

# تحلیل خطر زمین لغزش برای شناسایی محدودیت‌های توسعه کالبدی سکونتگاه‌های روستایی؛ مطالعه موردی: منطقه سوادکوه مازندران

علی عبدی نژاد\*، مجتبی یمانی\*\*، جعفر حسن پور\*\*\*، ابوالقاسم گورابی\*\*\*\*، مصطفی کریمی احمدآباد\*\*\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله:

۱۴۰۲/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۴۰۲/۰۷/۱۵

چکیده

زمین لغزش بعد از سیل و زلزله یکی از مهم‌ترین مخاطره‌های طبیعی در جهان است که سالانه باعث خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی می‌شود. منطقه سوادکوه در دامنه‌های شمالی البرز متأثر از عوامل اقلیمی، ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی - بیولوژیکی مستعد بروز زمین لغزش بوده است. هدف از این تحقیق، تحلیل خطر زمین لغزش برای شناسایی محدودیت‌های توسعه کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در منطقه سوادکوه مازندران است. به این منظور، ابتدا بر اساس سوابق، مشاهدات میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و...، بالغ بر ۳۱۹ زمین لغزش تدقیق و شناسایی شد. با بررسی و تحلیل عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر زمین لغزش شد بارش در وقوع بیش از ۱۸۰ زمین لغزش نقش کلیدی و محوری در منطقه داشته است. در این پژوهش، برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه از مدل مارکوس (MARCOs) بعنوان یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده شد، که با استفاده از نرم‌افزار GIS با تلفیق لایه‌های شیب، جهت‌شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، رودخانه و گسل، بارش و زلزله نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه در پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه شد. خروجی مدل نشان می‌دهد که بیش از ۶۳ درصد سطح منطقه و ۱۴۶ روستا در پهنه‌های با خطر زمین لغزش متوسط تا خیلی زیاد قرار گرفته‌اند که عمدتاً در ارتفاع کمتر از ۲۰۰۰ متر، شیبهای ۲۰ تا ۳۰ درجه، بستر سنگ‌های غنی از کانی‌های رسی (سازند شمشک، سازند سری قاره‌ای، رسوبات آبرفتی کواترنو...) و در فاصله ۱۰۰ متری جاده‌ها و رودخانه‌ها گسترش دارند. اعتبارسنجی مدل مذکور به روش نسبت تراکمی نشان داد که میزان دقت مدل مارکوس ۸۹/۱ درصد است که بیانگر دقت خیلی خوب روش مذکور است که وقوع ۲۸۳ زمین لغزش در پهنه‌های با خطر متوسط تا خیلی زیاد و وقوع ۳۸ زمین لغزش در بافت کالبدی روستاها و ۱۳۷ زمین لغزش به فاصله ۳۰۰ متری بافت روستاها در پهنه‌های مذکور، نشان از همخوانی بسیار خوب نتایج این مطالعه با تجربیات حاصل از مشاهدات میدانی و مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک انجام گرفته در منطقه است. از نتایج حاصل می‌توان در تهیه طرح‌های توسعه و عمران (جامع) ناحیه ای، طرح‌های پیشرفت و آبادانی منظومه‌های روستایی و طرح‌های هادی روستایی برای شناسایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض زمین لغزش و همچنین شناسایی قابلیت‌ها و محدودیت‌های توسعه کالبدی سکونتگاه‌های روستایی استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** خطر زمین لغزش، مدل مارکوس، ژئوتکنیک، سکونتگاه‌های روستایی، طرح هادی روستایی

\* دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*\* استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. myamani@ut.ac.ir

\*\*\* دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*\*\*\* دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*\*\*\*\* دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

## مقدمه

افزایش جمعیت در کشور و گسترش سکونتگاه‌ها، تخریب جنگل‌ها و مراتع، بهره‌برداری غیراصولی از اراضی در سطوح شیب‌دار برای احداث جاده و خطوط انتقال نیرو و همچنین ساخت‌وسازهای گسترده در این اراضی بدون توجه به اصول فنی و مهندسی، همراه با سایر عوامل محرک از جمله زلزله و بارش باعث افزایش وقوع حرکات دامنه‌ای در سطح گسترده‌ای از مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای کشور به‌ویژه در پیرامون سکونتگاه‌های شهری و روستایی شده است. امروزه بعد از مخاطرات سیل و زلزله بیشترین خسارات و تلفات جانی در جهان و کشور ایران ناشی از زمین‌لغزش است. شناسایی و پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش‌ها و تثبیت و پایدارسازی دامنه‌های بالقوه ناپایدار با چنین حجمی نیازمند انجام مطالعات خاص و اجرای طرح‌های ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها و پایدارسازی دامنه‌ها با صرف هزینه‌های هنگفت است که در شرایط موجود امکان تأمین اعتبار برای ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها و پهنه‌های در معرض خطر زمین‌لغزش فراهم نیست. بنیاد مسکن انقلاب اسلامی در اجرای وظایف قانونی خود از سال ۱۳۶۶ تا پایان سال ۱۴۰۱ برای بالغ بر ۴۱۰۰۰ سکونتگاه روستایی طرح هادی تهیه کرده است (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۴۰۲) و بررسی آسیب‌پذیری روستاها در مقابل سوانح طبیعی و ایمن‌سازی روستاها یکی از مفاد شرح خدمات تهیه طرح‌های هادی است که بر اساس طرح‌های بالادست همچون سامان‌دهی کالبدی سکونتگاه‌های روستایی، طرح‌های آبادانی و پیشرفت منظومه‌های روستایی، طرح‌های جامع شهرستان و ناحیه‌ای و مشاهدات میدانی مشاور با بررسی سوابق بروز مخاطرات طبیعی توسط مشاورین ذی‌صلاح تهیه می‌شود که نتیجه منجر به تهیه نقشه محدوده‌های در

معرض سوانح طبیعی روستا می‌شود. در همین چهارچوب در محدوده مورد مطالعه نیز برای بالغ بر ۲۵۰ روستا طرح هادی روستایی تهیه شده است. علی‌رغم این موضوع، به دلیل گسترش ساخت‌وسازها و بدون توجه به مطالعات مذکور و نظارت ضعیف دستگاه‌های متولی از یک طرف و عدم شناسایی صحیح مناطق آسیب‌پذیر توسط مشاورین و یا نبود مرجع خاص تخصصی در ارائه ضوابط ساخت‌وساز در پهنه‌های آسیب‌پذیر در مقابل زمین‌لغزش به مرجع صدور پروانه و... از سوی دیگر، باعث بروز خسارات جدی در مناطق روستایی کشور و منطقه سوادکوه شده است.

به استناد جزء ۸ بند الف ماده ۲۷ قانون برنامه ششم توسعه کشور «شناسایی روستاهای در معرض خطر سوانح طبیعی جهت اجرای طرح‌های ایمن‌سازی این سکونتگاه‌ها با همکاری دستگاه‌های مسئول و مشارکت مردم و نهادهای محلی، به‌نوعی که حداقل ۳۰ درصد روستاهای در معرض خطر تا پایان اجرای قانون برنامه ایمن‌سازی شوند» به‌عنوان تکلیف قانونی جزء وظایف دولت بوده است و به همین منظور مطالعات اولیه شناسایی و اولویت‌بندی روستاهای در معرض خطر در گام اول توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی به انجام رسیده و گام دوم آن نیز در دست تهیه است. علاوه بر آن، مطالعات تخصصی متعددی برای تثبیت و پایدارسازی دامنه‌های مستعد زمین‌لغزش به‌ویژه در بافت و پیرامون سکونتگاه‌های روستایی در اقصی نقاط کشور توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی انجام شده است، اما این مطالعات برای ایمن‌سازی روستاهای کشور کافی نبوده و همسو با این مطالعات وظیفه جامعه دانشگاهی و مراکز پژوهشی مرتبط است که با به‌کارگیری روش‌های کارآمد، به‌روز و ابتکاری، در

کاربردی، مناطق حساس به زمین لغزش را شناسایی و پهنه‌بندی کرد. نمونه‌هایی از این زمین لغزش‌ها و خسارات ناشی از رخداد آن‌ها در تصویر شماره ۱ نشان داده شده است.

انجام این مطالعات دستگاه‌های اجرایی را یاری کنند و یکی از این سوانح تأثیرگذار در سکونتگاه‌های شهری و روستایی مخاطره زمین لغزش است که ضروری است با انجام مطالعات هدفمند و با استفاده از مدل‌های مختلف



ت ۱. نمونه‌هایی از زمین لغزش‌های رخ داده ناشی از بارندگی‌های سال ۱۳۹۸-۱۴۰۰ در منطقه سوادکوه- الف) روستای ولیاب (روستای ممشی ج) کارمزد د) روستای کم‌پشت ه) جاده آلاشت- الله بند و) روستای ازراسی

خود در مناطق مختلف که اغلب منطبق بر حوضه‌های آبخیز بوده است؛ ضمن شناسایی و طبقه‌بندی زمین لغزش‌ها، عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش را بررسی و بر مبنای روش‌ها و مدل‌های مختلف اقدام به پهنه‌بندی زمین لغزش کرده‌اند. در برخی از پژوهش‌ها نیز متناسب با موضوع تحقیق، نقشه پهنه‌بندی خطر و حساسیت زمین لغزش نیز تهیه شده است و هریک از محققین در انجام تحقیقات خود به تناسب شرایط آن منطقه از روش‌ها و مدل‌های مختلفی استفاده کرده‌اند.

امروزه تحلیل و ارزیابی خطر، یک ابزار بسیار سودمند برای پیشگیری از رویداد فجایع عظیم انسانی و خسارت‌های کلان اقتصادی در مواجهه با بلایای طبیعی به حساب می‌آید. کاربردهای رسمی‌تر در اصول مدیریت و ارزیابی خطر زمین لغزش‌ها، به طریقی کیفی، در دهه ۱۹۷۰ میلادی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

این تحقیق با هدف تحلیل خطر زمین لغزش برای شناسایی محدودیت‌های توسعه کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در منطقه سوادکوه انجام شده است و برای دستیابی به آن از مدل آماری مارکوس<sup>۱</sup> استفاده شده است و بر پایه مدل مذکور، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه سوادکوه بر اساس شاخص‌ها و معیارهای محیطی تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش تهیه شد.

### ادبیات موضوع

تاکنون محققان در رشته‌ها و تخصص‌های مختلف در زمینه زمین‌شناسی، هیدرولوژی، منابع طبیعی و ژئومورفولوژی در سراسر دنیا مطالعات بسیار زیادی را در زمینه حرکات توده‌ای از جمله زمین لغزش انجام داده‌اند و تعاریف و طبقه‌بندی‌های مختلفی در مورد حرکات دامنه‌ای ارائه شده است. بر پایه تعاریف صورت گرفته از زمین لغزش، محققین در انجام مطالعات

در مدیریت شیب بزرگراه‌ها و برنامه‌ریزی شهری تجربه شده است. در دهه‌های اخیر روش‌های ارزیابی خطر در جهت کمی شدن و برای مدیریت شیب‌های منفرد، مسیرهای خطوط لوله، شیب‌های زیر سطح آب و مدیریت سایر شیب‌ها در جهان و در شرایط مختلف، گسترش یافتند (Fell et al., 2005). در ارزیابی خطر به‌طور کلی، به‌کارگیری روش‌های احتمالی، چه با رویکرد کیفی (توصیفی) و چه با رویکرد کمی (مقداری)، مطرح است (Morgenster, 1997). در سال‌های اخیر، تحلیل و ارزیابی خطر به یک ابزار مهم در تحلیل عدم قطعیت‌های ذاتی در خطر زمین‌لغزش تبدیل شده است (Dai et al., 2002).

در ایران، بیشتر مطالعات مربوط به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، از زمان رویداد زلزله منجیل (۱۳۶۹) که موجب ایجاد ۷۶ زمین‌لغزش مهم (حائری و همکاران، ۱۳۷۲) شد، آغاز و در اواخر دهه هفتاد رو به فزونی نهاد (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۸۸). در دهه‌های اخیر برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها از روش‌های مختلفی همچون تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) توسط اسلامی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه رودبار الموت، روش رگرسیون خطی و رگرسیون لجستیک، توسط کرم و تورانی (۱۳۹۱) در محور هراز از رودهن تا رینه، روش ارزیابی چندمعیاره به روش ترکیب خطی وزین (WLC) توسط کرم (۱۳۸۳) در منطقه سرخون چهارمحال و بختیاری، مدل ترکیبی نوین GWR توسط یمانی و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه دز علیا، روش حائری - سمیعی، توسط صیادی، هنردوست (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز خلین دره استان گلستان و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری برای شناسایی زمین‌لغزش‌ها و پایش آن‌ها به کمک تصاویر راداری Sentinel-1، landsat، ASTER، PALSAR، ASAR

و... با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی توسط گورابی (۱۳۹۶) در روستای مله کبود کرمانشاه، مدل مارکوس توسط مددی و پیروزی (۱۴۰۲) در حوضه بالادست سد یامچی استان اردبیل، مدل بیزین توسط سیلاخوری و همکاران (۱۴۰۲) در حوضه آبریز تالار مازندران و انواع روش‌ها و مدل‌های تجربی و آماری دیگر برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها استفاده شده است. در این تحقیق به‌منظور تحلیل خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه، از مدل آماری مارکوس استفاده شده است.

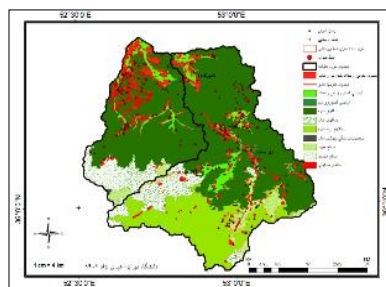
### روش تحقیق

#### محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه با مساحتی بالغ بر ۲۷۵۰ کیلومتر مربع در شرق استان مازندران و در مختصات جغرافیایی  $52^{\circ}30'44''$  تا  $52^{\circ}30'15''$  طول شرقی و  $35^{\circ}50'30''$  تا  $35^{\circ}50'11''$  عرض شمالی در دامنه شمالی رشته‌کوه‌های البرز مرکزی واقع شده است و از نظر موقعیت سیاسی منطبق با مرز سیاسی شهرستان‌های سوادکوه، سوادکوه شمالی و بخش‌هایی از شهرستان‌های بابل و ساری است (تصویر شماره ۲)، که از نظر هیدرولوژیکی منطبق بر حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های تالار و بابلرود (از زیر حوضه‌های آبریز دریای خزر) هستند و از منظر توپوگرافی بخش‌های جنوبی آن کوهستانی با شیب‌های تند است که به سمت شمال و ساحل دریای خزر به‌تدریج از ارتفاع و میزان شیب دامنه‌ها کاسته می‌شود و شیب متوسط منطقه ۱۹/۶ درجه است که میزان آن به‌تبع از شرایط مورفولوژی در مناطق مختلف منطقه متغیر است. همچنین ارتفاع متوسط منطقه ۱۳۱۰ متر از سطح دریای آزاد است که میزان آن حداکثر از ۴۰۰۵ متر تا حداقل ۱۴ متر در نوسان است.

نیمه مرطوب و مدیترانه‌ای است. متوسط دمای سالانه منطقه ۱۴/۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه بیش از ۶۳۰ میلی‌متر (حداقل ۵۰۰ میلی‌متر در ایستگاه آلاشت تا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در ایستگاه‌های شیرگاه، فیروز جاه و قرآن تالار) نشان از شرایط اقلیمی مرطوب در این منطقه است، به‌طوری‌که فصل پاییز با حدود ۳۰ درصد از بارندگی سالانه مرطوب‌ترین فصل سال و ماه‌های مهر و شهریور پرباران‌ترین و خرداد و مرداد کم‌باران‌ترین ماه‌های سال در منطقه هستند. همچنین حداکثر بارش ۲۴ ساعته منطقه با ۱۴۲ میلی‌متر در ۲۸ اسفند ۱۳۹۷ در ایستگاه پل سفید ثبت شده است که بر اثر بارندگی مذکور و ادامه آن در روزهای بعد منجر به وقوع چندین زمین‌لغزش در سطح منطقه شده است.

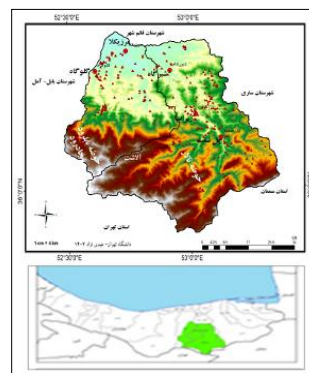
بر اساس نقشه کاربری اراضی (تصویر شماره ۴) بیش از ۷۲/۷ درصد از سطح منطقه دارای پوشش جنگلی است و ۲۰/۴ درصد نیز دارای کاربری زمین‌های کشاورزی و باغات در بخش‌های شمالی منطقه و در اراضی کم شیب آبرفتی هستند و مراتع و سکونتگاه‌های انسانی و رخنمون‌های سنگی سایر کاربری‌های منطقه را شامل می‌شوند.



ت ۴. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

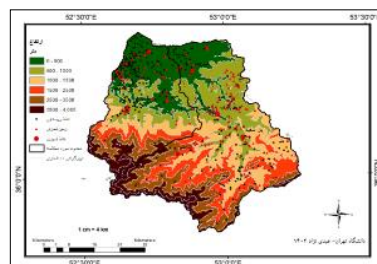
بر اساس طبقه‌بندی اشتوکلین، منطقه مورد مطالعه در زون ساختمانی البرز مرکزی و زیر زون‌های نئوژن شمالی و زون شمالی-مرکزی آن واقع شده است و شامل واحدهای چینه‌شناسی مختلفی از تریاس بالایی-ژوراسیک تا عهد حاضر است که در چینه‌شناسی البرز

تصویر شماره ۳، نقشه‌های مورفولوژی (شیب و ارتفاع) محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

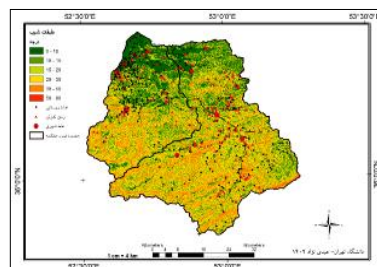


ت ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه (سوادکوه) در استان مازندران

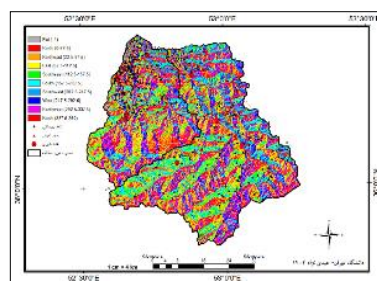
الف



ب



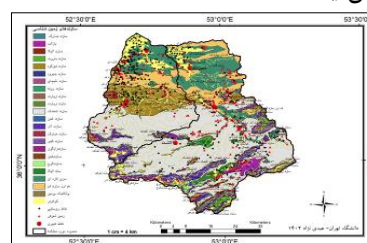
ج



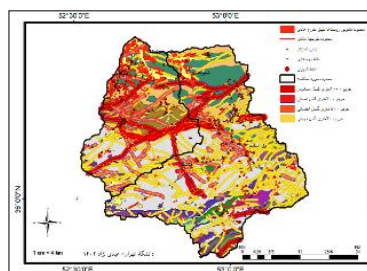
ت ۳ (۳) نقشه‌های مورفولوژی منطقه- (الف) طبقات ارتفاعی (ب) طبقات شیب (ج) جهات شیب

منطقه سوادکوه با توجه به شرایط مورفوکلیماتیکی حاکم بر آن، دارای تیپ‌های اقلیمی متفاوت مرطوب و

شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، ولکانیک کرتاسه، سنگ‌های آهکی و آهک مارنی کرتاسه بالایی، فجن، زیارت، معادل قم، معادل قرمز بالایی، سری‌های قاره‌ای و نهشته‌های کواترنری می‌شوند. همان‌طور که در تصویر شماره ۵ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ملاحظه می‌شود، اغلب این واحدها (به‌استثنای بخش کوچکی از ولکانیک واقع در منطقه) از نوع سنگ‌های رسوبی بوده و از نظر سنگ‌شناسی عمدتاً از ۱) شیل و ماسه‌سنگ زغال‌دار، ۲) مارن، گل‌سنگ، سیلتستون و ماسه‌سنگ ضعیف و ۳) سنگ‌آهک و دولومیت و آهک مارنی، تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها نسبت به پدیده‌های هوازدگی حساسیت متفاوتی داشته و بسته به ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها، نوع و تراکم پوشش گیاهی، میزان شیب دامنه و نوع غالب هوازدگی (باتوجه به اقلیم منطقه) خاک‌هایی با ضخامت و ویژگی‌های ژئوتکنیکی متفاوت بر روی آن‌ها گسترش یافته است.



الف) نقشه سازندهای زمین‌شناسی



ب) نقشه زمین‌ساخت (گسل‌ها)

ت. ۵. نقشه زمین‌شناسی (سازندها) و زمین‌ساخت

(گسل‌های) منطقه مورد مطالعه

جهت انجام تحقیق متناسب با اهداف پژوهش، از داده‌ها و اطلاعات دستگاه‌های مرتبط با موضوع استفاده شده است به‌طوری‌که به‌منظور تحلیل اقلیم منطقه از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی و وزارت نیرو واقع در محدوده مورد مطالعه و پیرامون آن از سال ۱۹۷۰ لغایت سال ۲۰۲۲، برای بررسی و تحلیل منابع آب از داده‌های هیدرومتری مربوط به رودخانه‌های تالارو بابلرود شرکت تمام وزارت نیرو، برای تحلیل شرایط زلزله‌خیزی منطقه از کاتالوگ زلزله‌های ثبت‌شده در شعاع ۵۰ کیلومتری منطقه (سایت مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی)، برای تحلیل شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه از لایه‌های رقومی‌شده زمین‌شناسی ورقه‌های قائم‌شهر، پل سفید و دماوند و شبکه گسل‌های منطقه با دقت ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، برای تحلیل ویژگی‌های مورفولوژی منطقه از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر در باند L تصاویر ماهواره‌ای استر خروجی از سایت ASF، جهت تهیه بانک اطلاعات زمین‌لغزش منطقه از بانک اطلاعات زمین‌لغزش‌های استان مازندران (سازمان جنگل‌ها و مراتع ۱۴۰۲)، مشاهدات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای لندست و گوگل ارث، جهت تهیه پوشش گیاهی به روش (NDVI) از تصاویر ماهواره‌ای لندست در فصول مختلف سال، برای تحلیل و بررسی ویژگی‌های جغرافیایی سکونتگاه‌های روستایی منطقه از نتایج سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران و جهت تحلیل سکونتگاه‌های روستایی در معرض زمین‌لغزش از نقشه‌ها و گزارش طرح‌های هادی روستایی تهیه‌شده توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی و



در مرحله دوم بر اساس مقادیر ایدئال (AI) و ضدایدئال (AAI)، معیارها بر اساس تأثیرشان بر وقوع زمین لغزش (عبارت B به معنی معیارهایی که رابطه مستقیم و عبارت C به معنی معیارهای که رابطه غیرمستقیم با وقوع زمین لغزش دارند) بر اساس روابط زیر موردسنجش قرار گرفتند.

$$AI = \max_i x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \min_i x_{ij} \text{ if } j \in C \quad (۱)$$

$$AAI = \max_i x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \min_i x_{ij} \text{ if } j \in C \quad (۲)$$

در مرحله سوم، با استفاده از روابط ۳ و ۴ معیارها در محیط GIS استانداردسازی (نرمال) شدند.

$$n_{ij} = \frac{x_{aj}}{x_{ij}} \text{ if } j \in C \quad (۳)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{aj}} \text{ if } j \in B \quad (۴)$$

در مرحله چهارم با استفاده از رابطه ۵ وزن معیارها (خروجی از AHP) را در ماتریس نرمال لایه‌های اطلاعاتی استاندارد شده ضرب کردیم تا ماتریس وزن دار حاصل شود.

$$V_{ij} = n_{ij} \times W_j \quad (۵)$$

در مرحله پنجم، بر اساس روابط ۶ و ۷ درجه مطلوبیت ایدئال ( $K^+$ ) و ضدایدئال ( $K^-$ ) گزینه‌ها محاسبه شد.

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (۶)$$

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad (۷)$$

در روابط بالا ( $i = 1, 2, \dots, m$ )  $S_i$  جمع مقادیر هر سطر در ماتریس وزن دار است که از رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (۸)$$

در مرحله ششم، با استفاده از رابطه ۹، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه شد.

نهایتاً برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مطالعات از مشاهدات میدانی صورت گرفته و مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک طرح‌های مطالعاتی تثبیت و پایداری روستاهای استان مازندران (۱۳۹۸-۱۳۹۹) تهیه شده توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (پژوهشکده سوانح طبیعی ۱۳۹۸) استفاده شده است.

#### ابزارها و مدل‌های مورد استفاده

در این پژوهش جهت پردازش، تلفیق و تحلیل اطلاعات کمی و کیفی (رقومی شده) جمع‌آوری شده از منطقه و بررسی نقش عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش و تهیه نقشه‌های موضوعی و کاربردی از نرم‌افزارهای کاربردی مختلفی همچون-ARCMAP10.8.1 SPSS-EDRISI-OFFICE EXPERTCHOICE SLIDE و... استفاده شده است.

همچنین برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه با بهره‌گیری از مطالعات و تجارب به دست آمده از مطالعات پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها به روش‌های مختلفی همچون تاپسیس<sup>۲</sup> و تراکم سطح، از مدل جدیدی به نام مارکوس استفاده شده است. در این روش، ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه‌حل سازشی انجام می‌گیرد. این روش در زمره تکنیک‌های رتبه‌بندی گزینه قرار دارد و یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چند معیاره است که توسط استیویک<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است و شباهت بسیار زیادی به روش آراس<sup>۴</sup> دارد و همانند روش تاپسیس به تعیین ایدئال‌های مثبت و منفی در ۷ مرحله به شرح زیر می‌پردازد؛

در مرحله اول معیارهای اصلی تأثیرگذار در زمین لغزش‌ها از قبیل بارش، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، زلزله و کاربری اراضی مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفتند.

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}}$$

در رابطه بالا  $f(K_i^-)$  عملکرد مطلوب ایدئال برای هر گزینه و  $f(K_i^+)$  عملکرد مطلوب ایدئال برای هر گزینه است که از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شده است.

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (10)$$

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (11)$$

در مرحله نهایی با استفاده از مقادیر به دست آمده از رابطه ۱۱، رتبه بندی صورت گرفت و بر مبنای آن نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه به روش مارکوس تهیه شد و بر اساس نتایج حاصل، منطقه مورد مطالعه به ۵ پهنه خطر خطر زمین لغزش خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه بندی شد.

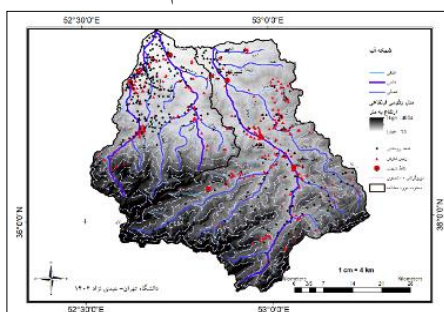
#### یافته ها

#### الف. عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش های منطقه

بر پایه زمین لغزش های شناسایی شده توسط سازمان جنگل ها و مراتع کشور (۲۲۱ زمین لغزش) و زمین لغزش های ناشی از بارش های اسفند ۱۳۹۷ و بهار سال ۱۳۹۸ (۱۷ زمین لغزش) و زمین لغزش های شناسایی شده در مشاهدات میدانی و همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره ای و گوگل ارث<sup>۶</sup> (۸۱ زمین لغزش) بانک اطلاعاتی زمین لغزش محدوده مورد مطالعه با ۳۱۹ زمین لغزش با مساحتی بالغ بر ۹۱۴ هکتار تشکیل شد و این بانک مبنای مطالعات حاضر جهت بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر زمین لغزش قرار گرفت.

نتایج حاصل از بررسی های به عمل آمده در خصوص عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه سوادکوه بیانگر آن است که این منطقه با توجه به موقعیت استقرارش در دامنه های شمالی البرز متأثر از تحولات

تکتونیکی ناشی از گسل های فعال در البرز مرکزی، به لحاظ مورفولوژی دارای شرایط خاصی است؛ اختلاف ارتفاع حدود ۴۰۰۰ متری منطقه با شیب متوسط ۱۹/۶ درجه، تنوع سازندهای زمین شناسی منطقه به ویژه گسترش سازند شمشک و تنوعی از سنگ های مارن، شیل و...، شرایط اقلیمی مرطوب و نیمه مرطوب منطقه با متوسط بارش سالانه ۶۳۰ میلی متر، شبکه آب های جاری دائمی و فصلی همچون رودخانه های تالار و بابلرود، وجود صدها چشمه با آبدهی متفاوت، تنوع و تراکم پوشش گیاهی جنگلی متراکم و...، مساعد برای هوازدهی فیزیکی و شیمیایی بوده و زمینه برای تشکیل خاک در منطقه در طول زمان فراهم شده است و در نیم قرن اخیر نیز به کمک عوامل انسانی ناشی از ساخت و سازهای شهری و روستایی و گسترش تأسیسات زیربنایی همچون جاده ها، خطوط انتقال انرژی، بهره برداری از معادن و...، زمینه برای وقوع زمین لغزش در منطقه بیشتر فراهم شده است.

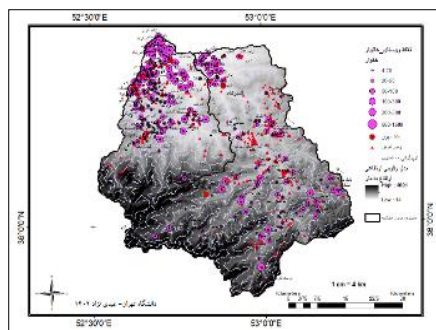


ت ۶. نقشه پراکنش جغرافیایی زمین لغزش های محدوده مورد مطالعه

به طوری که با توجه به انطباق زمان وقوع زمین لغزش ها با تاریخ بارندگی های ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته بیانگر آن است که عامل اصلی وقوع اکثر زمین لغزش ها در منطقه بارش بوده است؛ به طوری که از مجموع ۳۱۹ زمین لغزش در منطقه، بارش در وقوع ۱۸۰ زمین لغزش نقش کلیدی داشته و در ۴۸ زمین لغزش دیگر نیز بارش



زمین لغزش (۸۲/۴ درصد) در ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر و ۵۴ زمین لغزش در طبقات شیب کمتر از ۱۵ درجه اتفاق افتاده‌اند که بیانگر ارتباط معنادار توزیع جغرافیایی زمین لغزش‌ها با سکونتگاه‌های روستایی در محدوده مورد مطالعه است (جدول شماره ۲).



ت. توزیع جغرافیایی سکونتگاه‌های روستایی و توزیع جمعیت به تفکیک خانوار در منطقه سوادکوه

ج ۲. ارتباط سکونتگاه‌های روستایی با زمین لغزش در

طبقات ارتفاعی

| طبقات ارتفاعی | زمین لغزش | درصد | مساحت/هکتار | تعداد روستا | درصد |
|---------------|-----------|------|-------------|-------------|------|
| ۵۰۰-۰         | ۱۱۳       | ۳۵/۴ | ۶۹۳۱/۲      | ۱۶۳         | ۵۱/۷ |
| -۵۰۰-۱۰۰۰     | ۱۵۰       | ۴۷/۰ | ۴۰۴۷۴/۷     | ۸۷          | ۲۷/۶ |
| -۱۰۰۰-۱۵۰۰    | ۲۹        | ۹/۱  | ۴۴۹۷۶/۴     | ۱۷          | ۵/۹  |
| -۱۵۰۰-۲۰۰۰    | ۲۳        | ۷/۲  | ۵۴۴۷۹       | ۲۶          | ۸/۳  |
| -۲۰۰۰-۳۰۰۰    | ۴         | ۱/۳  | ۵۶۱۸۷/۶     | ۱۱          | ۳/۵  |
| -۳۰۰۰-۴۰۰۰    | ۰         | ۰/۰  | ۶۰۷۴۲/۸     | ۲۳          | ۰    |
| کل            | ۳۱۹       | ۱۰۰  | ۲۶۳۷۹۱/۶    | ۳۱۵         | ۱۰۰  |

بر اساس نقشه کاربری اراضی، ۱۰۴ روستا در پهنه کاربری اراضی زراعی و باغی، ۱۹۳ روستا در پهنه‌های جنگلی واقع شده‌اند که به ترتیب ۷۳ و ۲۳۲ زمین لغزش در کاربری‌های مذکور اتفاق افتاده است.

مطابق جدول شماره ۴، ۸۴ روستا در بستر رسوبات آبرفتی کواترنری، ۶۴ روستا در سازند شمشک، ۵۷ روستا در سازند سری قاره‌ای واقع شده‌اند که باتوجه به

عامل ثانویه داشته است و زمین‌شناسی در وقوع ۶۰ زمین لغزش تأثیر داشته و ترانشه جاده‌ها، رودخانه‌ها، گسل‌ها، زلزله‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش در منطقه بوده است و اغلب این لغزش‌ها در دامنه‌های با شیب بیش از ۱۰ درجه و در بستر خاک‌های نسبتاً کم عمق تا عمیق، کوهرفت‌ها و تراس‌های آبرفتی رودخانه‌ها رخ داده‌اند.

ب. تحلیل ارتباط فضایی سکونتگاه‌های روستایی با عوامل زمین لغزش در منطقه

بر اساس آمار سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران، بالغ بر ۳۱۵ سکونتگاه روستایی با جمعیتی بالغ بر ۷۸۹۹۷ نفر در منطقه مورد مطالعه ساکن هستند که از این تعداد، ۲۳۷ روستا بالای ۲۰ خانوار (۷۵/۲ درصد) و ۷۸ آبادی (۲۴/۸ درصد) زیر ۲۰ خانوار هستند که در این بین ۳ روستا بالای ۵۰۰ خانوار، ۱۲ روستا ۳۰۰ تا ۵۰۰ خانوار، ۴۹ روستا ۱۰۰ تا ۳۰۰ خانوار، ۷۴ روستا ۵۰ تا ۱۰۰ خانوار و ۹۹ روستای دیگر بین ۲۰ تا ۵۰ خانوار هستند (جدول شماره ۱) و (تصویر شماره ۷).

ج ۱. توزیع جغرافیایی سکونتگاه‌های روستایی و توزیع

جمعیت به تفکیک خانوار در منطقه سوادکوه

| خانوار     | تعداد روستا | درصد | جمعیت | درصد |
|------------|-------------|------|-------|------|
| بالای ۵۰۰  | ۳           | ۱/۰  | ۷۴۲۸  | ۹/۴  |
| ۵۰۰-۳۰۰    | ۱۲          | ۳/۸  | ۱۳۳۶۴ | ۱۶/۹ |
| ۳۰۰-۱۰۰    | ۴۹          | ۱۵/۶ | ۲۷۳۸۲ | ۳۴/۷ |
| ۱۰۰-۵۰     | ۷۴          | ۲۳/۵ | ۱۶۵۰۶ | ۲۰/۹ |
| ۵۰-۲۰      | ۹۹          | ۳۱/۴ | ۱۰۳۷۱ | ۱۳/۱ |
| کمتر از ۲۰ | ۷۸          | ۲۴/۷ | ۳۹۴۶  | ۵/۰  |
| کل         | ۳۱۵         | ۱۰۰  | ۷۸۹۹۷ | ۱۰۰  |

نقشه‌های مورفولوژی منطقه (سطوح ارتفاعی و طبقات شیب) نشان می‌دهد که ۷۹/۳ درصد (۲۵۰ روستا) از روستاهای منطقه در طبقات ارتفاعی کمتر از ۱۰۰۰ متر و ۲۱۴ روستا (معادل ۶۷/۹ درصد) در شیب کمتر از ۱۵ درجه استقرار یافته‌اند و همچنین ۲۶۳

گسترده‌ی سازندهای مذکور در منطقه و ارتباط آن با سایر پارامترهای محیطی، ۷۶ زمین لغزش در سازند شمشک، ۶۸ زمین لغزش در سازند سری قاره‌ای ۶۲ زمین لغزش در سازند هم‌ارز سازند قم و ۴۵ زمین لغزش نیز در رسوبات کواترنری رخ داده است که متأثر از پارامترهای دیگر همچون شیب دامنه‌ها، تراکم زهکشی، بهره‌برداری از معادن زغال‌سنگ و...، تعداد و تراکم زمین لغزش‌ها در این سازندها بیشتر از سایر سازندهای منطقه همچون لار، زیارت، مبارک، کرج، فجن، کهر، جیرو، الیکا و... است.

### ج ۳. ارتباط سکونتگاه‌های روستایی با زمین لغزش در پهنه‌های کاربری اراضی

| درصد | تعداد روستا | درصد | تعداد زمین لغزش | درصد | مساحت به هکتار | نوع کاربری                |
|------|-------------|------|-----------------|------|----------------|---------------------------|
| ۳۲/۱ | ۱۰۱         | ۲۰/۱ | ۶۴              | ۰/۷  | ۱۸۵۷۷/۸        | اراضی کشاورزی آبی و باغات |
| ۰/۳  | ۱           | ۰/۳  | ۱               | ۰/۱  | ۱۳۹/۵          | اراضی کشاورزی دیم         |
| ۴۶/۷ | ۱۴۷         | ۵۷/۶ | ۱۸۴             | ۵۸/۷ | ۱۵۴۲۹۰/۹       | جنگل‌های انبوه            |
| ۴/۴  | ۱۴          | ۱/۶  | ۵               | ۶/۹  | ۱۸۱۵۶/۹        | جنگل‌های تنک              |
| ۱۰/۲ | ۳۲          | ۱۳/۵ | ۴۳              | ۱۷/۳ | ۴۵۷۶۳/۵        | جنگل‌های نیمه انبوه       |
| ۰/۰  | ۰           | ۰/۰  | ۰               | ۰/۱  | ۱۷۷/۸          | رخمون‌های سنگی            |
| ۵/۴  | ۱۷          | ۳/۸  | ۱۲              | ۴/۷  | ۱۲۲۸۵/۵        | مراعی خوب                 |
| ۰/۳  | ۱           | ۰/۶  | ۲               | ۵/۰  | ۱۳۱۸۱/۷        | مراعی متوسط               |
| ۰/۶  | ۲           | ۲/۵  | ۸               | ۰/۵  | ۱۲۱۸/۳         | مناطق مسکونی              |
| ۱۰۰  | ۳۱۵         | ۱۰۰  | ۳۱۹             | ۱۰۰  | ۲۶۳۷۹۱/۹       | جمع کل                    |

### ج ۴. ارتباط سکونتگاه‌های روستایی با زمین لغزش بر اساس نقشه زمین‌شناسی

| درصد | تعداد روستا | درصد | زمین لغزش | درصد | مساحت/هکتار | سازند           |
|------|-------------|------|-----------|------|-------------|-----------------|
| ۲۰/۳ | ۶۴          | ۲۳/۸ | ۷۶        | ۴۱/۷ | ۱۱۰۳۸۱/۸۵   | سازند شمشک      |
| ۱۸/۱ | ۵۷          | ۲۱/۳ | ۶۸        | ۱۳/۸ | ۳۶۳۵۵/۸۳    | سری قاره‌ای     |
| ۱۵/۲ | ۴۸          | ۱۹/۴ | ۶۲        | ۱۰/۷ | ۲۸۱۴۱/۱۳    | هم‌ارز سازند قم |
| ۲۶/۷ | ۸۴          | ۱۴/۱ | ۴۵        | ۸/۴  | ۲۲۲۱۵/۵۹    | کواترنری        |
| ۷/۳  | ۲۳          | ۱۳/۲ | ۴۲        | ۸/۸  | ۲۳۲۱۵/۰۸    | سازند تیزکوه    |
| ۲/۲  | ۷           | ۲/۸  | ۹         | ۰/۴  | ۱۱۷۰/۰۳     | سازند فجن       |
| ۲/۲  | ۷           | ۲/۲  | ۷         | ۳    | ۷۹۷۵        | سند الیکا       |
| ۲/۶  | ۸           | ۱/۶  | ۵         | ۲/۵  | ۶۵۳۹        | بازالت          |
| ۵/۴  | ۱۷          | ۱/۶  | ۵         | ۱۲   | ۳۱۱۵۰       | سایر سازندها    |
| ۱۰۰  | ۳۱۵         | ۱۰۰  | ۳۱۹       | ۱۰۰  | ۲۶۳۷۹۱/۹    | کل              |

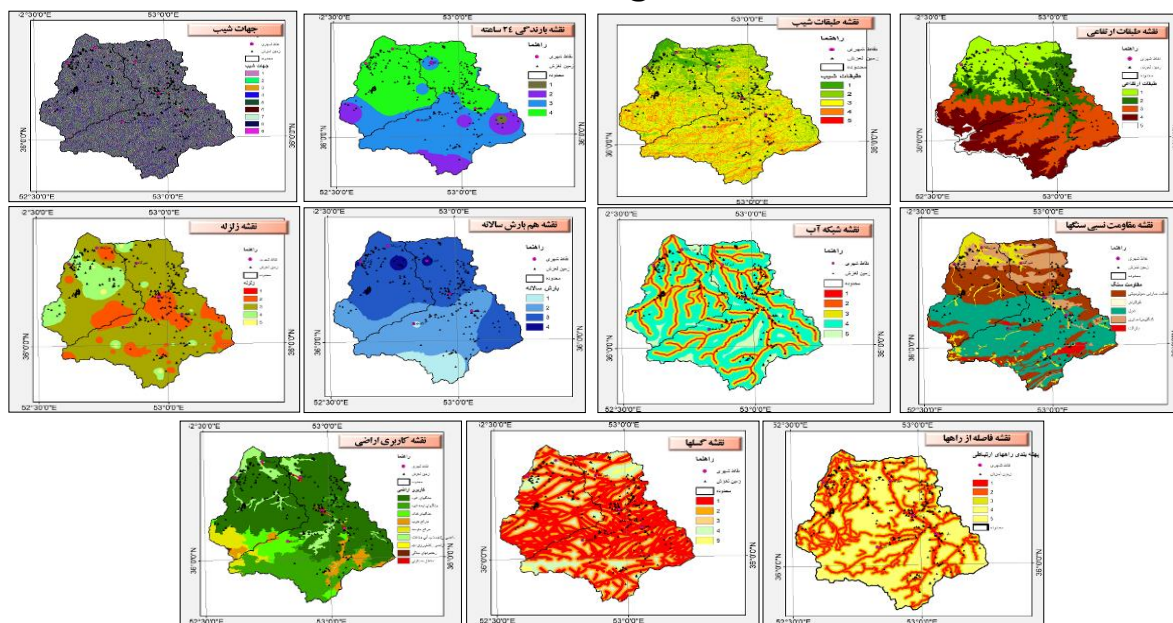
نتایج حاصل از بررسی ارتباط فضایی سکونتگاه‌های روستایی با زمین لغزش‌ها در منطقه سوادکوه، بیانگر آن است که به تبعیت از مورفولوژی منطقه، اغلب روستاها در طبقات ارتفاعی کمتر از ۱۰۰۰ متر با شیب کمتر از ۲۰ درجه استقرار یافته‌اند که اغلب این اراضی را کوهپایه‌ها با کاربری زراعی و باغی واقع در مخروط افکنه‌ها و رسوبات آبرفتی رودخانه‌های تالار، بابل رود و انشعابات آن‌ها تشکیل می‌دهند که به دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه سوادکوه و واقع شدن در خط آهن شمال-جنوب و محور ارتباطی بین استان‌های تهران، سمنان، گلستان و مازندران، تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی زراعی و باغی به سکونتگاه‌ها، ساخت‌وساز در منطقه گسترش زیادی داشته است.

بر اساس اطلاعات اخذشده از بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (۱۴۰۲)، تا پایان سال ۱۴۰۱ برای ۲۵۰ روستا در محدوده مورد مطالعه طرح هادی تهیه شده است که با بررسی موقعیت زمین لغزش‌ها نسبت به محدوده طرح‌های هادی مصوب، بالغ بر ۳۸ زمین لغزش در بافت مسکونی روستاها و ۱۳۷ زمین لغزش به فاصله ۳۰۰ متری از خط محدوده مصوب طرح‌های هادی روستایی اتفاق افتاده است که به نوعی روستاها را تهدید می‌کنند که در این تحقیق تلاش شده این پهنه‌ها بر اساس خروجی مدل مارکوس مشخص و مبنای برنامه‌ریزی برای توسعه آتی روستاها در فرایند بازنگری طرح‌های هادی روستایی قرار گیرد.

### ج. پهنه‌بندی و تحلیل خطر زمین لغزش

برای انجام پهنه‌بندی زمین لغزش به مدل مارکوس بر اساس مراحل هفت‌گانه اشاره‌شده، ابتدا عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه را برحسب میزان اثر آن‌ها (به صورت مستقل و وابسته) بر وقوع زمین لغزش (ازجمله: شیب، جهت شیب، میزان بارش (بارش ۲۴

حاصله شده به ترتیب لیتولوژی با ضریب وزنی ۰/۲۸۰، بیشترین درجه اهمیت و معیارهای بارش با ۰/۲۰۷، شیب ۰/۲۰۱، جاده با ۰/۱۰۴، رودخانه با ۰/۰۶۹، کاربری اراضی با ضریب ۰/۰۵۱، گسل با ۰/۰۳۸ و زلزله با ۰/۰۳۰ و جهت شیب با ۰/۰۲۰ به ترتیب در رتبه های بعدی از نظر درجه اهمیت قرار گرفتند که نتایج حاصله شده برای پهنه بندی زمین لغزش به روش مارکوس استفاده شده است.



ت. ۶. نقشه های استاندارد شده جهت پهنه بندی خطر زمین لغزش

بر اساس خروجی حاصل از پهنه بندی زمین لغزش صورت گرفته به مدل مارکوس در محیط GIS مطابق تصویر شماره ۷، نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه با اعمال ضرایب و وزن ها مربوطه به تفکیک برای لایه های نه گانه فوق الذکر ترسیم شد و بر پایه نقشه خروجی منطقه مورد مطالعه به ۵ پهنه با خطر زمین لغزش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی شد.

بر اساس نتایج حاصل از نقشه تحلیل خطر زمین لغزش به روش مارکوس، بیش از ۴۲/۵ درصد از

مساحت منطقه (معادل ۱۱۲۲۳۳ هکتار) در پهنه با خطر زمین لغزش متوسط، ۳۰/۶ درصد معادل ۸۰۶۱۱ هکتار در پهنه با خطر زمین لغزش کم، ۱۸/۹ درصد (۴۹۸۵۶ هکتار) در پهنه با خطر زمین لغزش زیاد، ۶/۵ درصد (۱۷۲۵۸ هکتار) در پهنه با خطر زمین لغزش خیلی کم و ۱/۵ درصد (کمتر از ۳۸۳۴ هکتار) در پهنه با خطر زمین لغزش خیلی زیاد قرار دارند.

نتایج حاصل از نقشه تهیه شده مؤید آن است که پهنه های با خطر زمین لغزش متوسط، زیاد و خیلی زیاد (بالغ بر ۶۲/۹ درصد از سطح منطقه) در شیب های بین

۹-۱ به حالت مقایسه های جفتی (دودویی) امتیازدهی گردید و بر پایه نتایج

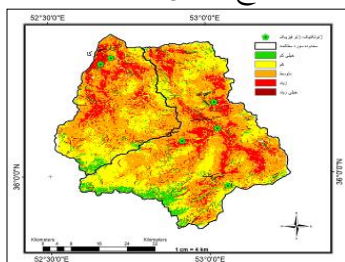
۲۰ تا ۵۰ درجه، در طبقات ارتفاعی ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری از سطح دریا، در سازندهای قرمز بالایی، هم‌ارز سازند قم، سازند شمشک و رسوبات آبرفتی دوران چهارم و سنگ‌های مارن و رس و شیل، در پهنه کاربری اراضی جنگل‌های نیمه‌انبوه و تنک و اراضی زراعی و باغی، در فاصله ۳۰۰ متری جاده‌های ارتباطی، در حریم ۷۰۰ متری گسل‌های اصلی و نزدیکی کانون زلزله‌ها و در اقلیم مرطوب و خیلی مرطوب با بارش سالانه ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر و حداکثر بارش ۲۴ ساعته بالای ۵۰ میلی‌متر واقع شده‌اند و در مقابل پهنه‌های با خطر آسیب‌پذیری کم و خیلی کم عمدتاً در شیب‌های کمتر از ۵ درجه و بالاتر از ۵۰ درجه، ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر و بالاتر از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، بازالیت و سنگ‌آهک دولومیتی و دشت آبرفتی، مراتع ضعیف و بایر و صخره‌ای و دور از جاده‌ها و خطوط گسل و کانون‌های زلزله و میزان بارش کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است که در این بین، نقش بارش، زمین‌شناسی و همچنین نزدیکی به جاده‌ها و رودخانه‌ها و عوامل انسانی بیشتر از سایر عوامل در تعیین پهنه‌های با خطر زمین‌لغزش زیاد تأثیرگذار هستند و باتوجه‌به واقع شدن در دامنه‌های شمالی البرز و شرایط اقلیمی مرطوب حاکم بر منطقه، جهت شیب‌ها برعکس سایر مناطق اقلیمی تأثیر چندانی در توزیع فراوانی زمین‌لغزش‌ها ندارد و همچنین باتوجه‌به موقعیت جغرافیایی منطقه سوادکوه به دلیل استقرار در حدفاصل دریای خزر و ارتفاعات البرز، افزایش ارتفاع و دوری از دریا به‌عنوان منبع رطوبت در بارش ارتباط مستقیم دارد، به‌طوری‌که در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر شاهد کاهش میزان بارش نسبت به سطوح ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر و به‌تناسب آن افزایش میزان شیب دامنه‌ها و کاهش حجم آبرفت‌ها و ضخامت کم خاک و...، تعداد زمین‌لغزش‌های اتفاق‌افتاده کمتر

بوده و به‌تناسب آن، پهنه‌های با خطر خطر زمین‌لغزش زیاد در این مناطق کمتر از سایر مناطق مورد مطالعه بوده است. همچنین یکی دیگر از نتایج تحقیق حاضر تعداد کم زمین‌لغزش‌ها در پیرامون خطوط گسل و کانون زلزله‌های حادث‌شده در منطقه است که علت آن را می‌توان موقعیت گسل‌ها و زلزله در ارتفاعات و در خطوط تغییر شیب (کنیک‌ها) و ضخامت کم رسوبات دامنه‌های به دلیل شیب زیاد دامنه‌ها دانست، البته محدودیت‌های شناسایی زمین‌لغزش در این مناطق به دلیل فاصله از جاده‌های ارتباطی و نداشتن جاده ارتباطی مناسب، صعب‌العبور بودن امکان شناسایی میدانی زمین‌لغزش در این مناطق برای محققین فراهم نبود؛ هرچند در این تحقیق از ابزارهای مختلفی همچون سنجش‌ازدور با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای (نوری و راداری) برای شناسایی زمین‌لغزش‌ها استفاده شده است که به دلیل شکل متفاوت حرکات دامنه‌ای در این مناطق که اغلب واریزه‌های سنگی و سنگ افتان هستند، شناسایی آن‌ها برای دستیابی به اهداف کامل پژوهش کافی نبود؛ هرچند در ارتباط با ایمن‌سازی سکونتگاه‌های روستایی نتایج مطالعات حاضر کافی و قابل اطمینان است.

#### ه. انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با مشاهدات میدانی و مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک (ژئوالکتریک)

انطباق زمین‌لغزش‌های منطقه با پهنه‌بندی صورت‌گرفته بیانگر آن است که بر اساس جدول شماره ۵، از مجموع ۳۱۹ زمین‌لغزش در منطقه، بیش از ۱۷۴ زمین‌لغزش (معادل ۵۴/۵ درصد) در پهنه با خطر زمین‌لغزش زیاد، ۱۰۰ زمین‌لغزش (۳۱/۳ درصد) در پهنه با خطر زمین‌لغزش متوسط، ۲۹ زمین‌لغزش در پهنه با خطر زمین‌لغزش کم و ۹ و ۷ زمین‌لغزش دیگر به

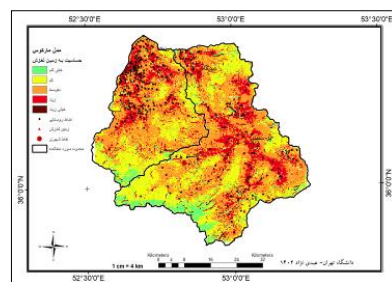
از جمله این زمین لغزش ها، می توان به زمین لغزش های رخ داده در روستای ارکا، ازراسی، ممشی، استخرسر، کمرپشت و سی پی در سطح منطقه سوادکوه در حوضه های آبخیز تالار و بابلرود اشاره نمود (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸) که باعث خسارات قابل توجهی شدند. در تصویر شماره ۸، موقعیت این زمین لغزش ها بر روی نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، این زمین لغزش ها در محدوده پهنه های با خطر زمین لغزش زیاد و خیلی زیاد واقع شدند که نشان از پتانسیل بالای این دامنه ها برای وقوع لغزش دارد.



ت ۸. موقعیت زمین لغزش های ارکا، ازراسی، ممشی، استخرسر، کمرپشت و سی پی در نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش مارکوس

نتایج حاصل از مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک در این زمین لغزش ها نیز نشان داد که بارندگی و اشباع شدن دامنه اثر قابل توجهی بر ضریب ایمنی پایداری خاک دارد، به گونه ای که هنگامی که دامنه اشباع از آب باشد (یعنی زمانی که بارندگی های با شدت و مدت زیاد رخ می دهند) ضریب ایمنی دامنه در مقابل گسیختگی های از نوع شیب نامحدود و دایره ای کمتر از ۱ خواهد بود. همچنین، جنگل زدایی و به دنبال آن اشباع شدن بیش از حد خاک در فصول پربارش در چنین مناطقی به تسریع وقوع پدیده زمین لغزش کمک نموده است که به عنوان مثال در محدوده زمین لغزش های واقع شده در روستاهای سی پی، ازراسی، ارکا باوجود

ترتیب در پهنه های با خطر زمین لغزش خیلی زیاد و خیلی کم واقع شده اند.



ت ۷. نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه به روش مارکوس

همچنین مطابق جدول شماره ۵، از ۳۱۵ سکونتگاه روستای واقع در محدوده مورد مطالعه ۷ روستا در پهنه خطر زمین لغزش خیلی کم، ۱۶۲ روستا (معادل ۵۱ درصد) در پهنه خطر زمین لغزش کم، ۱۰۳ سکونتگاه روستایی (معادل ۳۳ درصد) در پهنه خطر زمین لغزش متوسط و ۳۷ روستا معادل ۱۲ درصد در پهنه خطر زمین لغزش زیاد و ۶ روستا در پهنه خطر زمین لغزش خیلی شدید قرار گرفته اند.

ج ۵. توزیع جغرافیایی زمین لغزش ها و نقاط روستایی در پهنه های خطر زمین لغزش

| خطر       | زمین لغزش | درصد | تعداد روستا | درصد | مساحت به هکتار | درصد | دقت |
|-----------|-----------|------|-------------|------|----------------|------|-----|
| خیلی کم   | ۷         | ۲    | ۷           | ۲    | ۱۷۲۵۸          | ۷    | ۸۹  |
| کم        | ۲۹        | ۹    | ۱۶۲         | ۵۱   | ۸۰۶۱۱          | ۳۱   |     |
| متوسط     | ۱۰۰       | ۳۱   | ۱۰۳         | ۳۳   | ۱۱۲۲۳۳         | ۴۲   |     |
| زیاد      | ۱۷۴       | ۵۵   | ۳۷          | ۱۲   | ۴۹۸۵۷          | ۱۹   |     |
| خیلی زیاد | ۹         | ۳    | ۶           | ۲    | ۳۸۳۳           | ۱    |     |
| کل        | ۳۱۹       | ۱۰۰  | ۳۱۵         | ۱۰۰  | ۲۶۳۷۹۲         | ۱۰۰  |     |

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، ناشی از بارندگی های اسفند ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸، تعداد زیادی زمین لغزش در نقاط مختلف حوضه به وقوع پیوست. برخی از این زمین لغزش ها به دلیل اثر مستقیم بر سکونتگاه های روستایی در سال ۱۳۹۸ مورد مطالعه دقیق قرار گرفتند.

شیب کم حرکت توده لغزشی در ابعاد نسبتاً وسیع رخ داده است (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸).

اعتبارسنجی مدل به روش نسبت تراکمی نشان داد که دقت مدل مارکوس ۸۹/۱ درصد است که بیانگر دقت خیلی خوب روش مذکور است که وقوع ۲۸۳ زمین لغزش در پهنه‌های با خطر متوسط به بالا نشان از همخوانی نسبتاً خوب نتایج این مطالعه با تجربیات حاصل از مشاهدات میدانی و مطالعات ژئوتکنیک انجام گرفته در منطقه است. نتایج این مطالعه نشان داد که منطقه سوادکوه مازندران در معرض خطر زمین لغزش است و برنامه‌های مدیریتی برای کاهش خطر زمین لغزش ضروری است. این برنامه‌ها باید بر کاهش عوامل مؤثر بر زمین لغزش مانند بارش، شیب و کاربری اراضی تمرکز کنند. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته از برخی از طرح‌های هادی روستایی تهیه شده در محدوده مورد مطالعه (بالغ بر ۳۰ طرح از مشاورین مختلف در مناطق مختلف محدوده مورد مطالعه) مشخص شد در فرایند تهیه طرح‌های هادی روستاهای مذکور صرفاً به پهنه‌بندی خطر منطقه در برابر زلزله بر اساس مطالعات مرکز تحقیقات مسکن وزارت راه و شهرسازی و اعمال حرایم مربوط به رودخانه‌ها به عنوان پهنه‌های در معرض سوانح طبیعی بسنده شده است و به موضوع زمین لغزش که اغلب روستاهای منطقه را تهدید می‌کند توجه خاصی نشده است و صرفاً در ضوابط مربوط به طرح‌های هادی به صورت کلی به آن اشاره شده است. بنابراین با توجه به مقیاس این مطالعه (ناحیه‌ای) از مشاورین طرح‌های جامع شهرستان، طرح‌های توسعه پایدار منظومه‌های روستایی و نهایتاً مشاورین طرح‌های هادی روستایی انتظار داشت تا در فرایند تهیه طرح‌های مذکور، توجه ویژه‌ای به مخاطرات طبیعی و ترجیحاً این نوع مخاطره

در پهنه‌های با خطر زمین لغزش بالا در منطقه سوادکوه داشته باشند. در همین رابطه، ضروری است با بهره‌گیری از دانش متخصصین در رشته‌های زمین‌شناسی مهندسی، منابع طبیعی و جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی و اقلیم‌شناسی) متناسب با اهداف طرح مطالعاتی در ارائه خدمات عمومی-زیربنایی و گسترش آتی روستاها به این سمت از اراضی پرهیز کنند و از نتایج مطالعات مذکور و سایر مطالعات کاربردی دستگاه‌های تخصصی از جمله سازمان جنگل‌ها و مراتع در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و مدیریت جامع منابع به نحو شایسته‌ای استفاده کنند.

### نتیجه

نتایج بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه سوادکوه نشان داد که بارش، زمین‌شناسی و همچنین نزدیکی به جاده‌ها و رودخانه‌ها و عوامل انسانی در تعیین پهنه‌های با خطر خطر زمین لغزش از نقش بیشتری نسبت به سایر عوامل برخوردار هستند. همچنین جهت شیب‌ها و نزدیکی به کانون‌های زلزله و نزدیکی به خطوط گسل و نزدیکی به چشمه‌ها، برخلاف سایر مناطق تأثیر چندانی در توزیع فراوانی زمین لغزش‌ها ندارد. در این بین، بارش در وقوع زمین لغزش‌ها نقش محوری و کلیدی داشته است، به‌طوری‌که بررسی ارتباط میان فاصله زمانی بارش‌ها با وقوع زمین لغزش‌ها نشان داد که همخوانی و همبستگی قابل قبولی بین بارش و وقوع زمین لغزش در منطقه سوادکوه وجود دارد، به‌طوری‌که بارش در وقوع ۱۸۰ زمین لغزش نقش کلیدی و مؤثر داشته است که این موضوع هشدار می‌دهد برای برنامه‌ریزان محیطی در منطقه سوادکوه که در مطالعات طرح‌های مرتبط با ایمن‌سازی سکونتگاه‌های روستایی و کاهش خطر به نقش بارش در زمین لغزش تمرکز بیشتری داشته باشند.



ضروری است. این برنامه‌ها باید بر کاهش عوامل مؤثر بر زمین لغزش مانند بارش، شیب و کاربری اراضی تمرکز کنند. در پایان توصیه می‌شود بر پایه نتایج این تحقیق در گام اول برای شناسایی و تدقیق روستاهای واقع در پهنه‌های با خطر زمین لغزش بالا (پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد) اقدام شود. در گام بعدی در اراضی مستعد زمین لغزش در بافت و پیرامون روستاها به‌ویژه در طرح‌های هادی (بازنگری) روستایی شناسایی و نقشه پهنه‌بندی مخاطره زمین لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰ در سطح روستا و ۱:۲۵۰۰۰ در سطح منطقه تهیه شود. در گام سوم ضوابط، توصیه‌ها، دستور کارهای اجرایی لازم جهت مقابله و پیشگیری از وقوع زمین لغزش ارائه شود و در گام نهایی بر پایه مطالعات تخصصی ایمن‌سازی، بر پایه نقشه جزئیات اجرایی نسبت به ایمن‌سازی روستاها و تثبیت و پایدارسازی دامنه‌های ناپایدار و مستعد زمین لغزش اقدام کرد.

#### تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت پژوهشکده سوانح طبیعی در قالب طرح پژوهشی تحت عنوان «ارتباط مورفولوژی و لیتولوژی دامنه‌های البرز شمالی با آستانه‌های بارش و وقوع زمین لغزش (منطقه سوادکوه مازندران)» انجام شده است. بدین وسیله از زحمات و حمایت‌های آقایان دکتر گرکانی و دکتر صبوری رییس و معاون محترم مالی پژوهشکده و سایر دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها و نهادها و... که نهایت همکاری را در ارائه آمار و اطلاعات موردنیاز پژوهش داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنیم.

#### پی‌نوشت

1. Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS)  
(سنجش و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه‌حل سازشی)

در این مطالعه، مدل مارکوس برای پهنه‌بندی و تحلیل خطر زمین لغزش در منطقه سوادکوه مازندران استفاده شد. خروجی مدل نشان داد که بیش از ۶۲/۹ درصد از سطح منطقه در معرض خطر زمین لغزش است. مناطق خطر زمین لغزش بالا در سطوح ارتفاعی ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، اراضی با شیب ۲۰ تا ۳۰ درجه، در بستر سنگ‌های غنی از کانی‌های رسی (سازند شمشک، سازند سری قاره‌ای، هم‌ارز سازند قم و رسوبات آبرفتی عهد حاضر) فاصله حداقل ۱۰۰ تا ۳۰۰ متری جاده‌ها و رودخانه‌ها و خطوط هم‌تراز متوسط بارش سالانه بیش از ۶۰۰ میلی‌متر و حداکثر بارش ۲۴ ساعته بالای ۴۰ میلی‌متر هستند.

تلفیق نتایج مطالعات صورت‌گرفته با نتایج مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک انجام‌گرفته در روستاهای ارکا، ازراسی، ممشی، استخرسر، کمر پشت، فیروزجاه، کارمزد، ولیلا، لاجیم، سی پی و... در منطقه نشان می‌دهد که اشباع شدن دامنه‌ها پس از بارندگی اثر قابل‌توجهی بر ضریب ایمنی پایداری خاک دارد، به‌گونه‌ای که هنگامی که دامنه اشباع از آب باشد (زمانی که بارندگی با شدت و مدت زیاد رخ می‌دهند) ضریب ایمنی دامنه در مقابل گسیختگی‌های از نوع شیب نامحدود و دایره‌ای کمتر از ۱ خواهد بود و در نتیجه وقوع زمین لغزش در این دامنه‌ها بسیار محتمل خواهد بود.

اعتبارسنجی مدل به روش نسبت تراکمی نشان داد که دقت مدل مارکوس ۸۹/۱ است که بیانگر دقت خیلی خوب روش مذکور است که وقوع ۲۸۳ زمین لغزش در پهنه‌های با خطر متوسط به بالا نشان از همخوانی نسبتاً خوب نتایج این مطالعه با تجربیات حاصل از مشاهدات میدانی و مطالعات ژئوتکنیک انجام‌گرفته در منطقه است. نتایج این مطالعه نشان داد که منطقه سوادکوه مازندران همواره در معرض خطر زمین لغزش است و برنامه‌های مدیریتی برای کاهش خطر زمین لغزش

## فهرست منابع

2. TOPSIS
3. Stević
4. ARAS
5. google earth

- اسلامی، محمود؛ شادفر، صمد؛ محمدی ترکاشوند، علی؛ پذیرا، ابراهیم. (۱۳۹۷). ارزیابی عوامل مؤثر در پدیده زمین لغزش با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودبار الموت، نهمین همایش سراسری محیط زیست انرژی و منابع طبیعی پایدار، تهران

- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی. (۱۴۰۲). دفتر امور فنی و تهیه طرح ها، گزارش عملکرد بنیاد تا پایان سال ۱۴۰۱، منتشر نشده

- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی- پژوهشکده سوانح طبیعی. (۱۳۹۸). گزارش مطالعات پایدارسازی روستاهای ازرایی، ارکا، سی پی، استخراج، کمر پشت و ممشی در برابر خطر زمین لغزش (شهرستان های سوادکوه، سوادکوه شمالی و بابل، استان مازندران)، منتشر نشده.

- پژوهشکده سوانح طبیعی. (۱۳۸۸). انجام پهنه بندی خطر زمین لغزش در دو مقیاس منطقه ای و متوسط در دو منطقه الگو (گزارش نهایی).

- حائری، سید محسن؛ ستاری، محمدحسین، ذوالفقاری، محمدرضا. (۱۳۷۲). ناپایداری های زمین بر اثر زلزله ۳۱ خردادماه ۱۳۶۹ منجیل، هشتمین سمینار بین المللی پیش بینی برای زلزله، تهران. ۱۳۸۶

- کرم، عبدالامیر. (۱۳۸۳). کاربرد مدل ترکیب خطی وزین (WLC) در پهنه بندی پتانسیل وقوع زمین لغزش مطالعه موردی: منطقه سرخون در استان چهار محال و بختیاری . جغرافیا و توسعه، ۲ (پیاپی ۴)، ۱۳۱-۱۴۶.

- سازمان جنگل ها و مراتع و آبخیزداری کشور. (۱۴۰۲). گروه زمین لغزش، آمار و اطلاعات زمین لغزش های استان مازندران

- سیلاخوری، زهرا؛ وهاب زاده، قربان؛ پور قاسمی، حمیدرضا. (۱۴۰۲). تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل بیزین در حوضه آبخیز تالار مازندران، فصلنامه پژوهش های فرسایش محیطی، شماره ۵۰، ۱۴۰-۱۲۲

- صیادی، محمد جمیل؛ هنردوست، فرهاد. (۱۳۹۱). ارزیابی روش پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش حائری- سمیعی در حوضه آبخیز خلین دره استان گلستان

- کرم، امیر؛ تورانی، مریم. (۱۳۹۱). پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع لغزش با استفاده از روش های رگرسیون خطی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی مطالعه موردی: محور هراز از رودهن تا رینه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۲۸، بهار ۹۲

- گورابی، ابوالقاسم. (۱۳۹۶). کمی سازی زمین لغزش بزرگ مله کبود ناشی زمین لرزه سال ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از ایتترفرومتری، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، دوره ۲۱، ۶۳-۴۷.

- مددی، عقیل؛ پیروزی، الناز. (۱۴۰۲). پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه بالادست سد یامچی استان اردبیل، با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره MARCOS و CODAS. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی

- یمانی، مجتبی؛ مقامی مقیم، غلامرضا؛ عرب عامری، علیرضا؛ شیرانی، کوروش. (۱۳۹۶). ارائه مدل ترکیبی نوین به منظور افزایش دقت تهیه نقشه های حساسیت زمین لغزش با تأکید بر مدل GWR (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا، استان اصفهان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، ۴، ۱۹-۴۰.

- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. Eng Geol 64:65-87

- Morgenstern, N.R. (1997). Toward landslide risk assessment in practice. In: Cruden D, Fell R. Editors. Landslide risk assessment. AA Balkema, Rotterdam, pp 15- 23.

- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2019). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution .MARCOS.. Computers & Industrial Engineering, 140, 106231.

DOI: 10.22034/42.183.107