتایج **عابدینی و همکاران (۱۳۹۳)** و **بروغنی و همکاران (۱۳۹۷)**، **کرمی و همکاران (۱۳۹۸)** هم‌خوانی دارد. در مقابل، با نتایج تحقیق **صمدزاده (۱۳۹۴)** مبنی بر تراکم بالای زمین لغزش‌ها در سنگ‌های آتشفشانی مغایرت نشان می‌دهد؛ اما نقش گسلش‌ها و گسیختگی‌ها در وقوع زمین لغزش را می‌توان از طریق فاکتور فاصله از گسل بررسی نمود. بدون شک، شکستگی‌ها و گسیختگی‌های سطح زمین تأثیر زیادی در رسوخ آب به داخل زمین و خرده‌شدن سنگ‌ها و سست شدن اتصال بین مواد سنگی دارند که در نهایت، شرایط بروز حرکات توده‌ای را فراهم می‌سازند. بالاترین نسبت فراوانی وقوع زمین لغزش‌ها در حوضه بالیخلی به طبقه فاصله کمتر از ۵۰۰ متری اختصاص یافت. چنانچه کلاس آخر به دلیل مساحت زیاد تحت اشغال کنار گذاشته شود، می‌توان گفت که در حوضه مورد مطالعه با افزایش فاصله از گسل از فراوانی زمین لغزش‌ها کاسته می‌شود. این نتیجه با اصول حاکم بر فرایندهای دامنه‌ای مطابقت دارد.

میزان بارندگی نقش موثری در میزان رطوبت جذب‌شده توسط سنگ و خاک داشته و سرش مواد روی دامنه بستگی به این میزان آب دریافتی دارد. نتایج حاصل در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که رابطه میزان بارندگی با وقوع زمین‌لغزش چندان مشخص و روشن نیست. بیشترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها به طبقه سوم (۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر) و کمترین آن به طبقه آخر (۵۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر) اختصاص دارد. این نتیجه مغایر با نتایج **عابدینی و همکاران (۱۳۹۳)** و **بروغنی و همکاران (۱۳۹۷)** مبنی بر تراکم بیشتر زمین‌لغزش‌ها در طبقات میانی بارش می‌باشد؛ اما نتایج حاصل از هم‌پوشی پهنه‌های لغزشی با شاخص پوشش گیاهی نشان می‌دهد که بالاترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش در طبقه چهارم که شامل مراتع نسبتاً ضعیف تا متوسط است، مشاهده می‌شود. در مقام بعدی، مراتع خوب و باغات که بالاترین مقادیر شاخص گیاهی را دارا می‌باشند، قرار دارند. در هر حال، وجود باغات به دلیل دارا بودن مقادیر بالای شاخص گیاهی مانع از تبیین روشن روابط بین متغیرها می‌شود. این نتیجه با نتایج **بروغنی و همکاران (۱۳۹۷)** مبنی بر وقوع اغلب زمین‌لغزش‌ها در زمین‌های بایر و پهنه‌های با میزان NDVI پایین مغایرت نشان می‌دهد.

نتایج هم‌پوشی لایه‌های فاکتورهای خطی با لایه زمین‌لغزش نشان می‌دهد که به لحاظ فاصله از آبراهه، بالاترین نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها در طبقه اول بوده و نسبت فراوانی در آخرین طبقه یعنی بالای یک کیلومتر بسیار کاهش می‌یابد. نتیجه حاصل با تراکم بالای آبراهه‌ها در حوضه بالیخلی ارتباط دارد. تراکم بالای آبراهه‌ها نشان‌دهنده وجود تعداد دامنه‌های زیاد و به تبع آن، تعداد دامنه‌های ناپایدار بیشتری است. از سوی دیگر زیرشویی رودها موجب حذف تکیه‌گاه دامنه شده و احتمال ناپایداری دامنه را افزایش می‌دهد. در هر حال، نتیجه حاصل با نتایج بسیاری از محققین چون **متیو و همکاران (۲۰۰۷)**، **رویک و همکاران (۲۰۱۸)**، **عابدینی و همکاران (۱۳۹۳)**، **بروغنی و همکاران (۱۳۹۷)** مطابقت نشان می‌دهد؛ اما نتایج حاصل در خصوص آخرین متغیر مستقل و ارتباط آن با وقوع زمین‌لغزش‌ها در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که با کاهش فاصله از جاده از میزان فراوانی زمین‌لغزش‌ها کاسته شده است. بالاترین نسبت فراوانی در طبقه چهارم یعنی فاصله ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از جاده‌ها مشاهده می‌شود. کمترین نسبت فراوانی نیز به طبقه پنجم و فاصله بالای یک کیلومتری از جاده‌ها اختصاص دارد. احداث جاده‌های ارتباطی چه در روی دامنه و چه در پای آن با ایجاد انقطاع در پیوستگی دامنه و ایجاد دیواره و یا از بین بردن تکیه‌گاه دامنه باعث سقوط و سرش ناگهانی مواد روی دامنه به سمت پایین می‌شود. **شکل ۴** نمونه‌ای از وقایع لغزشی ناشی از جاده‌سازی در منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۴- وقوع زمین لغزش ناشی از احداث جاده و از بین رفتن تکیه گاه دامنه شیب دار (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

قبل از پرداختن به پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش لازم است تا از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه نیز آگاهی داشته باشیم. در مدل ارزش اطلاعاتی می‌توان از طریق میزان وزن نهایی طبقات متغیرهای مستقل به نقش و اهمیت متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش پی برد. بالاترین و پایین‌ترین مقادیر وزن نهایی متغیرها در جدول ۲ آورده شد. چنانچه مقادیر بیشینه وزنی را معیار قرار دهیم، ترتیب اهمیت متغیرهای مستقل به این صورت خواهد بود: شیب، شاخص ناهمواری، فاصله از گسل، بارندگی، شاخص گیاهی، لیتولوژی، انحناء عمومی، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی. با این نتایج معلوم می‌شود که عوامل اولیه و اصلی که شرایط ظهور حرکات توده‌ای را فراهم می‌سازند، در وقوع زمین لغزش‌های حوضه آبخیز بالیخلی سهیم بوده‌اند. متیو و همکاران (۲۰۰۷) کالیموتو و همکاران (۲۰۱۵) و عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) نیز شیب زمین را مهم‌ترین عامل در وقوع زمین لغزش دانستند. در کنار شیب زمین، عامل سنگ‌شناسی نیز به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش قلمداد شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ صمدزاده، ۱۳۹۴؛ بروغنی و همکاران، ۱۳۹۷؛ مجد باوی و مومی‌پور، ۱۴۰۰).

جدول ۲- مقادیر کمینه و بیشینه وزن طبقات متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه بالیخلی

متغیر مستقل	بالاترین وزن	پایین‌ترین وزن
ارتفاع	۰/۴۳۴	-۰/۸۸۰
شیب	۱/۴۳۲	-۱/۰۱۱
جهت شیب	۰/۴۸۵	-۱/۱۳۷

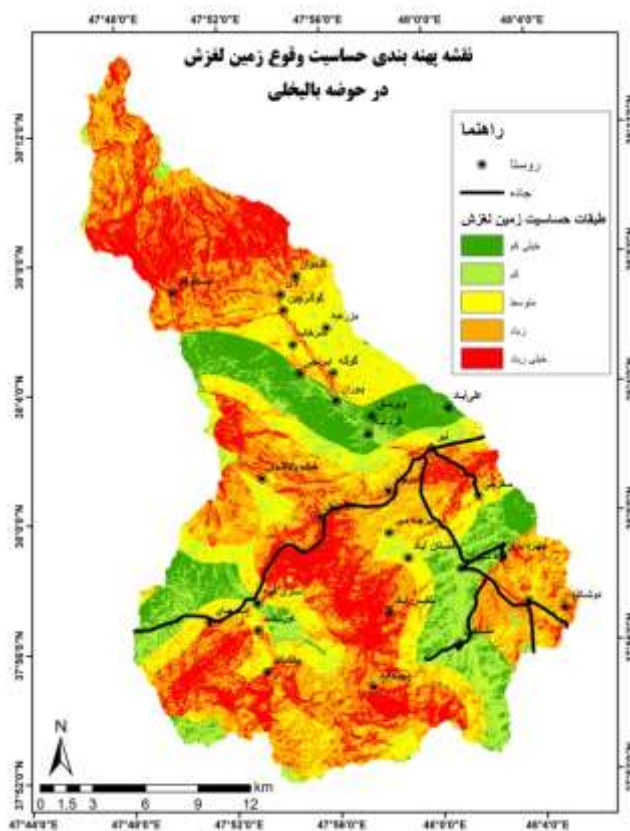
متغیر مستقل	بالترین وزن	پایین‌ترین وزن
انحناء عمومی	۰/۵	-۰/۱۹۲
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۱۳۲	-۰/۳۵۵
شاخص ناهمواری	۱/۱۴۶	-۰/۳۶۲
لیتولوژی	۰/۶۲۴	-۱/۰۰۶
بارندگی	۰/۸۴۰	-۰/۵۴۷
شاخص پوشش گیاهی	۰/۶۹۳	-۰/۹۹۴
فاصله از گسل	۱/۰۲۹	-۷/۱۹۶
فاصله از آبراهه	۰/۱۶۳	-۵/۶۴۷
فاصله از جاده	۰/۳۸۸	-۰/۲۲۳

پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به روش ارزش اطلاعاتی

پس از این که نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه بالیخلی از طریق هم‌پوشانی لایه‌های وزنی متغیرهای مستقل به دست آمد، با استفاده از نقاط شکست طبیعی، این نقشه در قالب پنج کلاس حساسیت شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد (شکل ۵). در ضمن، جهت حصول اطمینان از صحت طبقه‌بندی، نقشه نهایی با نقشه سیاهه زمین‌لغزش انقطاع داده شد که جدول ۳ نتایج این ارزیابی و نیز درصد مساحت طبقات حساسیت را نشان می‌دهد. با توجه به این که قسمت اعظم پهنه‌های لغزشی در کلاس‌های حساسیت خیلی زیاد (۸۲/۵٪) و زیاد (۳۳/۳٪) قرار گرفته است و با گذر از کلاس حساسیت بالا به کلاس حساسیت کم از مساحت پهنه‌های نمونه کاسته می‌شود، می‌توان گفت که مدل LIM از کارایی و صحت بالایی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه برخوردار است.

جدول ۳- نتایج طبقه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش و ارزیابی کارایی مدل LIM در حوضه بالیخلی

کلاس پهنه‌بندی حساسیت	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
درصد مساحت کلاس	۲۲/۸	۳۳/۳	۲۱/۲	۱۱/۷	۱۱
درصد پهنه لغزش‌یافته (سیاهه زمین‌لغزش)	۸۲/۴۷	۱۶	۱/۵	۰/۰۲	۰/۰۱



شکل ۵- نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز بالیخی (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰)

اما نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش نشان می دهد که ۵۶ درصد حوضه در طبقات با حساسیت بالا و خیلی بالا واقع شده و نشانگر پتانسیل قابل توجه منطقه از نظر خطر حرکات توده ای است. تقریباً ۲۳ درصد حوضه نیز از پتانسیل خطر پایینی برخوردار است. توزیع طبقات حساسیت در گستره حوضه بنا به نقش مهم ترین متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه یکنواخت و منظم نبوده و پراکنده می باشد. با این حال قسمت شمالی حوضه به دلیل مورفودینامیک فعال برخاسته از ناهمواری و نیز بارندگی بالا عمدتاً از حساسیت بالایی به لحاظ وقوع زمین لغزش برخوردار می باشد. نتیجه هم پوشانی دو لایه جاده اصلی و روستاهای منطقه با لایه پهنه بندی کلاس بندی، نشانگر اهمیت مخاطره زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه است. قسمت عمده ای از جاده بین استانی نیر به سراب در پهنه های با خطر بالا واقع شده است. همچنین ۳۵ درصد روستاها در کلاس های حساسیت خیلی بالا و بالا، ۳۷ درصد در کلاس حساسیت متوسط و ۲۸ درصد نیز در کلاس های حساسیت کم و خیلی کم جای دارند.

۴- جمع‌بندی

این پژوهش تلاش نمود تا یک ارزیابی و پهنه‌بندی از حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه ارائه دهد. نتایج نشان می‌دهد کاربرد روش ارزش اطلاعاتی در جهت ارزیابی و شناسایی نواحی پرخطر و کم‌خطر ثمربخش بوده و نشان از کارایی خوب روش مورد نظر دارد. تهیه نقشه پهنه‌بندی در قالب طبقات حساسیت زمین‌لغزش نشان می‌دهد که بیش از نیمی از حوضه از حساسیت بالایی نسبت به وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. توزیع فضایی طبقات حساسیت در حوضه بالیخلی از توزیع فضایی متغیرهای مهم در بروز زمین‌لغزش پیروی کرده و تاییدی بر اعتبار مدل LIM می‌باشد. نتایج هم‌پوشی لایه‌های متغیرهای مستقل با لایه زمین‌لغزش‌های موجود نشان می‌دهد که شرایط بروز زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ متر، شیب بالای ۴۰ درجه، جهت شیب شمالی، زمین‌های مقعر، ناهمواری بالا، رسوبات سست و کم‌مقاوم (مارن، شیل و کنگلومرا)، بارندگی‌های ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر، شاخص پوشش گیاهی متوسط (۰/۵۵ - ۰/۳۵)، فاصله کمتر از ۵۰۰ متری گسل‌ها، فاصله کمتر از ۲۰۰ متری رودها و فاصله ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متری از جاده‌ها، بیشتر از سایر جاهاست؛ بنابراین علاوه بر نقشه پهنه‌بندی نهایی می‌توان به تفکیک هر یک از متغیرها نیز اولویت فضایی برای اعمال اقدامات پیشگیرانه و حفاظتی و دوری از پهنه‌های پرخطر در نظر گرفت. بررسی کم و کیف تأثیر متغیرهای مستقل بر وقوع زمین‌لغزش‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد و به‌ویژه در خصوص مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، نتایج حاصل با اصول اولیه ناپایداری دامنه‌ها مطابقت دارد. افزایش فراوانی زمین‌لغزش‌ها با افزایش میزان شیب و ناهمواری و کاهش فاصله از گسل در این راستا می‌باشد. سه عامل شیب، ناهمواری و گسل جزو مهم‌ترین عوامل اولیه در وقوع زمین‌لغزش هستند که در این مطالعه نیز به عنوان موثرترین عوامل شناخته شدند. چنین می‌نماید که مورفودینامیک مؤثر و فعال حاکم بر فرایندهای شکل‌زا در حوضه بالیخلی به تبع توزیع فضایی این سه عامل برقرار است.

با توجه مورفودینامیک فعال و حساسیت بالای قسمت شمالی حوضه به لحاظ وقوع زمین‌لغزش، بهتر است از اجرای پروژه‌های عمرانی بدون رعایت ضوابط زیست‌محیطی و ناپایداری دامنه در این قسمت از حوضه اجتناب شود. از آنجایی که افزایش پوشش گیاهی تأثیر کاهشی روی فراوانی زمین‌لغزش‌ها نداشته و زمین‌لغزش‌ها در مراتع بالادست نیز رخ داده‌اند، بایستی از دخل و تصرف در مراتع حوضه و چرای بی‌رویه دام‌ها جلوگیری به عمل آید. از طرفی، توجه به پایدارسازی دامنه‌ها و تثبیت آن‌ها در پیرامون جاده نیر به سراب و ایجاد دیوارهای حفاظتی در قسمت‌هایی ناپایدار، بسیار لازم می‌نماید.

کتابنامه

- آرمین، محسن؛ قربان‌نیا خیبری، وجیهه؛ ۱۳۹۸. مدیریت جامع پایش خطر زمین‌لغزش. نشریه دانش پیشگیری و مدیریت بحران. ۹ (۲). ۱۷۹-۱۹۲. <http://dpmk.ir/article-1-255-fa.html>
- بابلی مؤخر، حمید؛ شیرانی، کورش؛ تقیان، علیرضا؛ ۱۳۹۷. کارایی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه فهلیان. فصلنامه علوم زمین. ۲۸ (۱۰۹). ۲۰۰-۱۸۷. https://www.gsjournal.ir/article_80136.html
- بروغنی، مهدی؛ پوره‌اشمی، سیما؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ ۱۳۹۷. ارزیابی خطر و خسارت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز بقیع به روش‌های فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۸ (۲۹). ۱۸-۱. http://gps.gu.ac.ir/article_80350.html
- چورلی، ریچارد جی؛ شوم، استانلی ای؛ سودن، دیوید ای؛ ۱۳۹۲. ژئومورفولوژی، جلد سوم: فرآیندهای دامنه‌ای، آبراهه‌ای، ساحلی و بادی. ترجمه ابراهمی مقیمی و احمد معتمد. تهران: انتشارات سمت. ۴۵۵ ص.
- حفیظی، محمدکاظم؛ عباسی، بهمن؛ اشتری تلخستانی، احمد؛ ۱۳۸۹. بررسی زمین‌لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تأمین ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی و سه‌بعدی. مجله فیزیک زمین و فضا. ۳۶ (۱). ۲۸-۱۷. https://jesphys.ut.ac.ir/article_21455.html
- خدائی قشلاق، لیلما؛ روستائی، شهرام؛ حجازی، سید اسد...؛ ۱۳۹۶. ارزیابی روش رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه حاجیلرچای. فصلنامه جغرافیای طبیعی. ۱۰ (۳۷). ۵۷-۴۵. https://jopg.larestan.iau.ir/article_538236.html
- صدوق وینی، سید حسن؛ ثروتی، محدرضا؛ نصرتی، کاظم؛ اسدی، میترا؛ قربانی، محمدصدیق؛ ۱۳۹۴. پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات. فصلنامه دانش مخاطرات. ۲ (۱). ۱۱۶-۱۰۵. https://jhsci.ut.ac.ir/article_53924.html
- صمدزاده، رسول؛ ۱۳۹۴. ارزیابی پهنه‌های خطر زمین‌لغزش در جاده اردبیل - سرچم. فصلنامه پژوهش‌های دانش زمین. ۶ (۳). ۳۳-۱۹. https://esrj.sbu.ac.ir/article_95665.html
- عابدینی، موسی؛ قاسمیان، بهاره؛ شیرزادی، عطا...؛ ۱۳۹۳. مدل‌سازی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار). فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۱۲ (۳۷). ۱۰۲-۸۵. <https://dx.doi.org/10.22111/gdj.2015.1821>
- کرمی، فریبا؛ بیاتی خطیبی، مریم؛ خیری‌زاده، منصور؛ مختاری اصل، ابوالفضل؛ ۱۳۹۸. ارزیابی کارایی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه آبریز اهرچای. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۳۲ (۱۷-۱). <https://dx.doi.org/10.22067/geo.v8i4.83263>
- مجد باوی، اکبر؛ مومی‌پور، مهدی؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در محدوده سد شهید عباسپور. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۳۷ (۸۰-۶۵). https://geoeh.um.ac.ir/article_39853.html

محمدی، اقبال؛ سالاری، ممند؛ شیرزادی، هیوا؛ ۱۳۹۰. بررسی فرآیند زمین‌لغزش با تاکید بر زمین‌لغزش‌های بخشی از استان کردستان. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*. ۲۰(۷۹). ۶۵-۵۸.

http://www.sepehr.org/article_26334.html

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

<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=87061>

مقیم، ابراهیم؛ علوی‌پناه، سیدکاظم؛ جعفری، تیمور؛ ۱۳۸۷. ارزیابی و پهنه‌بندی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی آلاداغ (مطالعه موردی: حوضه زهکشی چناران در استان خراسان شمال). *فصلنامه پژوهش‌های*

جغرافیای طبیعی. ۶۴. ۷۵-۶۳. https://jphgr.ut.ac.ir/article_26906.html

یمانی، مجتبی؛ محمدی، ابوطالب؛ نگهبان، سعید؛ ۱۳۸۹. پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز توتکابن با استفاده از مدل‌های کمی. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*. ۸(۱۹)، ۹۸-۸۳. <https://dx.doi.org/10.22111/gdij.2010.1110>

Bai SB, Wang J, Lü GN, Zhou, PG, Hou SS, Xu SN., 2010. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.025>

Froude MJ, Petley DN., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>, 2018.

Kalimuthu H, Tan, WN, Lim SL, Fauzi MFA., 2015. Assessing frequency ratio method for landslide susceptibility mapping in Cameron Highlands, Malaysia. In 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd) (pp. 93-99). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7449440>

Mathew J, Jha VK, Rawat GS., 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. <https://doi.org/10.1080/01431160600928583>

Reichenbach P, Rossi M, Malamud BD, Mihir M, Guzzetti F., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>

Roback K, Clark MK, West AJ, Zekkos D, Li G, Gallen SF, Godt JW., 2018. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7. 8 Gorkha earthquake, Nepal. *Geomorphology*, 301, 121-138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.030>

Sujatha ER, Sridhar V., 2021. Landslide susceptibility analysis: a logistic regression model case study in Coonoor, India. *Hydrology*, 8(1), 1-18. <http://hdl.handle.net/10919/102713>

Van Westen CJ., 1995. *Statistical Landslide Hazard Analysis*. ITC- Publication Number 11, ITC, Enschede, The Netherlands. P.82.