

پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های سرعین ناشی از زلزله ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ با استفاده از روش کیفی

سید محمود فاطمی عقدا*؛ دانشگاه خوارزمی،

محمدرضا مهدوی‌فر؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

وحید باقری؛ دانشگاه خوارزمی

پذیرش ۹۲/۲/۱۷

تاریخ: دریافت ۹۰/۹/۵

چکیده

در این مقاله یکی از روش‌های جدید پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (برنامه کامل) (مدل ناحیه‌ای جامع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله)^۱ برای پیش‌بینی این نوع از زمین‌لغزش‌ها بررسی شده است. بدین منظور محدوده تحت تأثیر زلزله سرعین (سال ۱۳۷۵) برای منطقه الگو انتخاب شده است. برنامه کامل با استفاده از سیستم‌های منطق فازی طراحی و اجرا شده است. سیستم‌های منطق فازی زیر مجموعه‌ای از روش محاسبه با واژه‌ها^۲ هستند. محاسبه با واژه‌ها روشی برای پیشرفت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در مقیاس منطقه‌ای فراهم کرده است، که در واقع روشی حد فاصل برای تبدیل و استفاده از زبان گفتاری انسان به‌جای اعداد در محاسبات و استدلال است. ابتدا اطلاعات لازم شامل فاصله از رودخانه و جاده، رده مقاومتی زمین، رطوبت، شدت زلزله، زاویه شیب، ارتفاع دامنه، عمق سطح لغزش خاکی، انحنای دامنه و پوشش گیاهی با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای لندست^۳، سنسچ از دور (RS)، نقشه‌های موجود و بازدیدهای محلی از منطقه بررسی شده جمع‌آوری شده است. این داده‌ها با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی رقمی و وزن‌دهی شده‌اند و سپس با استفاده از برنامه کامل، میزان تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله محاسبه شده است. کامل چارچوب جامعی را برای مدل‌سازی همه انواع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی فراهم کرده است. در نهایت مقایسه زمین‌لغزش‌های پیش‌بینی شده با استفاده از روش مذکور و زمین لغزش‌های رخ داده ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین انجام گرفته است.

واژه‌ها کلیدی: زلزله، زمین‌لغزش ناشی از زلزله، منطق فازی، پهنه‌بندی خطر منطقه‌ای، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS).

* نویسنده مسئول fatemi@khu.ac.ir

۱. CAMEL
۲. Comprehensive Areal Model of Earthquake-Induced Landslides
۳. Computing with words
۴. Landsat

مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت و توسعه مناطق مسکونی در مناطق پرخطر، موجب افزایش خسارات ناشی از بلایای طبیعی در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه شده است. بیش‌تر این خسارات و گاهی بخش چشم‌گیری از تلفات ناشی از این بلایا در حین و یا بعد از زلزله‌ها و باران‌های سنگین و در نتیجه وقوع زمین‌لغزش‌ها اتفاق می‌افتد. زمین‌لغزش در حقیقت حرکت رو به پایین توده‌ای از خاک یا سنگ در اثر نیروی ثقل در دامنه‌ها است و یکی از مهم‌ترین خطرات زمین‌شناختی محسوب می‌شود. از مهم‌ترین عوامل تحریک زمین‌لغزش‌ها زلزله است، این دسته از زمین‌لغزش‌ها، در قرن اخیر در سراسر دنیا ده‌ها هزار کشته و میلیاردها دلار خسارت در پی داشته‌اند. در بسیاری از زلزله‌های رخ داده در مناطق کوهستانی خسارات حاصل از زمین‌لغزش‌ها برابر و یا حتی بیش از خسارات مستقیم ناشی از زلزله بوده است [۱]. زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله علاوه بر تخریب سازه‌ها، می‌توانند جاده‌ها را مسدود و به شریان‌های حیاتی مانند خطوط انتقال آب، برق، نفت و گاز آسیب جدی برسانند. انسداد جاده به‌وسیله زمین‌لغزش در زمان زلزله می‌تواند موجب قطع عملیات امداد رسانی به زلزله زدگان گردیده و میزان خسارات را بالا ببرد.

کیفر (۱۹۸۴) [۲] زمین‌لغزش‌ها را در ۳ دسته گروه‌بندی کرده است:

I. ریزش‌ها و لغزش‌های گسسته

II. زمین‌لغزش‌های پیوسته

III. جریان‌های خاکی سریع و گسترش‌های جانبی

زمین‌لغزش‌های دسته I و II در خاک و سنگ، و زمین‌لغزش‌های دسته III فقط در خاک رخ می‌دهند.

در رابطه با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله کیفر (۱۹۸۴) [۲] کامل‌ترین تحلیل و بررسی انواع زمین‌لغزش را انجام داده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده این است که روی هم رفته زمین‌لغزش‌های دارای حرکت سریع مانند جریان‌های خاکی سریع، بهمن‌های سنگی و ریزش‌های سنگی در طول تاریخ منجر به بیش‌ترین مرگ و میر شده‌اند، در حالی که بیش‌ترین

خسارات اقتصادی در ارتباط با گسترش‌های جانبی خاک، چرخش‌های خاکی (مخصوصاً در خاکریزهای مصنوعی) و لغزش‌های بلوکی خاکی هستند.

در ارتباط با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در خارج از کشور پژوهش‌های متعددی انجام شده است ولی در داخل کشور تحقیقات محدودی صورت گرفته است، که از جمله مهم‌ترین بررسی‌های انجام شده در خارج از کشور می‌توان به پژوهش‌های کیفر^۱ (۱۹۸۴) [۲]، کیفر (۲۰۰۰) [۳]، جیبسون^۲ (۱۹۹۳) [۴]، جیبسون و دیگران (۱۹۹۸) [۵]، جیبسون (۲۰۰۷) [۶]، دل‌گادیو و واسوسکی^۳ (۲۰۰۳) [۷]، پاردهان و لی^۴ (۲۰۰۹) [۸] و در داخل کشور می‌توان به بررسی‌های مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] و رجیبی (۱۳۸۹) [۹] اشاره کرد.

مایلز و کیفر (۲۰۰۷)^a، (۲۰۰۹)^b [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و مایلز (۲۰۱۰) [۱۳] از جمله مهم‌ترین تحقیقات را در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (کامل) انجام داده‌اند در این پژوهش‌ها، نه تنها نقشه حساسیت زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله بلکه نقشه تراکم خطر آن‌ها نیز تهیه شده است.

کشور ایران نیز با توجه به قرار گرفتن روی کمربند لرزه‌ای و بروز زلزله‌های متعدد و هم‌چنین نوع مورفولوژی زمین، زمین‌شناسی و توپوگرافی، در معرض زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله و خسارات ناشی از آن قرار دارد، از همین رو تلاش برای شناخت این پدیده و راه‌های پیش‌بینی، پیش‌گیری، و مقابله با آن اهمیت زیادی دارد.

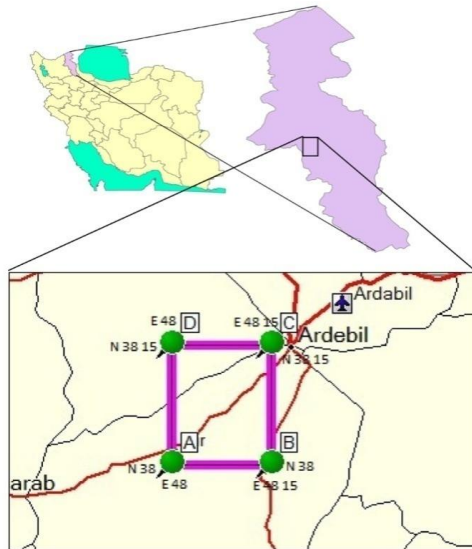
در این مقاله سعی بر آن است تا با شناخت بیشتر یکی از روش‌های پیش‌بینی این پدیده که به روش‌های کیفی موسوم است (کامل) [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] در جهت به‌کارگیری، بهبود و گسترش این روش برای به‌خدمت گرفتن آن در ایران گامی هرچند کوچک برداشته شود. بدین‌منظور محدوده تحت تأثیر زلزله سرعین (سال ۱۳۷۵) برای منطقه الگو انتخاب شده است. در این تحقیق از نرم‌افزار ArcGIS (سامانه اطلاعات جغرافیایی) و PCI Geomatica (نرم‌افزار مخصوص پردازش تصاویر ماهواره‌ای) استفاده شده است.

۱. Keefer ۲. Jibson ۳. Del Gaudio & Wasowski ۴. Pradhan & Lee

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی منطقه بررسی شده

موقعیت جغرافیایی محدوده متأثر از زلزله ۱۳۷۵ سرعین

روستاهایی که در جنوب باختری شهرستان اردبیل (روستاهای گلستان، جوراپ، تجرق، شیران، علی داشین، بیله درق، آتش‌گاه، ارجستان، بنمار، سنین، کنزق، ایردی موسی، کلخوران ویند، ورنیاب، شایق، اوجور، اسمرز، کرده) قرار دارند، از مناطقی هستند که در اثر زمین‌لرزه ویران‌گر ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ سرعین [۱۳] آسیب دیدند. منطقه بررسی شده، محدوده متأثر از زلزله ۱۳۷۵ سرعین است که بین طول جغرافیایی $48^{\circ} 00'$ تا $48^{\circ} 15'$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ} 00'$ تا $38^{\circ} 15'$ قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده متأثر از زلزله ۱۳۷۵ سرعین

مشخصات زلزله رویداده در محدوده بررسی شده

در ۱۰ اسفند سال ۱۳۷۵ [۱۴] زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w=6.1$ و عمق‌کانونی ۹ کیلومتر در استان اردبیل در شمال غرب ایران روی داد و ۹۶۵ کشته و بیش از ۲۰۰۰ نفر مجروح برجای گذاشت. بررسی‌های انجام شده در محدوده کلان لرزه‌ای دلالت بر آن دارند که گستره بیش‌ترین شدت زمین‌لرزه در جنوب شرق کوه آتشفشان سبلان قرار داشته و بیش‌ترین آسیب‌ها به ۳ روستای جوراپ، گلستان و شیران وارد شده است. رومرکز زمین‌لرزه بر پایه داده‌های

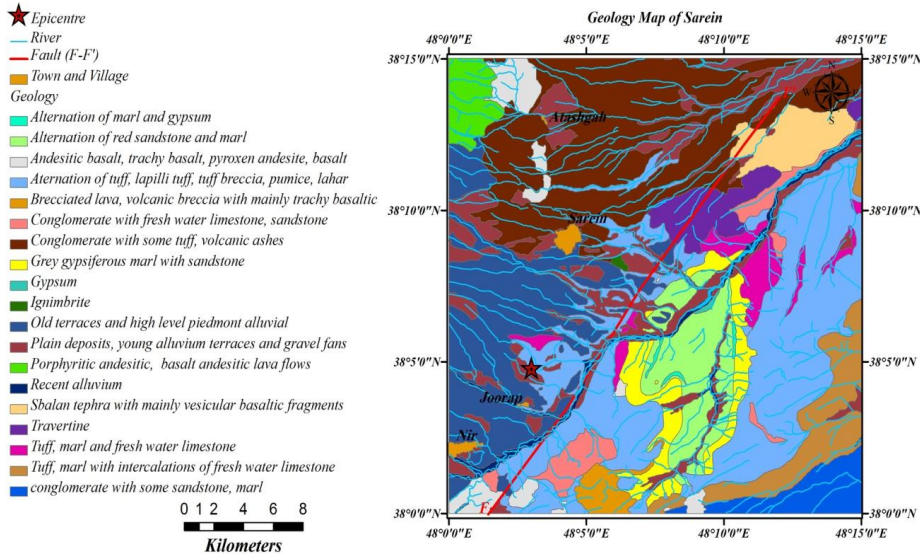
ایست‌گاه‌های لرزه‌نگاری در نقطه‌ای به عرض شمالی $38/07$ و طول خاوری $48/06$ در نزدیکی روستای جوراپ است که با داده‌های کلان لرزه‌ای کاملاً سازگار است. شدت زمین‌لرزه در روستای جوراپ و گلستان VIII (در مقیاس MMI)، در اسلام‌آباد VII⁺ و در شهر سریعین VI⁺ برآورد شده است [۱۴].

وضعیت زمین ساخت منطقه مورد مطالعه

منطقه آذربایجان از دیدگاه تکتونیکی جزء مناطق فعال محسوب می‌شود. منطقه زلزله‌زده سریعین با گسل‌های فعالی چون بزقوش با روند شرقی- غربی (جنوب اردبیل) و گسل نور با روند شمال شرقی- جنوب غربی (شرق اردبیل) احاطه شده است [۱۵]. در ضمن تنها گسل موجود در محدوده بررسی شده گسل فرعی بالیخلو چای است که در امتداد رودخانه جاری در داخل دره بالیخلو چای قرار دارد. منطقه زلزله‌زده بررسی شده از دیدگاه ساختاری در جایی قرار گرفته که روند ساختارها از شرقی- غربی به طرف شمال تغییر می‌کنند. شکستگی‌های حاصل از زلزله در سطح زمین براساس تحقیقات و مشاهدات انجام شده روند شمال شرقی دارند که منجر به رخداد پدیده زمین‌لغزش در امتداد گسل‌ها شده‌اند [۱۶].

زمین‌شناسی منطقه

ناحیه بررسی شده در دامنه‌های جنوب شرقی رشته کوه سبلان قرار دارد. کوه سبلان توده صلب و حجیمی را تشکیل می‌دهد که سنگ‌های آذرین دوره نئوژن را شامل می‌شود. در کوهپایه سنگ‌هایی با مقاومت کم قرار دارند که عمدتاً سنگ‌های حاصل از فعالیت آتشفشانی هستند، مانند توف، آهک و قلوه سنگ‌های آذرین (لاهار). روند چین‌ها در قسمت شمال، جنوب و شرق کوه سبلان از شکل این توده صلب تبعیت می‌کنند [۱۵]. نقشه زمین‌شناسی محدوده بررسی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده متأثر از زلزله ۱۳۷۵ سرعین [۱۵]

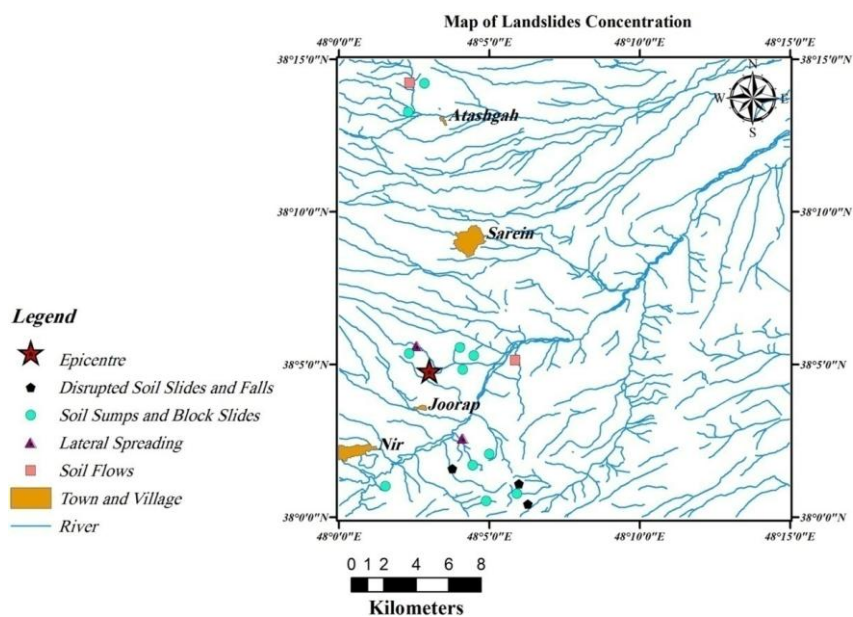
زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در محدوده بررسی شده

مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد شیب دامنه، ضخامت و نوع رسوبات آن تأثیر چشم‌گیری بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه داشته است. شیب کلی منطقه بین ۲ تا ۲۵ درجه متغیر است و اکثر نقاط صرف‌نظر از ناهمواری‌های موضعی، شیب کم‌تر از ۵ درجه دارند. بدین سبب پدیده زمین‌لغزش و ریزش‌سنگی در اثر زلزله گسترش چندانی نداشته است (شکل ۳). حرکات توده‌ای زمین به دلیل تغییرات موضعی شیب و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در روستای شیران به صورت جریان گلی (Mud flow) و با طول نزدیک ۱۳۰ متر به وقوع پیوسته است [۱۴].

هم‌چنین در ۱/۵ کیلومتری شمال روستای آتش‌گاه (شکل ۴) و یک کیلومتری خاور روستای جوراپ، لغزش‌های بلوکی-خاکی^۱ به ترتیب به وسعت ۳۰۰۰ و ۲۵۰۰ مترمربع رخ داده است. در روستای جوراپ در اثر زلزله، لغزش‌های سطحی رخ داده است، به طوری که مشاهدات صحرایی نشان‌دهنده این است که محدوده شرق این روستا بسیار مستعد زمین‌لغزش است. در بخش جنوبی روستای ورنیاب، و در دیواره جنوبی دره، لغزشی به وسعت ۳۰۰۰ متر مربع رخ داده است. در روستای ایردی موسی مسیر رودخانه در اثر رانش زمین موقتاً مسدود

۱. Soil block slide

شده بود که پس از فرسایش مواد رانش یافته، رودخانه به مسیر اولیه خود بازگشته است، ولی تا حدودی تغییر مسیر داده است (شکل ۵) [۱۴].



شکل ۳. نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین در محدودهٔ بررسی شده



شکل ۴. لغزش بلوکی - خاکی، شمال روستای آتش‌گاه (دید عکس به سمت شمال) [۱۷]



شکل ۵. تغییر مسیر رودخانه در اثر زلزله ۱۳۷۵ سرعین، روستای ایردی موسی (دید عکس به سمت شمال) [۱۷]

روش کار

برنامه کامل با استفاده از سیستم منطق فازی طراحی و اجرا شده است. سیستم منطق فازی زیرمجموعه‌ای از روش محاسبه با واژه‌ها^۱ هستند [۱۸]. محاسبه با واژه‌ها به‌حجم وسیعی از روش‌ها و چارچوب‌ها برای بیان زبان انسانی و طبیعی به‌صورت عددی به‌منظور تعیین عدم قطعیت و گسترش آن با استفاده از تعدادی محاسبات ریاضیات منطقی اشاره می‌کند [۱۹]. پایه و اساس روش محاسبه با واژه‌ها براساس مفهوم مجموعه‌های فازی است [۲۰]. سیستم‌های فازی مجموعه‌ای از بلوک‌های اگر-آن‌گاه^۲ وابسته به یکدیگر هستند، که متغیرهای ورودی را به متغیرهای خروجی مشخص مرتبط می‌کنند. محاسبه با واژه‌ها [۱۹] روشی برای پیشرفت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کند، که در واقع روشی حد فاصل برای تبدیل و استفاده از زبان گفتاری انسان به‌جای اعداد در محاسبات و استدلال است.

برنامه کامل چارچوب جامعی را برای مدل‌سازی همه انواع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از سیستم منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی فراهم کرده است. مدل تراکم خطر مرتبط با مجموع ۶ نوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله را که در جدول ۱ ارائه شده است، مدل‌سازی کرده است.

۱. Computing with words

۲. IF-THEN

جدول ۱. طبقه‌بندی انواع تجمیع شده زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، استفاده شده با مدل کامل، بر اساس کیفی (۱۹۸۴) [۲]

| مجموعه | زمین لغزش |
|--------|--|
| I | ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته بهم‌های سنگی لغزش‌های خاکی گسسته، ریزش‌ها و بهم‌ها |
| II | لغزش‌های بلوکی و چرخشی سنگی لغزش‌های بلوکی و چرخشی خاکی |
| III | جریان‌های خاکی سریع |

مدل پیشنهادی مایلز و کیفی (کامل) [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] از دو بخش اصلی تشکیل شده است: الف) بخش امکان رخداد (پتانسیل) و ب) بخش ارزیابی خطر، که هر کدام از این دو بخش از چندین بلوک قانون فازی اگر-آن‌گاه تشکیل شده‌اند. بخش اول امکان وقوع هر یک از انواع زمین‌لغزش‌ها را تعیین می‌کند؛ در نتیجه خروجی این بخش فقط دو حالت وجود امکان یا عدم امکان رخداد است. برای هر واحد که امکان وقوع وجود نداشته باشد، آنالیز متوقف شده و داده‌های مربوط برای محاسبه میزان تراکم خطر به بخش بعد منتقل نمی‌شود. در بخش ارزیابی خطر، برای واحدهایی که امکان وقوع زمین‌لغزش وجود دارد، تراکم ممکن هر یک از انواع زمین‌لغزش‌ها در هر کیلومترمربع پیش‌بینی می‌شود. تمامی مراحل این مدل چه در بخش امکان رخداد و چه در بخش ارزیابی خطر به وسیله مجموعه‌های فازی انجام می‌شود. در بخش امکان هفت لایه اطلاعاتی شامل ناهمواری دامنه، شدت زلزله، عمق سطح لغزش خاکی، ارتفاع دامنه، نوع مصالح، رطوبت، و زاویه شیب به‌عنوان لایه‌های ورودی به‌کار می‌روند (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار جریانی داده‌ها برای بخش امکان رخداد CAMEL، شامل اطلاعات شاخص [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

در مرحله ارزیابی خطر نیز ۷ لایه وارد می‌شود. لایه اول لایه امکان وقوع است که طبیعتاً دو کد دارد. برای واحدهایی که کد عدم امکان داشته باشند باقی مراحل ارزیابی خطر انجام نمی‌پذیرد و مستقیماً خطر آن‌ها "خیلی کم" فرض می‌شود. شش لایه دیگر که در ارزیابی خطر به کار می‌روند عبارتند از (۱) رده مقاومتی زمین (رده زمین)، (۲) زاویه شیب، (۳) رطوبت، (۴) فاصله از رودخانه و جاده، (۵) پوشش گیاهی، و (۶) شدت زلزله. در این مرحله هر یک از انواع زمین‌لغزش به‌طور جداگانه در دو زیر بخش، حساسیت استاتیکی و خطر لرزه‌ای بررسی می‌شود (شکل ۷). زیر بخش حساسیت استاتیکی، مستقل از تأثیر زلزله در نظر گرفته می‌شود. این زیر بخش خود از دو بخش تشکیل می‌گردد: بخش اول شامل متغیرهایی است که نقش اساسی در حساسیت استاتیکی دارند. دو عامل رده مقاومتی زمین (رده زمین) و زاویه شیب همواره در این بخش قرار می‌گیرند. برای برخی از انواع زمین‌لغزش (لغزش‌های چرخشی سنگی، لغزش‌های بلوکی سنگی، لغزش‌های چرخشی خاکی، لغزش‌های بلوکی خاکی) رطوبت نیز در این بخش قرار می‌گیرد. اگر امکان وقوع نوعی از زمین لغزش (به‌عنوان مثال بهمن سنگی) طبق لایه امکان وجود داشته باشد دو لایه (رده مقاومتی زمین و مقدار شیب) یا هر سه لایه مذکور بر حسب نوع زمین لغزش برای محاسبه حساسیت استاتیکی ارزیابی می‌شوند. در این مرحله به هر واحد بر اساس قوانین تعریف شده، یکی از پنج حساسیت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد) نسبت داده می‌شود. در مرحله بعد، یک تا سه متغیر دیگر که نقش کم‌تری دارند، برای اصلاح حساسیت، وارد تحلیل می‌گردند. این متغیرها از این لحاظ متغیرهای اصلاح کننده نامیده شده‌اند که نقشی افزایش‌دهنده یا کاهش‌دهنده داشته و در صورت برقراری شرط لازم، حساسیت استاتیکی را یک درجه زیاد یا کم می‌کنند (مثلاً از خطر پایین به متوسط). دو لایه فاصله از رودخانه و جاده (با نقش افزایش‌دهنده) و پوشش گیاهی (با نقش کاهش‌دهنده) همواره در این بخش قرار می‌گیرند. برای برخی از انواع زمین‌لغزش‌ها (ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته، ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته و بهمن‌های خاکی و جریان‌های سریع خاکی) لایه رطوبت (با نقش افزایش‌دهنده) در این مرحله وارد می‌شود. زیربخش خطر لرزه‌ای، اثر تکان‌های زلزله را روی حساسیت استاتیکی محاسبه

شده به وسیله زیربخش قبلی در نظر می‌گیرد. به طور چشم‌گیری، محدوده ممکن مقادیر تراکم که به وسیله بخش ارزیابی خطر محاسبه شده است و به ترتیب با مقادیر توصیفی "خیلی کم" تا "خیلی زیاد" مشخص شده است، برای هر نوع زمین لغزش متفاوت است. در این زیربخش تمامی ترکیبات ممکن از مقادیر حساسیت استاتیکی و شدت زلزله در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸). چنان‌که در شکل ۸ نشان داده شده است نقش زلزله به صورت افزایشی است. این خروجی (که خروجی کل مدل نیز محسوب می‌شود)، برآوردی از تراکم زمین لغزش در هر کیلومترمربع است (شکل ۷). مطابق شکل ۷، نکته مهم آن است که، محدوده ممکن مقادیر تراکم (و در نتیجه معادل کمی خطر) برای هر نوع زمین لغزش متفاوت است.



شکل ۷. نمودار جریانی داده‌ها بر ای بخش خطر CAMEL، معرف ورودی‌ها (اطلاعات تشدید کننده)، خروجی‌ها، و ترتیب قواعد [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

| RFail/Static | h شدت زلزله | | | | | | |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|------------|
| | خیلی کم | کم | متوسط | زیاد | خیلی زیاد | شدید | بسیار شدید |
| خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم |
| کم | خیلی کم | کم | خیلی کم | کم | خیلی کم | کم | کم |
| متوسط | خیلی کم | کم | خیلی کم | متوسط | کم | متوسط | متوسط |
| زیاد | خیلی کم | کم | کم | متوسط | زیاد | زیاد | زیاد |
| خیلی زیاد | کم | کم | متوسط | متوسط | زیاد | خیلی زیاد | خیلی زیاد |

شکل ۸. بلوک قوانین خطر لرزه‌ای برای ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

مقادیر کمی معرف اصطلاحات توصیفی به کار رفته در نمودار جریان‌ی بخش ارزیابی خطر کامل (شکل ۷) برای متغیر شدت زلزله و زاویه شیب به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند [۱۰].

جدول ۲. معادل کمی اصطلاحات توصیفی به کار رفته در نمودار بخش خطر کامل برای متغیر شدت زلزله [۱۰]

| اصطلاحات توصیفی متغیر شدت زلزله | معادل کمی (MMI) |
|---------------------------------|-----------------|
| Light | < IV |
| Moderate | IV - V |
| Strong | V - VI |
| Very Strong | VI - VII |
| Severe | VII - VIII |
| Violent | VIII - IX |
| Extreme | IX - X |

جدول ۳. معادل کمی اصطلاحات توصیفی به کار رفته در نمودار بخش خطر کامل برای متغیر زاویه شیب [۱۰]

| اصطلاحات توصیفی متغیر زاویه شیب | معادل کمی (Degree) |
|---------------------------------|---------------------------|
| Very Gradual | $5^{\circ} >$ |
| Gradual | $5^{\circ} - 15^{\circ}$ |
| Medium Gradual | $15^{\circ} - 20^{\circ}$ |
| Medium | $20^{\circ} - 25^{\circ}$ |
| Medium Steep | $25^{\circ} - 35^{\circ}$ |
| Steep | $35^{\circ} - 40^{\circ}$ |
| Very Steep | $40^{\circ} - 50^{\circ}$ |
| Extremely Steep | $50^{\circ} - 60^{\circ}$ |
| Near Vertical | $60^{\circ} - 65^{\circ}$ |

لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در منطقه بررسی شده

برای به‌کارگیری این روش لایه‌های اطلاعاتی لازم عبارتند از:

۱. **انحنای دامنه**^۱: اطلاعات کمی در مورد انحنای دامنه و خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله نسبتاً نادر است. پژوهش‌های لیاؤ^۲ و همکاران (۲۰۰۲) [۲۱] نشان داده است، متغیری که آن‌ها به‌عنوان "انحنای دامنه" معرفی کرده‌اند، ارتباط بسیار مؤثری با وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله چی‌چی تایوان در سال ۱۹۹۹ داشته است. این لایه اطلاعاتی برای منطقه بررسی شده در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) با استفاده از دستور "انحنای" از روی مدل رقومی ارتفاعی^۴ (DEM) تهیه شده است (شکل ۹a).

۲. **شدت زلزله**: شدت زلزله حداقل شدت مورد نیاز برای وقوع هر نوع از زمین‌لغزش است. براساس مایلز و کیفر (۲۰۰۷) [۱۰] متغیر شدت زلزله از سه مقدار فازی ساخته شده است: "بزرگ‌تر از VII"، "بزرگ‌تر از VIII"، و "بزرگ‌تر از IX". کم‌ترین مقدار (بزرگ‌تر از VII) معرف حد آستانه‌ای لازم برای رخداد دسته اول زمین‌لغزش‌ها، به جز بهمن‌های سنگی است. مقدار متوسط (بزرگ‌تر از VIII) معرف حد آستانه‌ای لازم برای رخداد دسته دوم (لغزش‌های چسبیده) و دسته سوم زمین‌لغزش‌ها (جریان‌های سریع خاکی) است. بیش‌ترین مقدار (بزرگ‌تر از IX) معرف حد آستانه‌ای لازم برای رخداد بهمن‌های سنگی است. که این مقادیر در نمودار جریانی بخش امکان کامل (شکل ۶) با اصطلاحات توصیفی (بزرگ‌تر از VII)^۵، (بزرگ‌تر از VIII)^۶، (بزرگ‌تر از IX)^۷ ارائه شده‌اند. برای تهیه لایه اطلاعاتی شدت زلزله ابتدا با استفاده از مختصات رومرکز، بزرگای گشتاوری (M_w) و عمق کانونی زلزله و رابطه (۱) [۲۲] نقشه هم‌شدت آریاس^۸ [۲۳] محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۲) [۲۴] نقشه شدت زلزله بر اساس مقیاس شدت مرکالی اصلاح شده (MMI) محاسبه شده است (شکل ۹b).

$$\log I_a = -3/880 + 0/810 M - \log R - 0/002 R \quad (1)$$

| | | | |
|------------------|---------------|--------------|----------------------------|
| ۱. Terrain rough | ۲. Liao et al | ۳. Curvature | ۴. Digital Elevation Model |
| ۵. Very strong | ۶. Severe | ۷. Violent | ۸. Arias Intensity |

که در این رابطه I_a شدت آریاس برحسب $M \text{ am/s}^2$ بزرگای گشتاوری، R فاصله کانونی برحسب کیلومتر که از رابطه $R = \sqrt{r^2 + h^2}$ (فاصله بین هریک از واحدهای منطقه از رومرکز برحسب کیلومتر و h عمق زلزله برحسب کیلومتر است). حاصل می‌شود.

$$\text{Log}(I_a) = 0.527 I_{MMI} - 3.816 \quad (2)$$

که در این رابطه I_a شدت آریاس برحسب m/s^2 و I_{MMI} شدت مرکالی اصلاح شده است.

۳. **عمق سطح لغزش خاکی:** عمق سطح لغزش خاکی بر پایه اطلاعات برگرفته از کیفر (۱۹۸۴) [۲] و بومر و رودریگوئز^۱ (۲۰۰۲) [۲۵] تعریف شده است. برای لایه اطلاعاتی عمق سطح لغزش خاکی، یک لایه اطلاعاتی یک‌نواخت با مقدار ثابت ۳٫۳۳ متر تهیه شده است، زیرا این مقدار، متداول‌ترین عمق گسیختگی برای زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است [۱۲]. در مقیاس منطقه‌ای، یک‌نواخت فرض کردن عمق سطح لغزش خاکی برای مدل‌سازی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله امری متداول و رایج است [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹].

۴. **ارتفاع دامنه:** ارتفاع دامنه عبارت است از "اختلاف ارتفاع بین خط‌الرأس و خط‌القعر هر یک از دامنه‌های موجود در محدوده بررسی شده". ارتفاع دامنه در نتیجه فرسایش یا عملیات حفاری می‌تواند تغییر کند. تغییر ارتفاع دامنه همانند زاویه شیب دامنه، نقش مؤثری را در مسئله پایداری توده می‌تواند داشته باشد. در دو دامنه مشابه و با زاویه شیب ثابت، دامنه‌ای که مرتفع‌تر است پتانسیل ناپایداری بیشتری دارد. ارتفاع دامنه به‌عنوان شاخصی برای رخداد بهمن‌های سنگی در نظر گرفته شده است [۱۰]. کیفر (۱۹۸۴) [۲] تصریح کرده است که برای بروز بهمن سنگی ارتفاع دامنه باید بزرگ‌تر یا مساوی ۱۵۰ متر باشد. چون بهمن سنگی تنها نوع زمین‌لغزشی است که به این لایه اطلاعاتی وابسته است. لایه ارتفاع دامنه همان مدل رقومی ارتفاعی (DEM) است که از روی نقشه توپوگرافی منطقه در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ به دست آمده است (شکل ۹C).

۵. **نوع مصالح:** این لایه معرف سنگ یا خاک بودن سازندهای زمین‌شناختی است. برای تهیه این لایه از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ رقومی شده اردبیل [۱۵] استفاده شده

۱. Bommer & Rodriguez ۲. Slope Height

است. بدین صورت که بعد از رقوم‌سازی نقشه زمین‌شناسی منطقه، اقدام به تفکیک مصالح خاک و سنگ از یک‌دیگر شده است (شکل ۱۰a). هم‌چنین لازم به توضیح است که، اکثر قسمت‌های سنگی موجود در منطقه بررسی شده با رسوبات نئوژن و کواترنر پوشانده شده و رخنمون‌های سنگی به‌ندرت در منطقه پژوهش مشاهده شده است، ولی چون هدف از نقشه معرف نوع مصالح، نشان دادن ترکیب لیتولوژی غالب هر یک از سازندهای زمین‌شناختی است و با توجه به این مطلب که مصالح درگیر زمین‌لغزش‌ها مخصوصاً زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، عمدتاً شامل مصالح غالب هر یک از سازندها هستند، بنا بر این مناطق سنگی پوشانیده شده با رسوبات نئوژن و کواترنر در نقشه معرف نوع مصالح، به‌عنوان مناطق سنگی نشان داده شده‌اند.

۶. **رطوبت:** رطوبت نشان‌دهنده اطلاعات موجود در مورد انواع مختلف زمین‌لغزش‌ها با توجه به محتوای رطوبتی خاک یا عمق سطح ایستابی است. این متغیر نشان می‌دهد که لایه مورد تجزیه و تحلیل نسبت به عمق لایه تا چه درصدی اشباع شده است. با توجه به این‌که زلزله ۱۳۷۵ سرعین در اسفند ماه رخ داده است و از طرفی رطوبت خاک تابع دوره‌های بارندگی است، برای مدل‌سازی وضعیت رطوبت خاک در زمان رخداد زلزله، اطلاعات استفاده شده در این تحقیق مربوط به اسفند ماه است. لایه داده مکانی معرف میزان رطوبت در منطقه برحسب درصد، با استفاده از شاخص تفاضل نرمال شده رطوبت^۱ تهیه شده است. این شاخص [۳۰] برای محدوده بررسی شده با استفاده از باند ۴ (باند مادون قرمز نزدیک (NIR)) و باند ۵ (باند مادون قرمز میانی^۳ (SWIR)) و رابطه ۳ در محیط نرم‌افزار PCI Geomatica تهیه شده است (شکل ۱۰b).

$$NDMI = \frac{NIR(\lambda) - SWIR(\lambda)}{NIR(\lambda) + SWIR(\lambda)} \quad (3)$$

به‌طوری‌که در رابطه ۳ مشاهده می‌شود، اگر در رابطه ۳، اطلاعات باند ۵ از باند ۴ کم شود، شاخص NDMI معرف میزان رطوبت خاک است، ولی اگر اطلاعات باند ۴ از باند ۵ کم شود، شاخص NDMI معرف میزان رطوبت برگ‌ها و گیاهان است [۳۱].

۱. Normalized Difference Moisture Index

۲. Near-infrared

۳. Short wave length infrared

۷. زاویه شیب: شیب دامنه به‌عنوان عاملی مورفولوژیک به‌دلیل تأثیری که در عمل‌کرد نیروی محرک خصوصاً نیروی جاذبه زمین دارد از عوامل اصلی تعیین‌کننده وضعیت پایداری دامنه‌ها محسوب می‌شود. اطلاعات مربوط به حداقل زاویه شیب لازم برای وقوع هر نوع زمین‌لغزش با متغیر زاویه شیب، بیان می‌شود. مقادیر معرف کم‌ترین حد آستانه‌ای زاویه شیب لازم برای رخداد هر یک از ۶ نوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله براساس هنکاکس^۱ و همکاران (۲۰۰۲) [۳۲]، رودریگوئز و همکاران (۱۹۹۹) [۳۳] و کیفر (۱۹۸۴) [۲] در جدول ۴ ارائه شده‌است. لایه اطلاعاتی معرف زاویه شیب از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در محیط نرم‌افزار ArcGIS به‌دست آمده است (شکل ۱۰c). جدول ۴. اطلاعات در مورد حداقل زاویه شیب مورد نیاز برای رخداد نوع خاصی از زمین‌لغزش [۲]، [۳۲]، [۳۳]

| نوع زمین لغزش | حداقل زاویه شیب (درجه) | | |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| | کیفر (۱۹۸۴) | رودریگوئز و دیگران (۱۹۹۹) | هنکاکس و دیگران (۲۰۰۲) |
| لغزش‌های سنگی و ریزش‌های سنگی گسسته | ۳۵ - ۴۰ | ۳۵ | ۴۰ |
| لغزش‌های خاکی گسسته / ریزش‌های خاکی | ۱۵ / ۴۰ | ۵۵ | ۲۵ - ۳۵ |
| بهم‌ن‌های سنگی | ۲۵ | n/a | ۲۵ - ۳۵ |
| لغزش‌های بلوکی سنگی و چرخش‌های سنگی | ۱۵ | ۱۵ | ۱۵ |
| لغزش‌های بلوکی خاکی و چرخش‌های خاکی | ۵ - ۱۰ | ۸ | ۱۵ |
| جریان‌های خاکی سریع | ۲,۳ | ۰ | ۲ |

n/a= ناموجود

۸. رده مقاومتی زمین (رده زمین): لایه اطلاعاتی رده مقاومتی زمین بر اساس توضیحات و اطلاعات مبتنی بر کیفر (۲۰۰۰) [۴] در مورد ارتباط مشخصات کیفی مواد تشکیل‌دهنده دامنه (سنگ شناسی) با میزان تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله تعریف شده است. رده مقاومتی زمین در ارتباط با رتبه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی با توجه به حساسیت‌شان به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است. برای تهیه این لایه اطلاعاتی ابتدا از نقشه زمین‌شناسی رقومی شده ۱/۱۰۰۰۰۰۰ اردبیل [۱۵] استفاده شده و سپس نقشه مذکور با استفاده از عملیات صحرایی و عکس‌های هوایی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰،

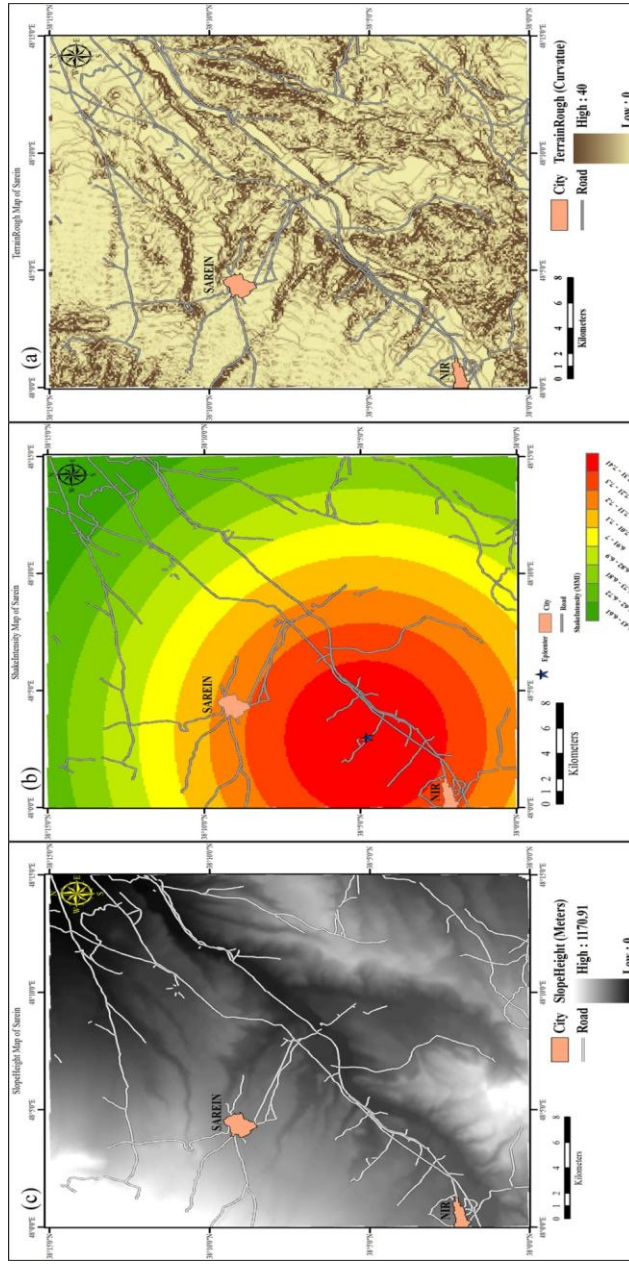
۱. Hancox et al.

تدقیق شده است. برای هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه بررسی شده مقداری را به‌عنوان رده مقاومتی زمین در بازه ۱ تا ۵ (به‌طوری‌که برای کامل مورد نیاز است) با دقت ۰/۵ تعیین شده است. مقادیر رده مقاومتی زمین براساس تراکم‌های زمین‌لغزشی محاسبه شده برای هر واحد سنگ‌شناسی است. لایه اطلاعاتی رده مقاومتی زمین به‌عنوان شاخصی از شرایط زمین و مشخصات مواد، مانند مقاومت برشی و درزه‌های سنگ است که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده شرایط زمین ضعیف‌تر و حساس‌تر نسبت به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله هستند [۱۰] (شکل ۱۱a).

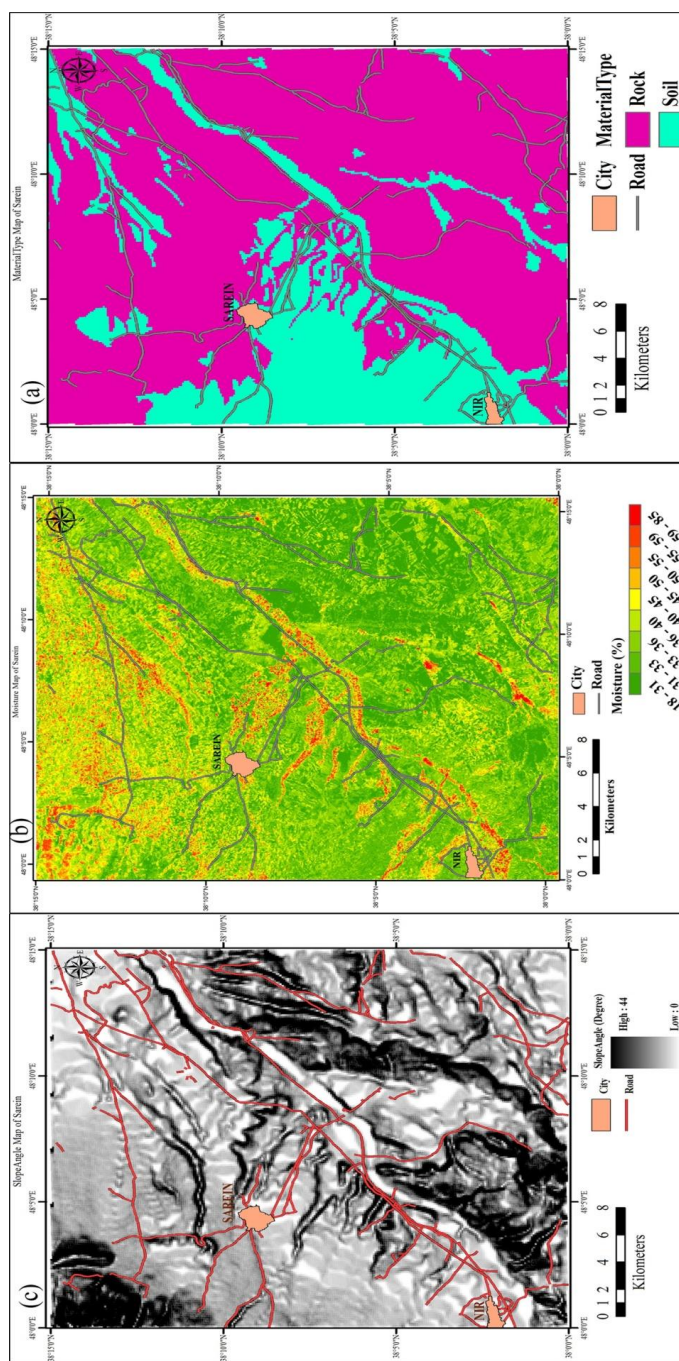
۹. **فاصله از رودخانه و جاده:** از نظر مفهومی، لایه اطلاعاتی فاصله از رودخانه و جاده موجب سهولت ارائه عوامل مورفولوژیکی مؤثر در گسیختگی دامنه (مانند فرسایش پنجه دامنه با جریان آب، یا شیب بیش از حد دامنه ناشی از قطع شدگی به‌وسیله جاده) می‌شود [۳۴]. این لایه به‌طور مشخص، فاصله دامنه از رودخانه و جاده برحسب متر است. در این تحقیق برای مشخص کردن فاصله از رودخانه و جاده، گراف‌های خطی رقومی برگرفته از سازمان نقشه‌برداری در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ که معرف جاده‌ها و رودخانه‌های اصلی در محدوده بررسی شده است، در محیط نرم‌افزار ArcGIS به حالت RASTER تبدیل شده است. عمل‌گر "فاصله خطی"^۱ به‌منظور تعیین فاصله افقی بین هر واحد و نزدیک‌ترین عارضه خطی (رودخانه و جاده) اجرا شده است (شکل ۱۱b).

۱۰. **پوشش گیاهی:** پوشش گیاهی از نظر مکانیکی نقش متفاوتی در پایداری و یا ناپایداری کردن دامنه‌ها ایفا کرده است [۳۵] (جدول ۵). از نظر مفهومی، این لایه اطلاعاتی اشاره به تراکم پوشش گیاهی یک منطقه، که به‌صورت درصدی از کل منطقه بیان می‌شود، دارد [۱۱]. لایه اطلاعاتی معرف میزان پوشش گیاهی در منطقه برحسب درصد، با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی^۲ تهیه شده است. این شاخص برای محدوده بررسی شده با استفاده از باندها ۳ (باند قرمز)^۳ و باند ۴ (باند مادون قرمز نزدیک)^۴ و رابطه ۴ در محیط نرم‌افزار (پی‌سی‌آی ژئوماتیکا)^۵ تهیه شده است [۳۶] (شکل ۱۱c).

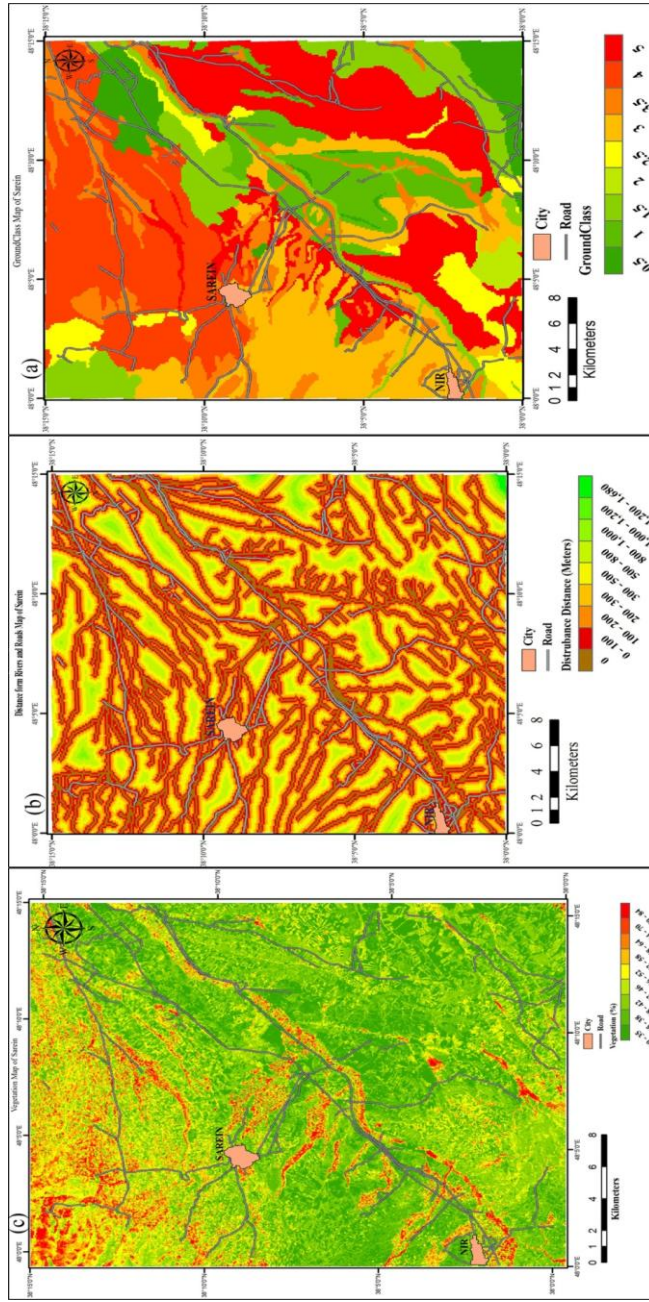
۱. Euclidean distance ۲. Normalized Difference Vegetation Index
۳. Red light (RED) ۴. Near-infrared (NIR) ۵. PCI Geomatica



شکل ۹. نقشه‌های معرف لایه داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقه سرعین برای کاربرد در کمال (a) انحنای دامنه (نقاط تیره‌تر معرف تغییرات شیب تندتر)، (b) شدت زلزله مربوط به زلزله ۱۳۷۵ سرعین با بزرگای ۶.۱ (Mw=6.1) نقاط تیره تر معرف شدت زلزله بیشتر) و (c) ارتفاع دامنه (نقاط تیره تر معرف ارتفاع بیش تر دامنه)



شکل ۱۰. نقشه‌های معرف لایه داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقه سریعین برای کاربرد در مدل (a) نوع مصالح (نقاط تیره معرف مصالح سنگی و نقاط روشن معرف مصالح خاکی)، (b) رطوبت (نقاط تیره تر معرف رطوبت بیش تر) و (c) زاویه شیب (نقاط تیره تر معرف شیب‌های تندتر)



شکل ۱۱. نقشه‌های معرف لایه داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقه سرعین برای کاربرد در کپل (a) دسته‌های رده زمین، معرف مقاومت نسبی، برای واحدهای زمین‌شناسی بر اساس کپلر (۲۰۰۰) (نقاط تیره تر معرف مقاومت نسبی کم‌تر)، (b) فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها (نواحی تیره‌تر نشان‌دهنده نواحی مجاور نزدیک‌تر) (c) پوشش گیاهی (نقاط تیره‌تر تراکم بیشتر پوشش گیاهی)

$$NDVI = \frac{NIR(4) - RED(3)}{NIR(4) + RED(3)} \quad (۴)$$

جدول ۵. اثرات پوشش گیاهی بر پایداری دامنه‌ها [۳۵]

| اثرات منفی پوشش گیاهی در پایداری دامنه‌ها | اثرات سودمند پوشش گیاهی در پایداری دامنه‌ها | مکانیسم تأثیر |
|---|---|---------------|
| بار اضافی دامنه توسط وزن درختان سنگین | مسلح کردن مکانیکی توده خاک و سنگ با ریشه‌ها | مکانیکی |
| عمل گوه‌ای ریشه در سنگ‌های نزدیک سطح و از جا کندن آن‌ها در طوفان‌های شدید | تقویت و عمل تکیه‌گاهی تنه درختان | |
| | بار اضافی دامنه با وزن درختان بزرگ | |
| | جلوگیری از غلطیدن قطعات سست توسط درختان | |
| نگهداری ظرفیت نفوذ در سطح بالا | کاهش دادن نزولات جوی از طریق تبخیر و تعرق از شاخ و برگ کاهش رطوبت خاک و افزایش مکش خاک توسط ریشه | هیدرولوژیکی |

پس از تهیه این لایه‌های اطلاعاتی در محیط ArcGIS و PCI Geomatica به صورت رقومی، برای پهنه‌بندی و محاسبه میزان تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، از برنامه کمل [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] استفاده شده است.

پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله سرعین با استفاده از برنامه کمل در

محدوده پژوهش

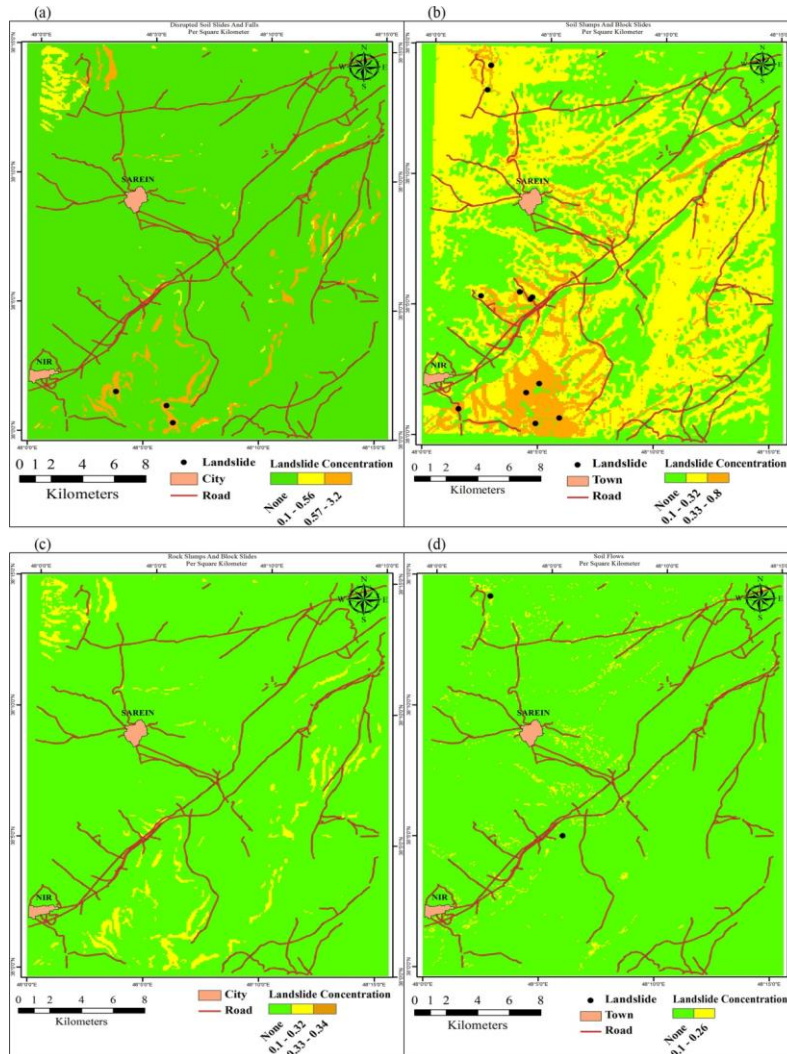
در این مقاله برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله از برنامه کمل [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] استفاده شده است. کمل به منظور فراهم آوردن امکان تحلیل منطقه‌ای در نرم افزار ArcGISTM پیاده‌سازی شده است [۱۲]. زمانی که اطلاعات لازم برای هر یک از متغیرهای ورودی کمل فراهم گردید، تابع‌های تعریف شده در GIS مقادیر هر یک از واحدها را محاسبه کرده و مقادیر همه واحدهای ورودی را به کمل منتقل می‌کند. در نهایت کمل مجموعه‌ای از مقادیر تمرکز زمین‌لغزش‌ها را که هر یک مربوط به یکی از شش نوع مختلف زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است، ارائه کرده است (شکل ۷). بازه‌های تراکم مطابق با تعاریف "خیلی کم"، "کم"، "متوسط"، "زیاد"، "خیلی زیاد" تابع عضویت در کمل هستند، که با استفاده از روش غیرفازی‌سازی مرکز بیشینه^۱ (COM)، غیرفازی شده و به صورت کمی (عددی) ارائه شده‌اند (شکل ۱۲).

۱. Center of Maximum

به‌طوری‌که در شکل ۱۲a مشاهده می‌شود، برنامه کامل برای ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته تراکم "۰/۵۶ - ۰/۱" و "۳/۲ - ۰/۵۷" را پیش‌بینی کرده است و ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته رخ داده ناشی از زلزله سرعین عمدتاً بر روی نواحی با تراکم زمین‌لغزشی "۳/۲ - ۰/۵۷" منطبق شده‌اند. در نقشه تراکم‌های زمین‌لغزشی محاسبه شده برای زمین‌لغزش‌های چرخشی و بلوکی خاکی (شکل ۱۲b) ملاحظه می‌شود که، تعداد بیش‌تر زمین‌لغزش‌های چرخشی و بلوکی خاکی بر روی نواحی با بیش‌ترین تراکم پیش‌بینی شده (۰/۸ - ۰/۳۳) زمین‌لغزش منطبق شده‌اند. زلزله سرعین منجر به رخداد هیچ نوع زمین‌لغزش سنگی نشده است [۱۴]، درحالی که کامل بخش‌های محدودی از ناحیه پژوهشی را مستعد برای رخداد لغزش‌های بلوکی و چرخشی سنگی پیش‌بینی کرده و برای این نوع زمین‌لغزش نقشه تراکم خطر تهیه کرده‌است، که این مطلب می‌تواند به‌عنوان نقطه ضعف برنامه کامل در نظر گرفته شود (شکل ۱۲c). در نقشه تراکم خطر مربوط به جریان‌های خاکی سریع (شکل ۱۲d) مشاهده می‌شود که کامل برای این نوع زمین‌لغزش تراکم "۰/۲۶ - ۰/۱" را پیش‌بینی کرده است و جریان‌های خاکی سریع رخ داده ناشی از زلزله سرعین بر روی این نواحی منطبق شده‌اند. به‌علاوه، نقشه تراکم خطر زمین‌لغزش برای ریزش سنگی و بهمین سنگی ارائه نشده است.

بحث و نتیجه‌گیری

گرچه نزدیک به سه دهه از اولین پژوهش‌های جامع پیرامون پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله می‌گذرد، این علم در دنیا هم‌چنان علمی جوان محسوب شده و افق‌های بسیاری برای گسترش در پیش رو دارد. پیشرفت سریع ابزارهایی هم‌چون سامانه اطلاعات جغرافیایی و نرم افزارهای مربوط به تجزیه و تحلیل آماری، توسعه کاربرد ابزارهای تحلیلی کارآمدتر از روش‌های معمول ریاضی (مانند مجموعه‌های فازی، شبکه‌های عصبی، و نئوفازی) در علوم زمین و افزایش تعداد محققین، زمینه گسترش این علم را مانند علوم مشابه دیگر فراهم ساخته است. از سال ۲۰۰۷ روش‌هایی نظیر روش کامل ارائه شده است که با داده‌های موجود، بیش‌تر هم‌خوان است و عدم قطعیت‌ها را بهتر در نظر می‌گیرد.



شکل ۱۲. تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله محاسبه شده برای زلزله ۱۳۷۵ سرعین، اردبیل با $M_w = 6.1$ (a) تراکم‌های پیش‌بینی شده ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته با استفاده از کمل، (b) تراکم‌های پیش‌بینی شده لغزش‌های بلوکی و چرخشی خاکی با استفاده از کمل، (c) تراکم‌های پیش‌بینی شده لغزش‌های بلوکی و چرخشی سنگی با استفاده از کمل، (d) تراکم‌های پیش‌بینی شده جریان‌های خاکسریع با استفاده از کمل. دایره‌های توپر زمین‌لغزش‌های رخ داده ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین، اردبیل هستند.

به‌طور جالب توجهی، برنامه کامل نقشه تراکم خطر زمین‌لغزش برای ریزش سنگی و بهمن سنگی ارائه نکرده است. اصلی‌ترین پارامتر برای ممکن بودن رخداد ریزش سنگی، زاویه شیب است و با توجه به این‌که حداقل حدآستانه‌ای زاویه شیب لازم برای رخداد ریزش سنگی در کامل، ۳۵ درجه است و در محدوده پژوهش شیب کلی منطقه بین ۲ تا ۲۵ درجه متغیر است، بنا بر این امکان رخداد ریزش سنگی وجود ندارد و طبق مطالب ذکر شده برای واحدهایی که کد عدم امکان داشته باشند باقی مراحل ارزیابی خطر انجام نمی‌پذیرد و مستقیماً خطر آن‌ها خیلی کم فرض می‌شود. در ضمن اصلی‌ترین پارامتر برای ممکن بودن رخداد بهمن سنگی، شدت زلزله است و حداکثر شدت لرزه‌ای محاسبه شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای محدوده بررسی شده VIII در مقیاس اصلاح شده مرکالی است. این مقدار کم‌تر از حداقل حد آستانه‌ای شدت زلزله لازم (MMI IX) برای رخداد بهمن‌های سنگی در کامل است، بنا بر این امکان رخداد بهمن سنگی نیز در محدوده پژوهش وجود ندارد.

در این تحقیق با توجه به نبودن رخداد لغزش‌های چرخشی و بلوکی سنگی در محدوده بررسی شده و نتایج به‌دست آمده از برنامه کامل که بیان‌گر رویداد زمین‌لغزش‌های مذکور است، می‌توان نتیجه گرفت که برنامه کامل در باره زمین‌لغزش‌های خاکی عمل‌کرد بهتری نسبت به زمین‌لغزش‌های سنگی داشته است. به‌طور قابل بحث کامل بخش کوچکی از محدوده پژوهش را مستعد برای رخداد لغزش‌های چرخشی و بلوکی سنگی پیش‌بینی کرده است، در صورتی این نوع از زمین لغزش در واقعیت رخ نداده است. چندین نقطه ضعف در روش کامل وجود دارد، این نقاط ضعف عبارتند از:

- بهمن‌های خاکی و لغزش‌های خاکی گسسته با مقدار زاویه شیب یکسانی مشخص نمی‌شوند.
- گسترش‌های جانبی خاک (نوعی زمین لغزش گروه III) به‌علت این‌که نوع متفاوتی از داده‌ها و اطلاعات برای تعیین آن مورد نیاز است، در ساختار برنامه کامل در نظر گرفته نشده است.

در اینجا لازم به توضیح است که در محدوده بررسی شده دو نمونه زمین لغزش از نوع گسترش جانبی رخ داده است، ولی که به علت این که کامل برای این نوع از زمین لغزش نقشه تراکم خطر ارائه نمی‌کند، امکان مقایسه وجود نداشته است.

منابع

۱. مهدویفر م.ر.، ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور، پایان‌نامه دکتری. ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۵).
2. Keefer D. K., "Landslides caused by earthquakes", Bulletin of the Geological Society of America (1984).
3. Keefer D. K., "Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution-the 1989 Loma Prieta, California event", Engineering Geology (2000).
4. Jibson R. W., "Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacement Using Newmark's Sliding Block Analysis", Transportation Research Record 1411, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. (1993).
5. Jibson R. W., Harp E., Michael J., "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An Example from the Los Angles, California, Area", U.S. Geological Survey (1998).
6. Jibson R. W., "Regression models for estimating coseismic landslide displacement", Engineering Geology (2007).
7. Del Gaudio V., Pierri P., Wasowski J., "An Approach to Time-Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Landslide Hazard", Bulletin of the Seismological Society of America (2003).

8. Pradhan B., Lee S., "Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia", *Landslides* (2009).
۹. رجیبی ع. م.، بررسی احتمالی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در ایران، پایان‌نامه دکتری. زمین‌شناسی گرایش مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس تهران (۱۳۸۹).
10. Miles S. B., Keefer D. K., "Comprehensive areal model of earthquake-induced landslides: Technical specification and user guide", U.S. Geological Survey (2007).
11. Miles S. B., Keefer D. K., "Toward a Comprehensive Areal Model of Earthquake-Induced Landslides", Natural Hazards Center (2009^a).
12. Miles S. B., Keefer D. K., "Evaluation of CAMEL-comprehensive areal model of earthquake-induced landslides", *Engineering Geology* (2009^b).
13. Miles S. B., "Participatory model assessment of earthquake-induced landslide hazard models", Natural Hazards Center (2010).
۱۴. جوکار ن.، نیری ع.، هاشمی طباطبایی س.، گزارش مقدماتی زمین لرزه ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ سرعین (جنوب باختر اردبیل)، مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان (۱۳۷۶).
۱۵. خدابنده الف.، امینی فضل ع.، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ اردبیل، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۵).
۱۶. پارسی‌زاده ف.، پویان ژ.، توکلی ب.، تیمو م.، عباسی م. ر.، غفوری‌آشتیانی م.، فلاحی و.، کوهیان، ر.، زمین لرزه ۱۰/۱۲/۷۵ گلستان، اردبیل T مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷۶).
۱۷. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور.، گزارش چهار صفحه‌ای زمین‌لغزش‌ها و عکس‌های زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین (اردبیل)، گروه مطالعات مهندسی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۷۶).

18. Zadeh L. A., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE transactions on Systems, Man, and cybernetics (1973).
19. Zadeh L. A. ., "Fuzzy logic equals computing with words", IEEE Transactions on Fuzzy Systems (1996).
20. Zadeh L. A., "Fuzzy sets. Information and Control" (1965).
21. Liao C., Lee C. T., Liao H., "Statistical analysis of factors affecting landslides triggered by the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake", American Geophysical Union Meeting, San Francisco (2002).
22. Mahdavifar M. R., Jafari M. K., Zolfaghari M. R., "The attenuation of arias intensity in Alborz and Central Iran", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) (2007).
23. Arias A., "A measure of Earthquake Intensity In: Seismic Design for Nuclear Power Plants, Massachusetts Institute of Technology Press", Cambridge (1970).
24. Wilson R.C., "Relation of Arias Intensity to Magnitude and Distance in California", US Geological Survey (1993).
25. Bommer J., Rodriguez C., "Earthquake-induced landslides in Central America", Engineering Geology (2002).
26. McCrink T., Real C., "Evaluation of the Newmark method for mapping earthquake-induced hazards in the Laurel 7.5' quadrangle, Santa Cruz County, California", Final Technical Report for U.S. Geological Survey (1996).
27. Wang Y., Keefer D. K., Wang Z., "Seismic hazard mapping in Eugene-Spring field, Oregon", Oregon Geology (1998).

28. Mankelov J., Murphy W., "Using GIS in the probabilistic assessment of earthquake triggered landslide hazards", *Journal of Earthquake Engineering* (1998).
29. Jibson R. W., Harp E. L., Michael J. M., "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps", *Engineering Geology* (2000).
30. Jin S., Sader S. A., "Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances", *Remote Sensing of Environment* (2005).
31. Crist E. P., Cicone R. C., "A physically-based transformation of thematic mapper data the TM tasseled cap", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (1984).
32. Hancox G., Perrin N., Dellow G., "Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and MM intensity in New Zealand", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* (2002).
33. Rodriguez C., Bommer J., Chandler R., "Earthquake-induced landslides: 1980-1997", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (1999).
34. Cruden D., Varne, D., "Landslide types and processes", in A. Turner and R. Schuster (Ed.), *Landslides: Investigations and Mitigation* (1996).
35. Brand E. W., "State-of-the-art report of landslides in Southeast Asian", *4th International Symposium on landslides*, Toronto (1984).
36. Ryan Larry., "Creating a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) image Using Multi Spec", *The GLOBE Program* (1997).