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 ومهندسی زلزله
وحید باقری؛ دانشگاه خوارزمی

تاریخ: دریافت ۹۰/۹/۵ **پذیرش** ۹۲/۲/۱۷

چکیده

در این مقاله یکی از روش‌های جدید پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (برنامه کمل[1])(مدل ناحیه‌ای جامع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله)[2] برای پیش‌بینی این نوع از زمین‌لغزش‌ها بررسی شده است. بدین منظور محدودهٔ تحت تأثیر زلزله سرعین (سال ۱۳۷۵) برای منطقه الگو انتخاب شده است. برنامه کمل با استفاده از سیستم‌های منطق فازی طراحی و اجرا شده است. سیستم‌های منطق فازی زیر مجموعه‌ای از روش محاسبه با واژه‌ها[3] 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، ردهٔ 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[4]، سنجش از دور(RS)، نقشه‌های موجود و بازدیدهای محلی از منطقهٔ بررسی شده جمع‌آوری شده است. این داده‌ها با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی رقومی و وزن‌دهی شده‌اند و سپس با استفاده از برنامهٔ کمل، میزان تراکم خطرزمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله محاسبه شده است. کمل چارچوب جامعی را برای مدل‌سازی همه انواع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیائی فراهم کرده است. در نهایت مقایسهٔ 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 ٤. Landsat

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت و توسعهٔ 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 رخ‌داده 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 زمین لغزش در زمان زلزله می‌تواند موجب قطع عملیات امدادرسانی به زلزله زدگان گردیده و میزان خسارات را بالا ببرد.

کیفر (۱۹۸٤) [۲] زمین‌لغزش‌ها را در ۳ دسته گروه‌بندی کرده است:

I. ریزش‌ها و لغزش‌های گسسته

II. زمین لغزش‌های پیوسته

III. جریان‌های خاکی سریع و گسترش‌های جانبی

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

در رابطه با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله کیفر(۱۹۸٤) [۲] کامل‌ترین تحلیل و بررسی انواع زمین لغزش را انجام داده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهندهٔ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

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 درخارج از کشور پژوهش*ای* 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](۱۹۸٤) [۲]، کیفر(۲۰۰۰) [۳]، جیبسون[۲] (۱۹۹۳) [٤]، جیبسون و دیگران(۱۹۹۸) [۵]، جیبسون(۲۰۰۷) [٦]، دل‌گادیو و واسووسکی[۳] (۲۰۰۳) [۷]، پاردهان‌و لی[٤] (۲۰۰۹) [۸] و در داخل کشور می‌توان به بررسی‌های مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] و رجبی(۱۳۸۹)[۹] اشاره کرد.

مایلز و کیفر(۲۰۰۷، [a]۲۰۰۹، [b]۲۰۰۹) [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و مایلز (۲۰۱۰) [۱۳] از جمله مهم‌ترین تحقبقات را در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (کمل) انجام داده‌اند در این پژوهش‌ها، نه تنها نقشه حساسیت زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله بلکه نقشهٔ 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 به‌روش‌های کیفی موسوم است (کمل) [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] در جهت به‌کارگیری، بهبود و گسترش این روش برای به‌خدمت گرفتن آن در ایران گامی هرچند کوچک برداشته شود. بدین‌منظور محدودهٔ تحت تأثیر زلزلهٔ سرعین (سال ۱۳۷۵) برای منطقه الگو انتخاب شده است. در این تحقیق از نرم‌افزار ArcGIS (سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی) و PCI Geomatica (نرم‌افزار مخصوص پردازش تصاویر ماهواره‌ای) استفاده شده است.

---

۱. Keefer ۲. Jibson ۳. Del Gaudio & Wasowski ٤. Pradhan &Lee

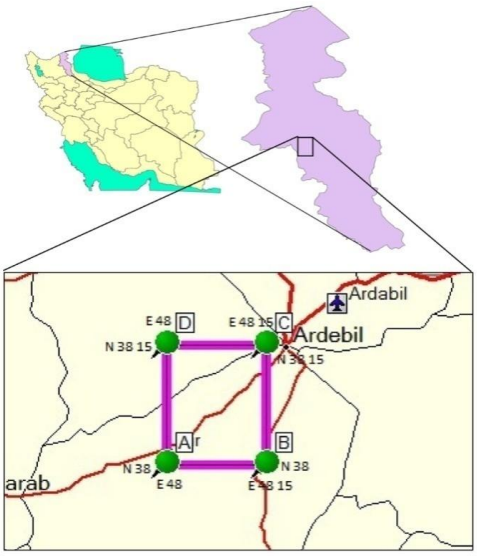
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

موقعیت جغرافیایی محدودهٔ متأثر از زلزله ۱۳۷۵سرعین

روستاهایی که در جنوب باختری شهرستان اردبیل (روستاهای گلستان، جوراپ، تجرق، شیران، علی داشین، بیله درق، آتش‌گاه، ارجستان، بنمار، سئین، کنزق، ایردی موسی، کلخوران ویند، ورنیاب، شایق، اوجور، اسمرز، کردده) قرار دارند، از مناطقی هستند که در اثر زمین‌لرزه ویران‌گر ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ سرعین [۱۳] آسیب دیدند. منطقهٔ بررسی شده، محدودهٔ متأثر از زلزله ۱۳۷۵سرعین است که بین طول جغرافیایی ۰۰´ ۴۸° تا۱۵´ ۴۸° و عرض جغرافیایی ۰۰´ ۳۸° تا ۱۵´ ۳۸° قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ متأثر از زلزلهٔ ۱۳۷۵ سرعین

مشخصات زلزله رویداده در محدودهٔ بررسی شده

در ۱۰ اسفند سال ۱۳۷۵ [۱٤] زمین‌لرزه‌ای با بزرگای M_w=٦/۱ و عمق‌کانونی ۹ کیلومتر در استان اردبیل در شمال غرب ایران روی داد و ۹٦۵ کشته و بیش از ۲۰۰۰ نفر مجروح برجای گذاشت. بررسی‌های انجام شده در محدودهٔ کلان لرزه‌ای دلالت بر آن دارند که گستره بیش‌ترین شدت زمین‌لرزه در جنوب شرق کوه آتشفشان سبلان قرارداشته و بیش‌ترین آسیب‌ها به ۳ روستای جوراپ، گلستان و شیران وارد شده است. رومرکز زمین‌لرزه بر پایهٔ داده‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

ایست‌گاه‌های لرزه‌نگاری در نقطه‌ای به‌عرض شمالی۳۸/۰۷ و طول خاوری ٤٨/٠٦ 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 سرعین VI^+ برآورد شده است [١٤].

وضعیت زمین ساخت منطقه مورد مطالعه

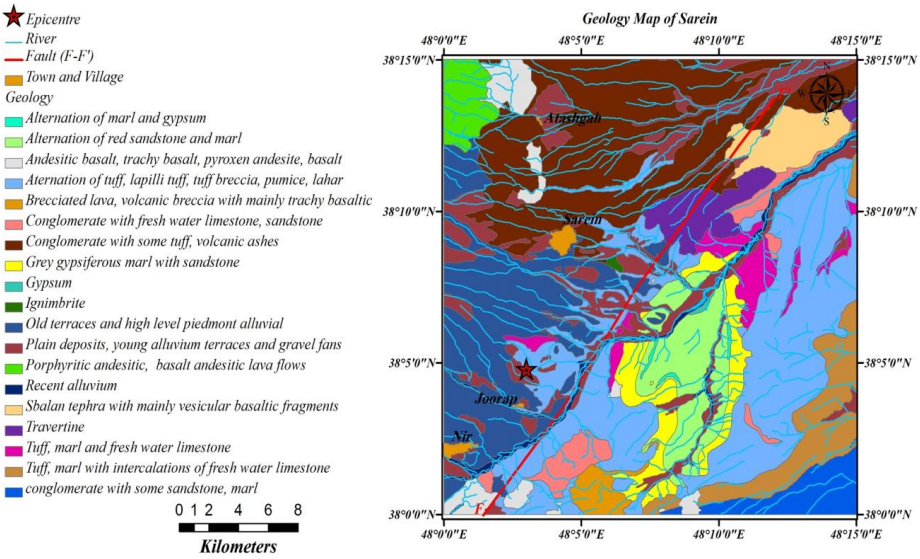
منطقه آذربایجان از دیدگاه تکتونیکی جزء مناطق فعال محسوب می‌شود. منطقهٔ زلزله‌زده سرعین با گسل‌های فعالی چون بزقوش با روند شرقی- غربی(جنوب اردبیل) و گسل نور با روند شمال شرقی- جنوب غربی(شرق اردبیل) احاطه شده است [١٥]. در ضمن تنها گسل موجود در محدودهٔ بررسی شده گسل فرعی بالیخلو چای است که در امتداد رودخانه جاری در داخل درهٔ بالیخلوچای قرار دارد. منطقهٔ 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 [١٦].

زمین‌شناسی منطقه

ناحیهٔ بررسی شده در دامنه‌های جنوب شرقی رشته کوه سبلان قرار دارد. کوه سبلان تودهٔ 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 تودهٔ صلب تبعیت می‌کنند [١٥]. نقشه زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی شده در شکل۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]



شکل۲. نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ متأثر از زلزله ۱۳۷۵ سرعین [۱۵]

زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در محدودهٔ 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 پدیدهٔ زمین‌لغزش و ریزش‌سنگی در اثرزلزله گسترش چندانی نداشته است (شکل۳). حرکات توده‌ای زمین به‌دلیل تغییرات موضعی شیب و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در روستای شیران به‌صورت جریان گلی (Mud flow) و با طول نزدیک ۱۳۰ متر به وقوع پیوسته است [۱٤].

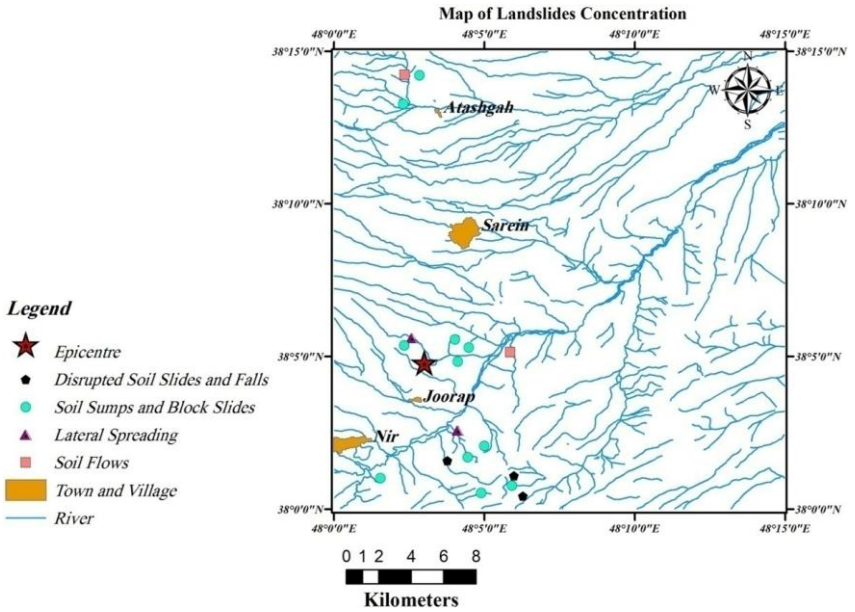
هم‌چنین در ۱/۵ کیلومتری شمال روستای آتش‌گاه (شکل٤) و یک کیلومتری خاور روستای جوراپ، لغزش‌های بلوکی- خاکی[۱] به‌ترتیب به وسعت۳۰۰۰ و۲۵۰۰ مترمربع رخ داده است. در روستای جوراپ در اثر زلزله، لغزش‌های سطحی رخ داده است، به‌طوری‌که مشاهدات صحرایی نشان‌دهندهٔ این است که محدودهٔ شرق این روستا بسیار مستعد زمین‌لغزش است. در بخش جنوبی روستای ورنیاب، و در دیوارهٔ جنوبی دره، لغزشی به‌وسعت ۳۰۰۰ متر مربع رخ داده است. در روستای ایردی موسی مسیر رودخانه در اثر رانش زمین موقتاً مسدود

۱. Soil block slide

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

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**) [۱٤].



شکل۳. نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین در محدوهٔ بررسی شده

شکل٤. لغزش بلوکی- خاکی، شمال روستای آتش‌گاه(دید عکس به سمت شمال) [۱۷]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

شکل۵. تغییر مسیر رودخانه در اثر زلزله۱۳۷۵ سرعین، روستای ایردی موسی(دید عکس به سمت شمال)[۱۷]

روش کار

برنامهٔ کمل با استفاده از سیستم منطق فازی طراحی و اجرا شده است. سیستم منطق فازی زیرمجموعه‌ای از روش محاسبهٔ با واژه‌ها[۱] هستند [۱۸]. محاسبهٔ 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 محاسبهٔ 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.

برنامهٔ کمل چارچوب جامعی را برای مدل‌سازی همه انواع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از سیستم منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی فراهم کرده‌است. کمل تراکم خطر مرتبط با مجموع ٦ نوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله را که در جدول ۱ ارائه شده است، مدل‌سازی کرده‌است.

۱. Computing with words ۲. IF-THEN

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

جدول۱. طبقه‌بندی انوع تجمیع شده زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، استفاده شده با مدل کمل، بر اساس کیفر(۱۹۸٤) [۲]

زمین لغزش	مجموعه
ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته بهمن‌های سنگی لغزش‌های خاکی گسسته، ریزش‌ها و بهمن‌ها	I
لغزش‌های بلوکی و چرخشی سنگی لغزش‌های بلوکی و چرخشی خاکی	II
جریان‌های خاکی سریع	III

مدل پیشنهادی مایلز و کیفر (کمل) [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 چندیدن 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 به‌وسیلهٔ 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 زاویهٔ شیب به‌عنوان لایه‌های ورودی به‌کار می‌روند (شکل٦).

شکل٦. نمودار جریانی داده‌ها برای بخش امکان رخدادCAMEL، شامل اطلاعات شاخص [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

در مرحلهٔ ارزیابی خطر نیز ۷ لایه وارد می‌شود. لایهٔ اول لایهٔ 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 لایهٔ دیگر که در ارزیابی خطر به‌کار می‌روند عبارتند از ۱) ردهٔ مقاومتی زمین (ردهٔ زمین)، ۲) زاویهٔ شیب، ۳) رطوبت، ٤) فاصله از رودخانه و جاده، ۵) پوشش گیاهی، و٦) شدت زلزله. در این مرحله هر یک از انواع زمین‌لغزش به‌طور جداگانه در دو زیر بخش، حساسیت استاتیکی و خطر لرزه‌ای بررسی می‌شود (شکل۷). 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 ردهٔ مقاومتی زمین (ردهٔ زمین) و زاویهٔ 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 لایهٔ (ردهٔ مقاومتی زمین و مقدار شیب) یا هر سه لایهٔ 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 مرحلهٔ 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 می گیرند. برای برخی از انواع زمین‌لغزش‌ها (ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته ، ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته و بهمن‌های خاکی و جریان‌های سریع خاکی) لایهٔ رطوبت (با نقش افزایش‌دهنده) در این مرحله وارد می‌شود. زیربخش خطر لرزه‌ای، اثر تکان‌های زلزله را روی حساسیت استاتیکی محاسبه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

شده به‌وسیلهٔ زیربخش قبلی در نظر می‌گیرد. به‌طور چشم‌گیری، محدوده ممکن مقادیر تراکم که به‌وسیله بخش ارزیابی خطر محاسبه شده است و به‌ترتیب با مقادیر توصیفی "خیلی کم" تا "خیلی زیاد" مشخص شده است، برای هر نوع زمین‌لغزش متفاوت است. در این زیربخش تمامی ترکیبات ممکن از مقادیر حساسیت استاتیکی و شدت زلزله در نظر گرفته می‌شود (شکل۸). چنان‌که در شکل ۸ نشان داده شده است نقش زلزله به‌صورت افزایشی است. این خروجی (که خروجی کل مدل نیز محسوب می‌شود)، برآوردی از تراکم زمین‌لغزش در هر کیلومترمربع است (شکل۷). مطابق شکل۷، نکته مهم آن است که، محدودهٔ ممکن مقادیر تراکم (و در نتیجه معادل کمی خطر) برای هر نوع زمین‌لغزش متفاوت است.

شکل۷. نمودار جریانی داده‌ها بر ای بخش خطر CAMEL، معرف ورودی ها(اطلاعات تشدید کننده)، خروجی‌ها، و ترتیب قواعد [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

شکل۸. بلوک قوانین خطر لرزه‌ای برای ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی گسسته [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

مقادیر کمّی معرف اصطلاحات توصیفی به‌کار رفته در نمودار جریانی بخش ارزیابی خطر کمل (شکل۷) برای متغیر شدت زلزله و زاویهٔ شیب به ترتیب در جداول٤ و ۵ ارائه شده‌اند [۱۰].

جدول۲. معادل کمّی اصطلاحات توصیفی به‌کار رفته در نمودار بخش خطر کمل برای متغیر شدت زلزله [۱۰]

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

جدول۳. معادل کمّی اصطلاحات توصیفی به‌کار رفته در نمودار بخش خطر کمل برای متغیر زاویه شیب [۱۰]

معادل کمّی(Degree)	اصطلاحات توصیفی متغیر زاویه شیب
۵° >	Very Gradual
۵° - ۱۵°	Gradual
۱۵° - ۲۰°	Medium Gradual
۲۰° - ۲۵°	Medium
۲۵° - ۳۵°	Medium Steep
۳۵° - ٤۰°	Steep
٤۰° - ۵۰°	Very Steep
۵۰° - ٦۰°	Extremely Steep
٦۰° - ٦۵°	Near Vertical

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

برای به‌کارگیری این روش لایه‌های اطلاعاتی لازم عبارتند از:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

۱. **انحنای دامنه**[۱]: اطلاعات کمّی 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 منطقهٔ بررسی شده در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) با استفاده از دستور"انحنا[۳]" 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 زمین لغزش‌ها، به جز بهمن‌های سنگی است. مقدار متوسط (بزرگ‌تر از VIII) معرف حد آستانه‌ای لازم برای رخداد دسته دوم (لغزش‌های چسبنده) 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 کمل (شکل**٦**) با اصطلاحات توصیفی (بزرگ‌تر از VII)[۵]، (بزرگ‌تر از VIII)[٦]، (بزرگ‌تر از IX)[۷] ارائه شده‌اند. برای تهیهٔ لایهٔ اطلاعاتی شدت زلزله ابتدا با استفاده از مختصات رومرکز، بزرگای گشتاوری (M_W) و عمق کانونی زلزله و رابطهٔ (۱) [۲۲] نقشهٔ هم‌شدت آریاس[۸] [۲۳] محاسبه و سپس با استفاده از رابطهٔ (۲) [٢٤] نقشهٔ شدت زلزله بر اساس مقیاس شدت مرکالی اصلاح شده (MMI) محاسبه شده است (شکل**۹b**).

$$\log Ia = -۳/۸۸۰ + ۰/۸۱۰M - \log R - ۰/۰۰۲R \qquad (۱)$$

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

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

$$Log(I_a)= ۰/۵۲۷ I_{MMI} - ۳/۸۱۶ \quad (۲)$$

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

۳. **عمق سطح لغزش خاکی**: عمق‌سطح‌لغزش‌خاکی بر پایهٔ اطلاعات برگرفته از کیفر (۱۹۸٤) [۲] و بومر و رودریگوئز[۱] (۲۰۰۲) [۲۵] تعریف شده است. برای لایهٔ 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 [۲٦]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹].

۴. **ارتفاع دامنه**[۲]: ارتفاع دامنه عبارت است از"اختلاف ارتفاع بین خط‌الرأس و خط‌القعر هر یک از دامنه‌های موجود در محدودهٔ بررسی شده". ارتفاع دامنه در نتیجه فرسایش یا عملیات حفاری می‌تواند تغییر کند. تغییر ارتفاع دامنه همانند زاویهٔ شیب دامنه، نقش مؤثری را در مسئلهٔ پایداری توده می‌تواند داشته باشد. در دو دامنه مشابه و با زاویهٔ شیب ثابت، دامنه‌ای که مرتفع‌تر است پتانسیل ناپایداری بیش‌تری دارد. ارتفاع دامنه به‌عنوان شاخصی برای رخداد بهمن‌های سنگی درنظر گرفته شده است [۱۰]. کیفر (۱۹۸٤) [۲] تصریح کرده است که برای بروز بهمن سنگی ارتفاع دامنه باید بزرگ‌تر یا مساوی ۱۵۰ متر باشد. چون بهمن‌سنگی تنها نوع زمین‌لغزشی است که به این لایه اطلاعاتی وابسته است. لایه ارتفاع دامنه همان مدل رقومی ارتفاعی (DEM) است که از روی نقشهٔ توپوگرافی منطقه در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ به‌دست آمده است (شکل۹c).

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

۱. Bommer & Rodriguez ۲. Slope Height

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

است. بدین صورت که بعد از رقومی‌سازی نقشه زمین‌شناسی منطقه، اقدام به تفکیک مصالح خاک و سنگ از یک‌دیگر شده است (شکل**۱۰a**). هم‌چنین لازم به‌توضیح است که، اکثر قسمت‌های سنگی موجود در منطقهٔ بررسی شده با رسوبات نئوژن و کواترنر پوشانده شده و رخنمون‌های سنگی به‌ندرت در منطقهٔ 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 نشان‌دهندهٔ اطلاعات موجود در مورد انواع مختلف زمین لغزش‌ها 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 رخ‌داده 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 محدودهٔ بررسی شده با استفاده از باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک[۲] (NIR)) و باند ۵ (باند مادون قرمز میانی[۳] (SWIR)) و رابطهٔ **۳** در محیط نرم‌افزار PCI Geomatica تهیه شده است (شکل**۱۰b**).

$$NDMI = \frac{NIR(٤) - SWIR(٥)}{NIR(٤) + SWIR(٥)} \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که در رابطهٔ ۳ مشاهده می‌شود، اگر در رابطهٔ ۳، اطلاعات باند ۵ از باند٤ کم شود، شاخص NDMI معرف میزان رطوبت خاک است، ولی اگر اطلاعات باند ٤ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

۷. **زاویهٔ شیب**: شیب دامنه به‌عنوان عاملی مورفولوژیک به‌دلیل تأثیری که در عمل‌کرد نیروی محرک خصوصاً نیروی جاذبه زمین دارد از عوامل اصلی تعیین کننده وضعیت پایداری دامنه‌ها محسوب می‌شود. اطلاعات مربوط به حداقل زاویهٔ شیب لازم برای وقوع هر نوع زمین‌لغزش با متغیر زاویهٔ شیب، بیان می‌شود. مقادیر معرف کم‌ترین حد آستانه‌ای زاویه شیب لازم برای رخداد هر یک از ٦ نوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله براساس هنکاکس[۱] و همکاران (۲۰۰۲) [۳۲]، رودریگوئز و همکاران (۱۹۹۹) [۳۳] و کیفر(۱۹۸٤) [۲] در جدول٤ ارائه شده‌است. لایهٔ اطلاعاتی معرف زاویهٔ شیب از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در محیط نرم‌افزار ArcGIS به‌دست آمده است (شکل**۱۰c**).

جدول٤.اطلاعات در مورد حداقل زاویهٔ شیب مورد نیاز برای رخداد نوع خاصی از زمین‌لغزش [۲]، [۳۲]، [۳۳]

نوع زمین لغزش	حداقل زاویهٔ شیب(درجه)		
	کیفر(۱۹۸٤)	رودریگوئز و دیگران (۱۹۹۹)	هنکاکس و دیگران(۲۰۰۲)
لغزش‌های سنگی و ریزش‌های سنگی گسسته	۳۵ – ٤۰	۳۵	٤۰
لغزش‌های خاکی گسسته/ ریزش‌های خاکی	۱۵ / ٤۰	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

ناموجود=n/a

۸. **ردهٔ مقاومتی‌زمین (ردهٔ زمین)**: لایه اطلاعاتی ردهٔ مقاومتی‌زمین بر اساس توضیحات و اطلاعات مبتنی بر کیفر (۲۰۰۰) [٤] در مورد ارتباط مشخصات کیفی مواد تشکیل دهندهٔ دامنه (سنگ شناسی) با میزان تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله تعریف شده است. ردهٔ مقاومتی زمین در ارتباط با رتبه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی با توجه به حساسیت‌شان به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است. برای تهیهٔ این لایه اطلاعاتی ابتدا از نقشهٔ زمین‌شناسی رقومی شده ۱/۱۰۰۰۰۰ اردبیل [۱۵] استفاده شده و سپس نقشه مذکور با استفاده از عملیات صحرایی و عکس‌های هوایی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰،

۱. Hancox et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

تدقیق شده است. برای هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی در منطقهٔ بررسی شده مقداری را به‌عنوان رده مقاومتی زمین در بازهٔ ۱ تا ۵ (به‌طوری‌که برای کمل مورد نیاز است) با دقت ۰/۵ تعیین شده است. مقادیر رده مقاومتی‌زمین 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 نشان‌دهندهٔ شرایط زمین ضعیف‌تر و حساس‌تر نسبت به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله هستند [۱۰] (شکل**۱۱a**).

۹. **فاصله از رودخانه و جاده**: از نظر مفهومی، لایهٔ اطلاعاتی فاصله از رودخانه و جاده موجب سهولت ارائه عوامل مورفولوژیکی مؤثر در گسیختگی دامنه (مانند فرسایش پنجه دامنه باجریان آب، یا شیب بیش از حد دامنه ناشی از قطع شدگی به‌وسیله جاده) می‌شود [۳٤]. این لایه به‌طور مشخص، فاصلهٔ دامنه از رودخانه و جاده برحسب متر است. در این تحقیق برای مشخص‌کردن فاصله از رودخانه و جاده، گراف‌های خطی رقومی برگرفته از سازمان نقشه‌برداری در مقیاس۱/۵۰۰۰۰ که معرف جاده‌ها و رودخانه‌های اصلی در محدودهٔ 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**).

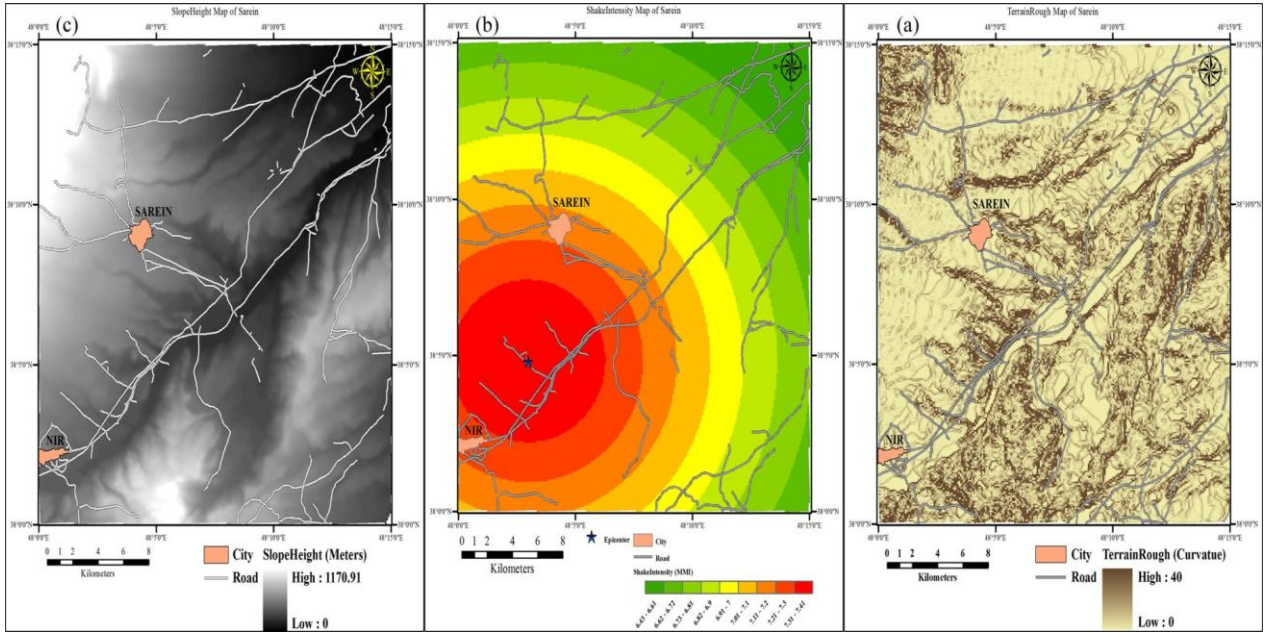
۱۰. **پوشش گیاهی**: پوشش‌گیاهی از نظر مکانیکی نقش متفاوتی در پایدارسازی و یا ناپایدار کردن دامنه‌ها ایفا کرده است [۳۵] (جدول**۵**). از نظر مفهومی، این لایه اطلاعاتی اشاره به تراکم پوشش گیاهی یک منطقه، که به‌صورت درصدی از کل منطقه بیان می‌شود، دارد [۱۱]. لایه اطلاعاتی معرف میزان پوشش گیاهی در منطقه برحسب درصد، با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش‌گیاهی[۲] تهیه شده است. این شاخص برای محدودهٔ بررسی شده با استفاده از باند ۳ (باند قرمز)[۳] و باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک)[٤] و رابطهٔ ٤ در محیط نرم‌افزار (پی‌سی‌آی ژئومتیکا)[۵] تهیه شده است [۳٦] (شکل**۱۱c**).

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

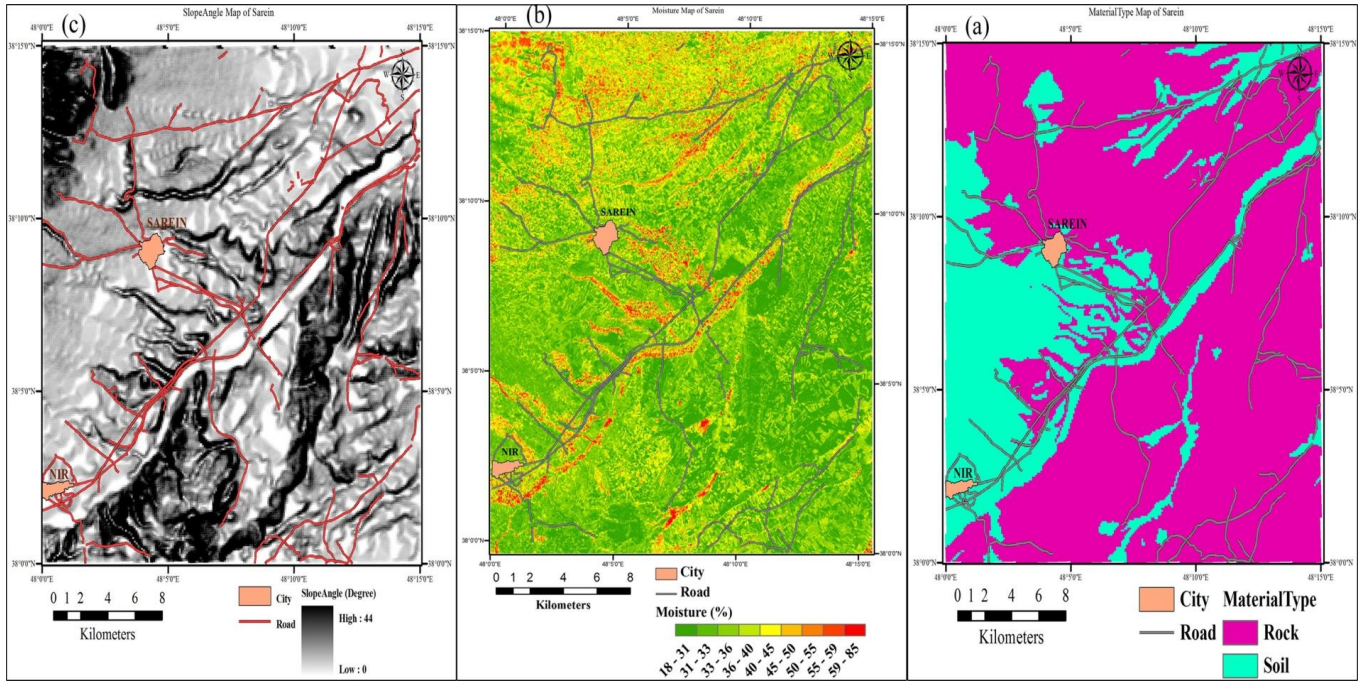
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



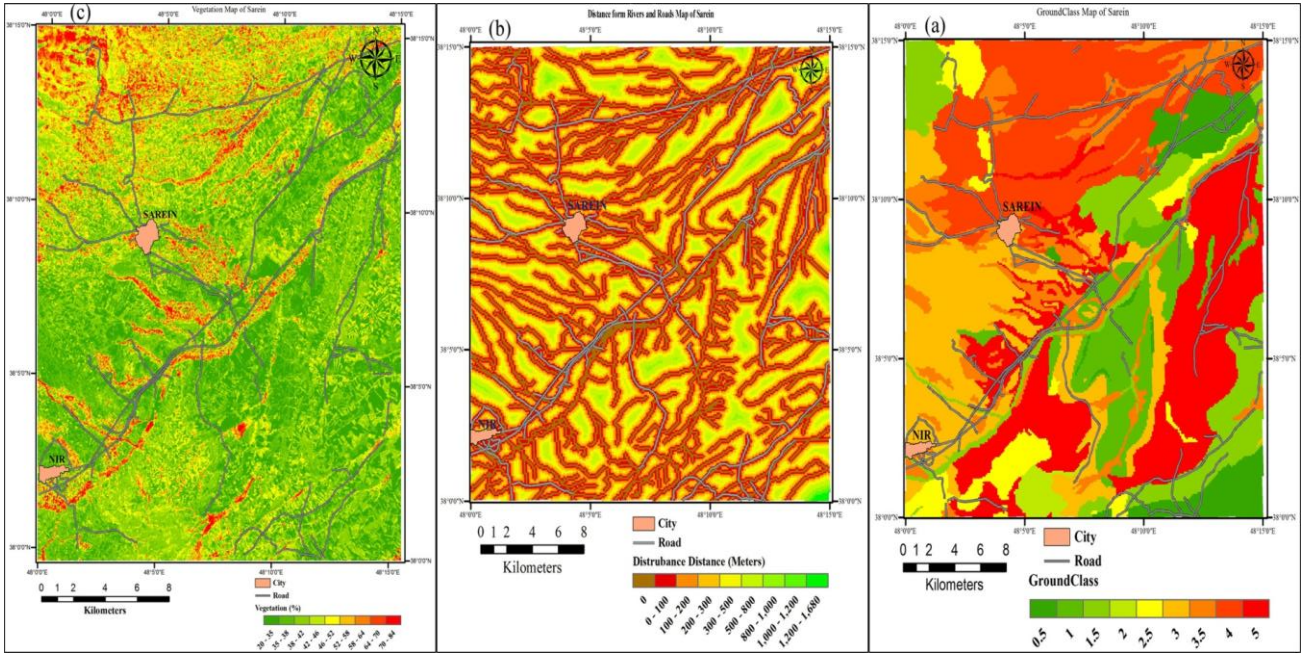
شکل۹. نقشه‌های معرف لایهٔ داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقهٔ سرعین برای کاربرد در کمل a) انحنای دامنه (نقاط تیره‌تر معرف تغییرات شیب تندتر)، b) شدت زلزله مربوط به زلزله ۱۳۷۵ سرعین با بزرگای ۶٫۱ (Mw=6.1)(نقاط تیره تر معرف شدت زلزله بیشتر) و c) ارتفاع دامنه(نقاط تیره تر معرف ارتفاع بیش‌تر دامنه)

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل ۱۰ .نقشه‌های معرف لایهٔ داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقه سرعین برای کاربرد در کمل a) نوع مصالح (نقاط تیره معرف مصالح سنگی و نقاط روشن معرف مصالح خاکی)، b) رطوبت (نقاط تیره تر معرف رطوبت بیش‌تر) و c) زاویهٔ شیب(نقاط تیره‌تر معرف شیب‌های تندتر)

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل ۱۱. نقشه‌های معرف لایهٔ داده‌های ورودی محاسبه شده مربوط به منطقهٔ سرعین برای کاربرد در کمل a) دسته‌های رده زمین، معرف مقاومت نسبی، برای واحدهای زمین شناسی بر اساس کیفر(۲۰۰۰) (نقاط تیره تر معرف مقاومت نسبی کم‌تر)، b) فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها (نواحی تیره‌تر نشان‌دهندهٔ نواحی مجاور نزدیک‌تر)و c) پوشش گیاهی(نقاط تیره‌تر معرف تراکم بیشتر پوشش گیاهی)

$$NDVI = \frac{NIR(4) - RED(3)}{NIR(4) + RED(3)} \quad (٤)$$

جدول۵. اثرات پوشش گیاهی بر پایداری دامنه‌ها [۳۵]

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

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

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

در این مقاله برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله از برنامه کمل [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] استفاده شده است. کمل به‌منظور فراهم آوردن امکان تحلیل منطقه‌ای در نرم افزار ArcGIS™ 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 (شکل۷). 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 به‌صورت کمی(عددی) ارائه شده‌اند (شکل**۱۲**).

۱. Center of Maximum

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

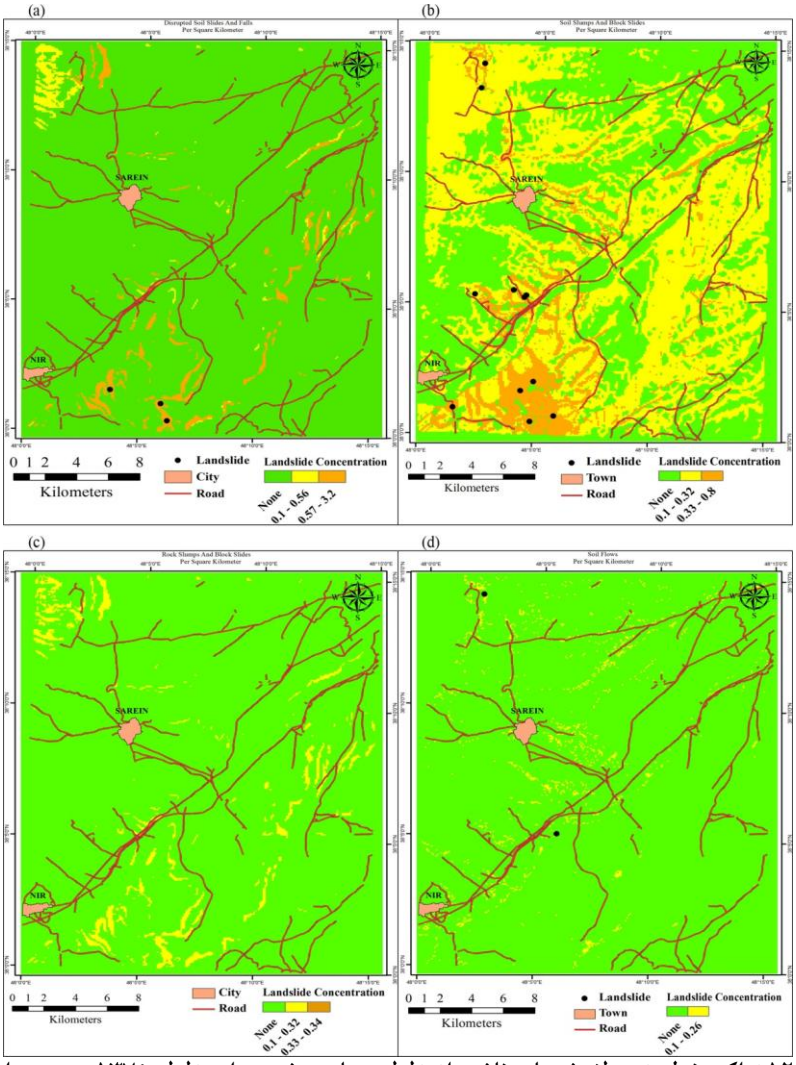
به‌طوری‌که در شکل۱۲a مشاهده می‌شود، برنامه کمل برای ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته تراکم "۰/۵٦ – ۰/۱" و"۳/۲ – ۰/۵۷" را پیش‌بینی کرده است و ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته رخداده ناشی از زلزله سرعین عمدتاً بر روی نواحی با تراکم زمین‌لغزشی"۳/۲–۰/۵۷" منطبق شده‌اند. در نقشه تراکم‌های زمین‌لغزشی محاسبه شده برای زمین‌لغزش‌های چرخشی و بلوکی خاکی(شکل۱۲b) 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 سنگی‌نشده است [۱٤]، درحالی که کمل بخش‌های محدودی از ناحیهٔ 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 کمل درنظر گرفته شود (شکل۱۲c). در نقشهٔ تراکم خطر مربوط به جریان‌های خاکی سریع (شکل۱۲d) مشاهده می‌شود که کمل برای این نوع زمین‌لغزش تراکم "۰/۲٦ – ۰/۱" را پیش‌بینی کرده است و جریان‌های خاکی سریع رخداده ناشی از زلزله سرعین بر روی این نواحی منطبق شده‌اند. به‌علاوه، نقشه تراکم خطر زمین لغزش برای ریزش سنگی و بهمن سنگی ارائه نشده است.

بحث و نتیجه‌گیری

گرچه نزدیک به سه دهه از اولین پژوهش‌*های* 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، توسعهٔ 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 فراهم‌ساخته است. از سال ۲۰۰۷ روش‌هایی نظیر روش کمل ارائه‌شده است که با داده‌های موجود، بیش‌تر هم‌خوان است و عدم قطعیت‌ها را بهتر در نظر می‌گیرد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]



شکل۱۲.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 خاکیسریع با استفاده از کمل. دایره‌های توپر زمین‌لغزش‌های رخداده ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین، اردبیل هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

به‌طور جالب توجهی، برنامه کمل نقشه تراکم خطر زمین‌لغزش برای ریزش سنگی و بهمن سنگی ارائه نکرده است. اصلی‌ترین پارامتر برای ممکن بودن رخداد ریزش سنگی، زاویهٔ شیب است و با توجه به این‌که حداقل حدآستانه‌ای زاویهٔ شیب لازم برای رخداد ریزش سنگی در کمل، ۳۵ درجه است و در محدودهٔ پژوهش شیب کلی منطقه بین ۲ تا ۲۵ درجه متغیر است، بنا بر این امکان رخداد ریزش‌سنگی 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 بهمن‌سنگی، شدت زلزله است و حداکثر شدت لرزه‌ای محاسبه شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای محدودهٔ 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 کمل است، بنا بر این امکان رخداد بهمن‌سنگی نیز در محدودهٔ پژوهش وجود ندارد.

در این تحقیق با توجه به نبودن رخداد لغزش‌های چرخشی و بلوکی سنگی در محدودهٔ بررسی شده و نتایج به‌دست آمده از برنامه کمل که بیان‌گر رویداد زمین‌لغزش‌های مذکور است، می‌توان نتیجه گرفت که برنامهٔ کمل در بارهٔ زمین‌لغزش‌های خاکی عمل‌کرد بهتری نسبت به زمین‌لغزش‌های سنگی داشته است. به‌طور قابل بحث کمل بخش کوچکی از محدودهٔ 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 کمل وجود دارد، این نقاط ضعف عبارتند از:

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

در اینجا لازم به توضیح است که در محدودهٔ بررسی شده دو نمونه زمین لغزش از نوع گسترش جانبی رخ داده است، ولی که به‌علت این‌که کمل برای این نوع از زمین لغزش نقشهٔ 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).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

8. Pradhan B., Lee S., "Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia", Landslides (2009).

۹. رجبی ع. م.، *بررسی احتمالی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در ایران*، پایان‌نامه دکتری. زمین‌شناسی گرایش مهندسی، دانشکدهٔ 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).

۱٤. جوکار ن.، نیری ع.، هاشمی‌طباطبایی س.، *گزارش مقدماتی زمین لرزه ۱۰ اسفند ۱۳۷۵سرعین(جنوب باختر اردبیل)*، مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان (۱۳۷٦).

۱۵. خدابنده الف.، امینی فضل ع.، *نقشهٔ زمین‌شناسی۱/۱۰۰۰۰۰ اردبیل*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۵).

۱٦. پارسی‌زاده ف.، پویان ژ.، توکلی ب.، تیو م.، عباسی م. ر.، غفوری‌آشتیانی م.، فلاحی و.، کوهیان، ر.، *زمین لرزه ۱۰/۱۲/ ۷۵ گلستان* ،اردبیلT مؤسسهٔ بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷٦).

۱۷. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور.، *گزارش چهار صفحه‌ای زمین‌لغزش‌ها و عکس‌های زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵سرعین(اردبیل)*، گروه مطالعات مهندسی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (۱۳۷٦).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

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).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]

28. Mankelow 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 damange, 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).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.5.5]