پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵سرعین، ایران با استفاده از روش‌های کیفی و کمی

*سیدمحمود فاطمی‌عقدا؛ دانشگاه خوارزمی تهران
محمدرضا مهدویفر؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
وحید باقری؛ دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ: دریافت ۹۰/۳/۳ **پذیرش** ۹۱/۱۰/۱۳

چکیده

در این پژوهش یکی از روش‌های جدید پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (مدل ناحیه‌ای جامع زمین لغزش‌های ناشی از زلزله یا مدل کمل[۱]) برای پیش‌بینی این نوع از زمین‌لغزش‌ها و ارزیابی آن با روش مهدویفر بررسی شده است. بدین منظور محدودهٔ تحت تأثیر زلزلهٔ سرعین (سال ۱۳۷۵) برای منطقهٔ الگو انتخاب شده است. در این روش که محاسبه با واژه‌ها[۲] نامیده می‌شود، سیستم‌های منطق فازی به‌کار گرفته شده است. محاسبه با واژه‌ها روشی برای پیشرفت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کند که در واقع روشی حدفاصل برای تبدیل و استفاده از زبان گفتاری انسان به‌جای اعداد در محاسبات و استدلال است. ابتدا اطلاعات لازم شامل فاصلهٔ به‌هم ریختگی، ردهٔ زمین، رطوبت، شدت زلزله، زاویهٔ شیب، ارتفاع دامنه، عمق خاک، ناهمواری دامنه و پوشش گیاهی با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای[۳]، سنجش از دور (RS)، نقشه‌های موجود و بازدیدهای محلی از منطقهٔ بررسی شده، جمع‌آوری شده است. این داده‌ها با استفاده از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی، رقومی و وزن‌دهی شده‌اند و با استفاده از برنامهٔ کمل، میزان خطر و تراکم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله محاسبه شده است و سپس مقایسهٔ زمین‌لغزش‌های پیش‌بینی شده با استفاده از روش مذکور و زمین‌لغزش‌های رخ‌داده ناشی از زلزلهٔ سرعین انجام گرفته است. در نهایت برای ارزیابی روش مذکور در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، مقایسه تجربی کمل با روش مهدویفر انجام شده است.

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

*نویسنده مسئول Fatemi@tmu.ac.ir

۱. CAMEL: A Comprehensive Areal Model of Earthquake induced Landslides
۲. Computing with words ۳. Landsat

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت و توسعهٔ مناطق مسکونی در مناطق پرخطر باعث افزایش خسارات ناشی از بلایای طبیعی در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه شده است. بیش‌ترین خسارت‌ها و بخش چشم‌گیری از تلفات ناشی از این بلایا در حین یا بعد از زلزله‌ها و باران‌های شدید و وقوع زمین‌لغزش‌ها اتفاق می‌افتد. زمین‌لغزش در حقیقت حرکت رو به پایین توده‌ای از خاک یا سنگ در اثر نیروی ثقل در دامنه‌ها است و 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، خسارهای ناشی از زمین‌لغزش‌ها برابر یا حتی بیش از خسارهای مستقیم ناشی از زلزله 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 به‌وسیلهٔ زمین لغزش‌ها در زمان زلزله می‌تواند موجب قطع عملیات امدادرسانی به زلزله‌زدگان شده و مقدار خسارات را افزایش می‌دهد.

در ارتباط با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در خارج از کشور پژوهش‌های متعددی انجام شده، ولی در داخل کشور پژوهش‌های محدودی صورت گرفته است. از جمله مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در خارج از کشور می‌توان به پژوهش‌های کیفر[۱] (۱۹۸٤) [۳]، کیفر(۲۰۰۰) [٤]، جیبسون[۲] (۱۹۹۳) [۵]، جیبسون و دیگران (۱۹۹۸) [٦]، جیبسون (۲۰۰۷) [۷]، دل‌گادیو[۳] و واسووسکی[٤] (۲۰۰۳) [۸]، پاردهان[۵] و لی[٦] (۲۰۰۹) [۹] و در داخل کشور به بررسی‌های مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] و رجبی (۱۳۸۹) [۱۰] اشاره کرد.

کشور ایران نیز با توجه به قرارگرفتن 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 از اهمیت زیادی برخوردار است.

۱. Keefer ۲. Jibson ۳. Del Gaudio ٤. Wasowski
۵. Pradhan ٦. Lee

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

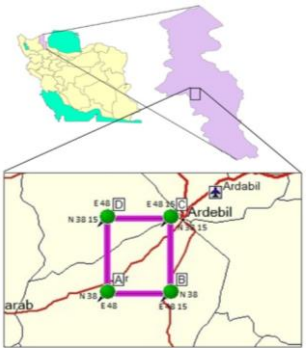
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

در این مقاله سعی بر آن است، تا روش‌های کیفی (کمل) [۱۱]، [۱۲]، و کمّی (مهدویفر، ۱۳۸۵) [۱] این پدیده، با استفاده از زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله سال ۱۳۷۵ سرعین ارزیابی شده و منطقه بررسی شده پهنه‌بندی شود.

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ پژوهش

منطقه‌ای که در اثر زمین‌لرزه ویران‌گر ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ سرعین [۱۳] آسیب دید، شامل روستاهایی است که در جنوب باختری شهرستان اردبیل (روستاهای گلستان، جوراب، تجرق، شیران، علی داشین، بیله درق، آتشگاه، ارجستان، بنمار، سئین، کنزق، ایردی موسی، کلخوران وبند، ورنیاب، شایق، اوجور، اسمرز، کردده) قرار دارند. در ضمن محدودهٔ پژوهش بین طول-های جغرافیایی۴۸ تا ´۱۵ °۴۸ و عرض‌های جغرافیایی °۳۸ تا ´۱۵ °۳۸ قرار دارد (شکل۱).



شکل۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ پژوهش

۲. مشخصات زلزله روی‌داده در محدودهٔ پژوهش

در تاریخ ۱۰ اسفند سال ۱۳۷۵ [۱۳] زمین لرزه‌ای به بزرگی $M_w = 6.1$ و عمق‌کانونی ۹ کیلومتر در استان اردبیل در شمال باختر ایران روی داد و ۹٦۵ کشته و بیش از ۲۰۰۰ نفر مجروح برجای گذاشت. بررسی‌های انجام شده در محدودهٔ کلان لرزه‌ای نشان می‌دهد که گسترهٔ بیش‌ترین شدت زمین‌لرزه در سوی جنوب خاور کوه آتشفشان سبلان قرار داشته و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

بیش‌ترین آسیب‌ها به ۳ روستای جوراب، گلستان و شیران وارد شده است. رو مرکز زمین لرزه بر پایه داده‌های ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در نقطه‌ای به عرض شمالی۳۸/۰۷ و طول خاوری ٤۸/۰٦ در نزدیکی روستای جوراب است که با داده‌های کلان لرزه‌ای کاملاً سازگار است. شدت زمین لرزه در روستای جوراب و گلستان VIII (در مقیاسMMI)، در اسلام‌آباد$^{+}$VII و در شهر سرعین $^{+}$VI برآورد شده است [۱۳].

۳. وضعیت زمین‌ساخت منطقهٔ پژوهش

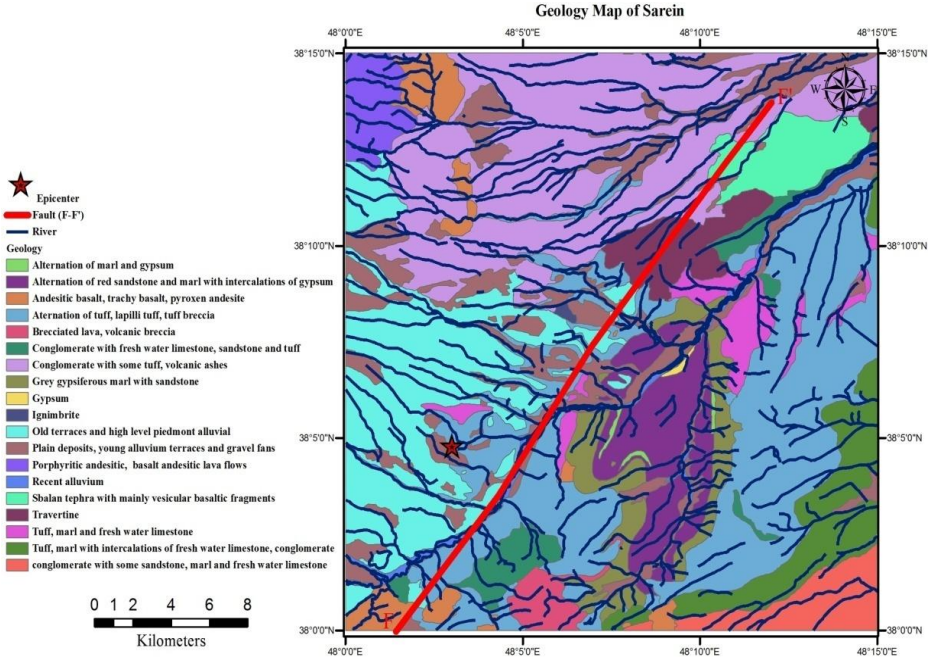
منطقهٔ آذربایجان از دیدگاه تکتونیکی جزو مناطق فعال محسوب می‌شود. فعالیت عمدهٔ این منطقه در نتیجهٔ حرکت بلوک عربستان است که در سال ۳ سانتی‌متر در راستای شمالی، گوشهٔ شمال‌غربی ایران، کوه‌های قفقاز و شرق ترکیه را متأثر می‌کند [۱٤]. منطقهٔ زلزله‌زده سرعین با گسل‌های فعالی چون بزقوش با روند شرقی- غربی(جنوب اردبیل) و گسل نور با روند شمال شرقی- جنوب غربی(شرق اردبیل) احاطه شده است. در ضمن تنها گسل موجود در محدودهٔ پژوهش، گسل فرعی بالیخلوچای است که در امتداد رودخانهٔ 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 بر اساس تحقیقات و مشاهدات انجام شده، دارای روند شمال شرقی هستند که منجر به رخداد پدیدهٔ زمین‌لغزش در امتداد گسل‌ها شده‌اند [۱۵].

٤. زمین‌شناسی منطقه

ناحیه بررسی شده در دامنه‌های جنوب شرقی رشته کوه سبلان قرار دارد. کوه سبلان تودهٔ صلب و حجیمی را تشکیل می‌دهد که سنگ‌های آذرین دورهٔ 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 [۱٤]. نقشهٔ واحدهای سنگی محدودهٔ پژوهش در شکل **۲** نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



شکل۲. نقشهٔ واحدهای سنگی محدودهٔ پژوهش [۱٤].

۵. زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در محدودهٔ پژوهش

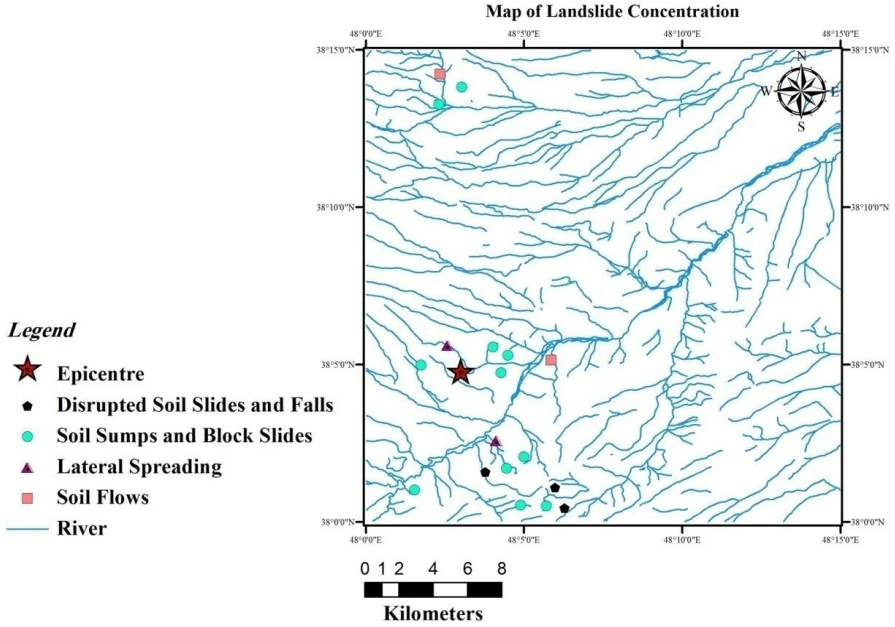
مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد شیب، ضخامت و نوع رسوبات تأثیر چشم‌گیری بر شدت تخریب داشته است. شیب کلی منطقه بین ۲ تا ۲۵ درجه متغیر است و اکثر نقاط صرف‌نظر از ناهمواری‌های موضعی، شیب کم‌تر از ۵ درجه دارند. بدین سبب پدیده زمین‌لغزش و ریزش سنگ در خلال زمین لرزه گسترش مهمی نداشته است (شکل**۳**). حرکت توده‌های زمین به‌دلیل تغییرات موضعی شیب و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در روستای شیران به‌صورت گل روان[۱] و با طول نزدیک ۱۳۰ متر به وقوع پیوسته است [۱۳].

هم‌چنین در ۱.۵ کیلومتری شمال روستای آتشگاه (شکل٤) و یک کیلومتری شرق روستای جوراب، لغزش‌های بلوکی- خاکی[۱] به‌ترتیب به وسعت۳۰۰۰ و ۲۵۰۰ مترمربع انجام شده است. در روستای جوراب زمین‌لغزش‌های قدیمی و لغزش‌های سطحی نیز مشاهده گردیده است. مشاهدات صحرایی نشان‌دهندهٔ این است که محدودهٔ شرق این روستا بسیار مستعد لغزش

۱. Mud flow

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

است. در بخش جنوبی روستای ورنیاب، و در دیوارهٔ جنوبی دره، لغزشی به‌وسعت ۳۰۰۰ متر مربع رخ‌داده است. در روستای ایردی موسی مسیر رودخانه در اثر رانش زمین موقتاً سد شده بود که پس از فرسایش مواد رانش یافته، رودخانه به مسیر اولیهٔ خود بازگشته است، ولی تا حدودی تغییر مسیر داده است (شکل۵) [۱۳].



شکل۳. نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزلهٔ ۱۳۷۵ سرعین در محدودهٔ پژوهش



شکل٤. لغزش بلوکی- خاکی، شمال روستای آتشگاه (دید عکس به‌سمت شمال) [١٦]

۱. Earth block-slide

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



شکل۵. تغییر مسیر رودخانه در اثر زلزله، روستای ایردی موسی(دید عکس به‌سمت شمال) [۱٦].

لایه‌های اطلاعاتی به‌کارگرفته شده برای منطقهٔ بررسی شده براساس روش کمل

روش به‌کار گرفته شده برای کمل، روش محاسبهٔ با واژه‌ها[۱] است، که از سیستم‌های منطق فازی استفاده شده است [۱۱]، [۱۷]. پروفسور لطفی‌زاده [۱۸] اولین بار محاسبه با واژه‌ها را مطرح کرده است. محاسبه با واژه‌ها به حجم وسیعی از روش‌ها و چارچوب‌ها برای بیان زبان انسانی و طبیعی اشاره می‌کند که به‌صورت عددی به‌منظور تعیین عدم قطعیت و گسترش آن با استفاده از تعدادی محاسبات ریاضیات منطقی است [۱٦]. پایه و اساس روش محاسبه با واژه‌ها بر اساس مفهوم مجموعه‌های فازی است [۱۹].

سیستم‌های فازی مجموعه‌ای از بلوک‌های اگر-آنگاه[۲] وابسته به یک‌دیگر هستند که متغیرهای ورودی را به متغیرهای خروجی مشخص مرتبط می‌کنند. مجموعه‌های فازی را می‌توان برای بیان مقدار تعلق داشتن یک عدد به یک مجموعه خاص در نظر گرفت، به‌گونه‌ای که رقم صفر معرف عدم تعلق و رقم یک معرف تعلق کامل یک عدد به مجموعه‌ای خاص است [۲۰]. این روش که به‌عنوان زیر مجموعه‌ای از منطق فازی است، در واقع روشی حدفاصل برای تبدیل و استفاده از زبان گفتاری انسان به جای اعداد در محاسبات و استدلال است. این روش به‌صورت رسیدن از مجموعه داده‌های اولیه[۳] به‌شکل عبارات زبانی به مجموعه

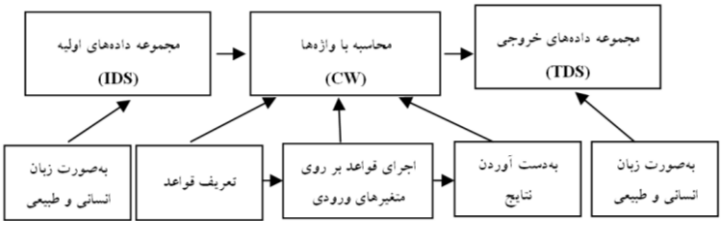
۱. Computing with words(CW) ۲. IF-THEN ۳. Initial Data Set(IDS)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

مجموعه داده‌های خروجی[۱] باز هم به شکل عبارات زبانی است که مراحل میانی تبدیلات در این فرآیند دارای اهمیت است. در این دو مورد استفاده از روش محاسبه با واژه‌ها بسیار مناسب است:

- اطلاعات با دقت کم (کمبود اطلاعات)
- پذیرش کاهش دقت به‌منظور راحتی بیش‌تر، هزینه کم‌تر تحلیل و گاهی تطابق بهتر نتایج با واقعیت

در شکل٦ الگوریتم نحوهٔ عمل روش محاسبه با واژه‌ها آورده شده است [۲۱].



شکل٦. الگوریتم نحوهٔ عمل روش محاسبه با واژه‌ها [۲۱]

چنان‌که در این الگوریتم مشاهده می‌شود، مجموعهٔ داده‌های ورودی که ارائه‌ای فازی از مجموعهٔ متغیرهای معرفی شده به‌صورت زبان انسانی و طبیعی است، به‌عنوان ورودی در روش محاسبه با واژه‌ها استفاده شده است. سپس با استفاده از روش محاسبه با واژه‌ها تحلیل روی عبارات انجام شده که مراحل این تحلیل عبارت است از: تعریف قواعد[۲]، اجرای قواعد بر روی متغیرهای ورودی[۳] و به‌دست آوردن نتایج[٤] است. در نهایت نتیجه مجدداً به‌صورت زبان انسانی و طبیعی در مجموعه داده‌های خروجی ارائه شده است. محاسبه با واژه‌ها [۲۱] روشی برای پیشرفت مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کند. برای به‌کارگیری این روش لایه‌های اطلاعاتی لازم عبارتند از:

۱. **ناهمواری دامنه:** دانش کمّی در مورد ناهمواری دامنه و خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله نسبتاً نادر است. پژوهش‌های لیاؤ[۵] و دیگران (۲۰۰۲)[۲۲] نشان داده است، متغیری که آن‌ها به‌عنوان "ناهمواری دامنه" معرفی کرده‌اند، ارتباط بسیار مؤثر با وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزلهٔ چی‌چی تایوان در سال ۱۹۹۹ داشته است. این لایهٔ

۱.Terminal Data Set (TDS) ۲. Constraint explicitation
۳. Constraint propagation ٤. Constraint retranslation ٥. Liao et al.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

اطلاعاتی برای منطقهٔ بررسی شده در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (Arc GIS) (آرک جی ای اس) با استفاده از دستور "کرویچر[۱]" از روی مدل رقومی ارتفاعی[۲](DEM) تهیه شده است (شکل**۷a**).

۲. **شدت زلزله:** پارامتر شدت زلزله، معرف حدآستانه‌ای شدت زلزله مورد نیاز برای وقوع هر نوع از زمین‌لغزش است. براساس مایلز و کیفر(۲۰۰۷) [۱۱] پارامتر 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 حدآستانه‌ای شدت زلزله لازم برای رخداد دستهٔ اول زمین لغزش‌ها، به‌جز بهمن‌های سنگی است. مقدار متوسط(بزرگ‌تر از VIII) معرف حدآستانه‌ای شدت زلزله لازم برای رخداد دستهٔ دوم (لغزش‌های چسبنده) و دستهٔ سوم زمین‌لغزش‌ها (جریان‌های‌سریع‌خاکی) است. بالاترین مقدار(بزرگ‌تر از IX) معرف حدآستانه‌ای شدت زلزله لازم برای رخداد بهمن‌های سنگی است. این مقادیر در نمودار جریانی بخش امکان کمل (شکل۱۰) با اصطلاحات توصیفی"خیلی قوی[۳]"(بزرگ‌تر از VII)، "سخت[۴]" (بزرگ‌تر از VIII)، "شدید[۵]" (بزرگ‌تر از IX) ارائه شده‌اند. برای تهیهٔ لایهٔ اطلاعاتی شدت زلزله ابتدا با استفاده از مختصات رو مرکز، بزرگای گشتاوری (M_W) و عمق کانونی زلزله و رابطهٔ ۱ [۲۳] نقشه هم‌شدت آریاس[۶] محاسبه و سپس با استفاده از رابطهٔ ۲ [۲٤] نقشه شدت زلزله بر اساس مقیاس شدت مرکالی اصلاح شده (MMI) محاسبه شده است (شکل**۷b**).

$$\log Ia = -3.880 + 0.810M - \log R - 0.002R \qquad (۱)$$

که در این رابطه I_a شدت آریاس برحسب متر برمجذور ثانیه (m/s^2)، M بزرگای گشتاوری، R فاصلهٔ کانونی برحسب کیلومتر که از رابطهٔ $R=\sqrt{r^2+h^2}$ (r فاصلهٔ مابین هریک از پیکسل‌های منطقه از رو مرکز بر حسب کیلومتر و h عمق زلزله برحسب کیلومتر است) حاصل می‌شود.

$$Log(I_a)= 0.527\ I_{MMI} - 3.816 \qquad (۲)$$

۱. Curvature ۲. Digital Elevation Model ۳. Very strong
۴. Severe ۵. Violent ۶. Arias Intensity

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

که در این رابطه I_a شدت‌آریاس برحسب متر برمجذور ثانیه (m/s^2) و I_{MMI} شدت مرکالی اصلاح شده است.

۳. **عمق‌سطح‌لغزش‌خاکی**: عمق‌سطح‌لغزش‌خاکی‌برپایه اطلاعات برگرفته از کیفر (۱۹۸٤) و بومر[۱] و ردروگوئز[۲] (۲۰۰۰) [۲۵] تعریف شده است. برای لایهٔ داده مکانی عمق سطح لغزش‌خاکی، یک لایهٔ اطلاعاتی یک‌نواخت با مقدار ثابت ۳.۳۳ متر تهیه شده است، زیرا این مقدار، متداول‌ترین عمق گسیختگی برای زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است [۳]. 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].

٤. **ارتفاع دامنه**: کیفر (۱۹۸٤) 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 لایهٔ 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 (شکل ۷c).

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 [۱٤] استفاده شده است. بدین‌صورت که بعد از رقومی‌سازی نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه، اقدام به تفکیک مصالح خاک و سنگ از یک‌دیگر شده است (شکل ۸a).

٦. **رطوبت**: رطوبت نشان‌دهندهٔ اطلاعات موجود در مورد انواع مختلف زمین‌لغزش‌ها با توجه به محتوای رطوبتی خاک یا عمق سطح ایستابی است. این متغیر نشان می‌دهد که لایهٔ مورد تجزیه و تحلیل نسبت به عمق لایه تا چه درصدی اشباع شده است. با توجه به‌این‌که رطوبت خاک تابع دوره‌های بارندگی است. اطلاعات استفاده شده در این تحقیق مربوط به ماه فوریه است. لایهٔ داده مکانی معرف میزان رطوبت در منطقه برحسب

۱. Bommer ۲. Rodriguez

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

درصد، با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده رطوبت[۱] تهیه شده است. این شاخص [۳۰] برای محدودهٔ پژوهش با استفاده از باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک[۲]) و باند ۵ (باند مادون قرمز میانی[۳]) و رابطهٔ ۳ در محیط نرم‌افزار ژئومتیکا[٤] PCI تهیه شده است (شکل ۸b).

$$NDMI = \frac{NIR(4) - SWIR(5)}{NIR(4) + SWIR(5)} \quad (۳)$$

۷. **زاویهٔ شیب**: اطلاعات مربوط به حداقل زاویهٔ شیب لازم برای وقوع هر نوع زمین‌لغزش با متغیر زاویهٔ شیب، بیان می‌شود. لایهٔ داده مکانی معرف زاویهٔ شیب از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در محیط نرم‌افزار آرک جی ای اس[۵] به‌دست می‌آید (شکل ۸c).

۸. **ردهٔ مقاومتی زمین (ردهٔ زمین)**: لایهٔ اطلاعاتی ردهٔ مقاومتی زمین بر اساس توضیحات و اطلاعات مبتنی بر کیفر (۲۰۰۰) [٤] در مورد مشخصات کیفی مواد تشکیل‌دهنده شیب یا سنگ‌شناسی با خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله تعریف شده است. برای تهیهٔ این لایه از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ اردبیل [۱٤] استفاده شده است. بدین‌صورت که بعد از رقومی‌سازی نقشهٔ زمین‌شناسی، بر اساس مایلز و کیفر (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) [۱۱]، [۱۲] از تراکم‌های زمین‌لغزشی رخ‌داده در هر واحد زمین‌شناسی استفاده شد، با این تفاوت که مایلز و کیفر (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) [۱۱]، [۱۲] از تراکم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله استفاده کرده‌اند. ولی در این تحقیق به‌علت تعداد کم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله رخ‌داده در محدودهٔ پژوهش و با استناد به این مطلب که رویداد زمین‌لغزش در یک منطقه معرف مستعد بودن محدودهٔ پژوهش برای زمین‌لغزش است، از همهٔ زمین لغزش‌ها استفاده شده است (شکل ۹a).

۹. **فاصله از رودخانه و جاده**: از نظر مفهومی، لایهٔ اطلاعاتی فاصله از رودخانه و جاده موجب سهولت ارائهٔ عوامل مورفولوژیکی مؤثر در گسیختگی دامنه (مانند فرسایش پنجهٔ دامنه با جریان آب، یا شیب بیش از حد دامنهٔ ناشی از قطع‌شدگی به‌وسیله جاده) می‌شود [۳۱]. این لایه به‌طور مشخص، فاصلهٔ دامنه از رودخانه و جاده برحسب متر است.

۱. Normalized Difference Moisture Index ۲. Near-infrared
۳. Short wave length infrared ٤. Geomatica ۵. Arc GIS

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

در این تحقیق برای تعیین کردن فاصله از رودخانه و جاده، گراف‌های خطی رقومی برگرفته از سازمان نقشه‌برداری در مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ که معرف جاده‌ها و رودخانه‌های اصلی در محدودهٔ پژوهش است، در محیط نرم‌افزار آرک جی ای اس به حالت رستر[۱] تبدیل شده‌است. عمل‌گر "فاصله خطی[۲]" به‌منظور تعیین فاصلهٔ افقی بین هر واحد و نزدیک‌ترین عارضهٔ خطی(رودخانه و جاده) اجرا شده است (شکل 9b).

۱۰. **پوشش گیاهی**: اطلاعات ناچیزی در مورد تأثیر پوشش گیاهی بر انواع مختلف زمین‌لغزش ناشی از زلزله در ادبیات فنی به‌جز نمودار درختی تصمیم‌گیری کیفر (۱۹۹۳) [۳۲] برای ارزیابی حساسیت ریزش‌ها و لغزش‌های سنگی وجود دارد. از نظر مفهومی، این لایه داده مکانی اشاره به تراکم پوشش گیاهی یک منطقه، که به‌صورت درصدی از منطقه بیان می‌شود، دارد [۱۱]. لایه دادهٔ مکانی معرف مقدار پوشش گیاهی در منطقه برحسب درصد، با استفاده از شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش‌گیاهی[۳] تهیه شده است. این شاخص برای محدوده مطالعاتی با استفاده از باند ۳ (باند قرمز[۴]) و باند ٤ (باند مادون قرمز نزدیک) و رابطهٔ ٤ در محیط نرم‌افزار ژئومتیکا PCI تهیه شده است [۳۳] (شکل 9c).

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

بعد از تهیهٔ این لایه‌های اطلاعاتی در محیط آرک جی ای اس و ژئومتیکا PCI به‌صورت رقومی، برای پهنه‌بندی و محاسبهٔ میزان خطر و تراکم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، از نرم افزار کمل [۱۱]، [۱۲] استفاده می‌شود.

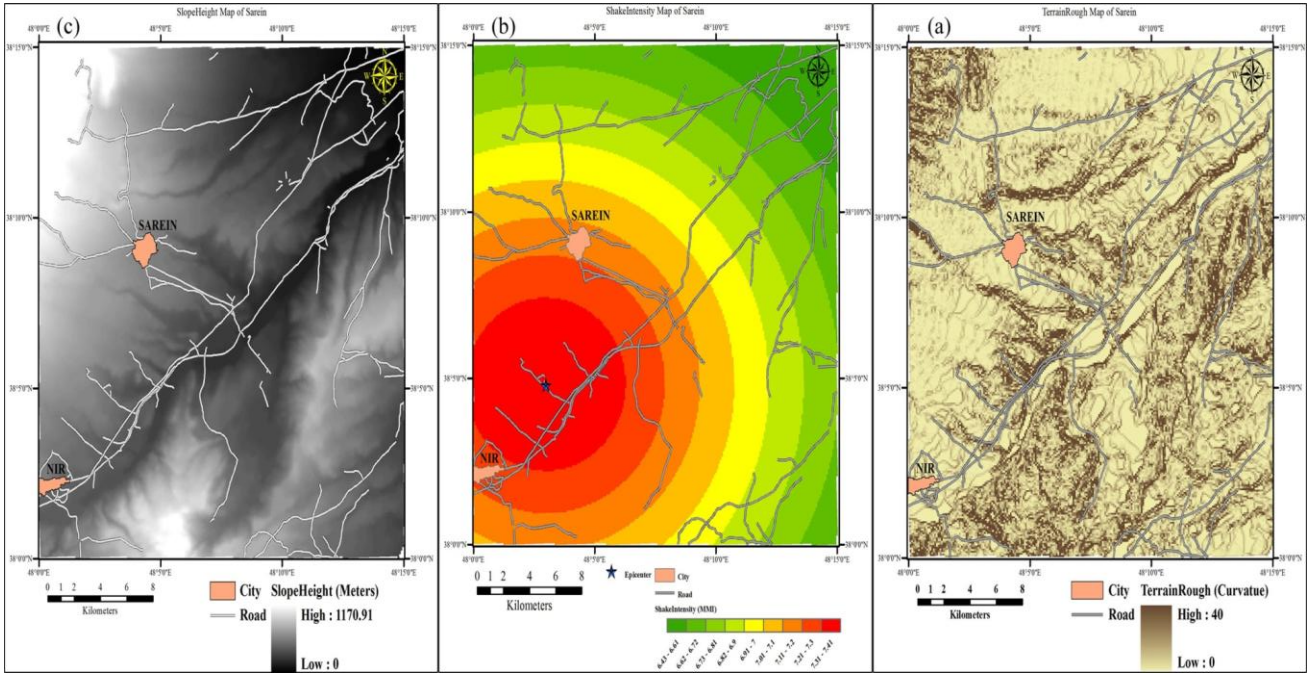
پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزلهٔ ۱۳۷۵سرعین با استفاده از روش کمل در محدودهٔ پژوهش

واژهٔ پهنه‌بندی زونیشن[۵] به مفهوم تقسیم‌بندی سطح زمین به بخش‌های مختلف و رده‌بندی این بخش‌ها بر اساس درجهٔ حساسیت به زمین‌لغزش به‌کار می‌رود. به‌منظور پیش‌گیری از خطرهای ناشی از زمین‌لغزش و پهنه‌بندی مقدار خطر جنبش‌های دامنه‌ای در سطح کشور، لازم است بررسی‌های فراوانی انجام شود [۳٤].

۱. RASTER ۲. Euclidean distance
۳. Normalized Difference Vegetation Index ۴. Red light ۵. Zonation

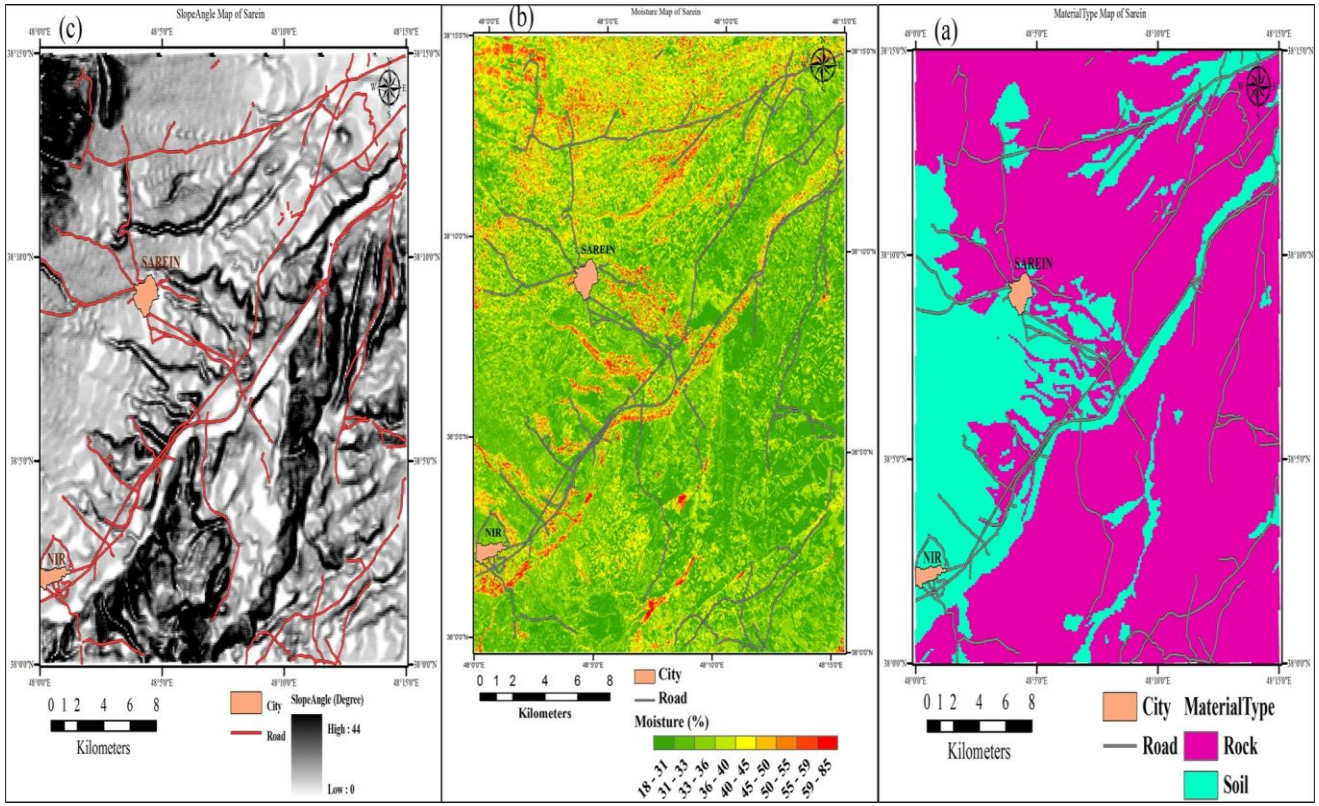
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



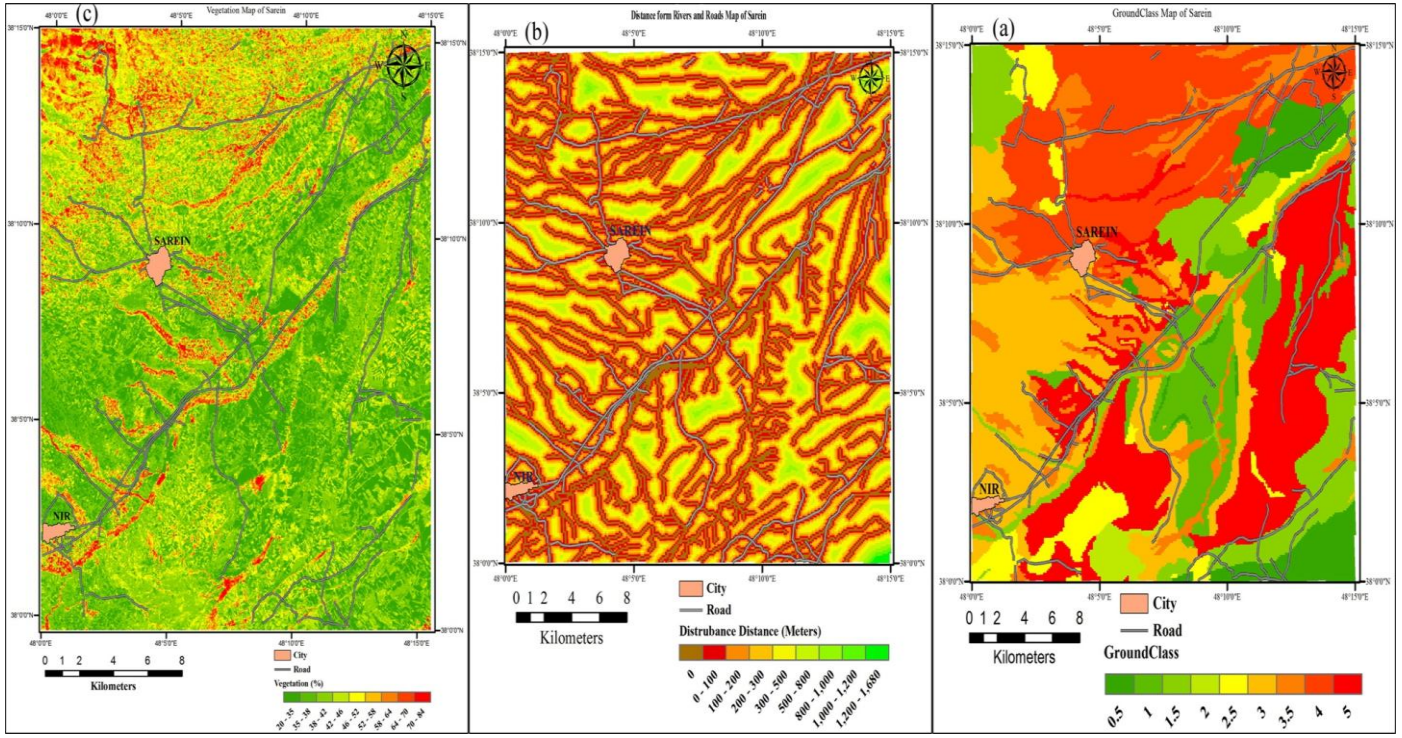
شکل۷. نقشه‌های معرف لایه دادهٔ ورودی محاسبه شده مربوط به منطقهٔ سرعین برای کاربرد در کمل (a) ناهمواری دامنه(نقاط تیره‌تر معرف تغییرات شیب تندتر)، (b) شدت زلزله مربوط به زلزله ۱۳۷۵ سرعین با بزرگای ۶.۱ (Mw=6.1) (نقاط تیره‌تر معرف شدت زلزله بیش‌تر) و (c) ارتفاع دامنه(نقاط تیره‌تر معرف ارتفاع بیش‌تر دامنه).

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل۸ . نقشه‌های معرف لایه داده ورودی محاسبه شده مربوط به منطقهٔ سرعین برای کاربرد در کمل (a) نوع مصالح (نقاط تیره معرف مصالح سنگی و نقاط روشن معرف مصالح خاکی)، (b) رطوبت (نقاط تیره‌تر معرف رطوبت بیش‌تر) و (c) زاویه شیب(نقاط تیره‌تر معرف شیب‌های تندتر).

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل۹. نقشه‌های معرف لایه دادهٔ ورودی محاسبه شده مربوط به منطقهٔ سرعین برای کاربرد در کمل (a) دسته‌های رده زمین، معرف مقاومت نسبی، برای واحدهای زمین‌شناسی بر اساس کیفر(۲۰۰۰) (نقاط تیره‌تر معرف مقاومت نسبی کمتر)، (b) فاصله از فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها (نواحی تیره‌تر نشان‌دهندهٔ نواحی مجاور نزدیک‌تر) و (c) پوشش گیاهی(نقاط تیره‌تر معرف تراکم بیش‌تر پوشش گیاهی).

در این مقاله برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله از روش کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] استفاده شده است. کمل چارچوب جامعی را برای مدل‌سازی همهٔ انواع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از سیستم‌های منطق فازی و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی فراهم می‌کند. در حال حاضر، کمل خطر مرتبط با مجموع ٦ نوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله را که در جدول ۱ ذکر شده است، مدل‌سازی می‌کند.

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

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

مدل پیشنهادی مایلز و کیفر(۲۰۰۷، ۲۰۰۹) از دو بخش اصلی تشکیل شده است: الف) بخش امکان (پتانسیل) و ب) بخش خطر. هر کدام از این دو بخش از چندین بلوک قانون فازی اگر-آنگاه تشکیل شده‌اند. بخش اول امکان وقوع هر یک از انواع زمین لغزش‌ها را تعیین می‌کند؛ در نتیجه خروجی این بخش فقط دو حالت وجود امکان یا عدم امکان است. برای هر شیب که امکان وقوع وجود نداشته باشد، آنالیز متوقف شده و داده‌های مربوط برای محاسبه مقدار خطر به بخش بعد منتقل نمی‌شود. در بخش خطر، برای واحدهایی که امکان وقوع دارند، تراکم ممکن هر یک از انواع زمین لغزش‌ها در هر کیلومترمربع پیش‌بینی می‌شود. تمامی مراحل این مدل چه در بخش امکان و چه در بخش خطر با کمک مجموعه‌های فازی انجام می‌گردد. در بخش امکان هفت لایه اطلاعاتی شامل ناهمواری، شدت زلزله، عمق خاک، ارتفاع شیب، جنس مصالح، رطوبت، و مقدار شیب به‌عنوان لایه‌های ورودی به‌کار می‌روند (شکل ۱۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



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

در مرحلهٔ ارزیابی خطر نیز ۷ لایه وارد می‌گردد. لایهٔ اول لایهٔ امکان وقوع است که طبیعتاً دارای دو کد است. 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) مقدار شیب، ۳) رطوبت، ٤) فاصله از به‌هم‌ریختگی، ۵) پوشش گیاهی، و ٦) شدت زلزله. در این مرحله هر یک از انواع زمین‌لغزش به‌طور جداگانه در دو زیربخش، حساسیت استاتیکی و خطر لرزه‌ای بررسی می‌شود (شکل **۱۱**). زیربخش حساسیت استاتیکی، مستقل از تأثیر زلزله در نظر گرفته می‌شود. این زیربخش خود از دو بخش تشکیل می‌گردد: زیربخش اول شامل متغیرهایی است که دارای نقش اساسی در حساسیت استاتیکی هستند. دو عامل مقاومت زمین (جنس زمین) و مقدار شیب همواره در این زیربخش قرار می‌گیرند. برای برخی از انواع زمین‌لغزش(لغزش‌های چرخشی سنگی، بلوکی سنگی، چرخشی خاکی و بلوکی خاکی) رطوبت نیز در این زیر بخش قرار می‌گیرد. اگر امکان وقوع نوعی از زمین‌لغزش (به‌عنوان مثال بهمن سنگی) طبق لایهٔ امکان وجود داشته باشد دو لایه (جنس زمین و مقدار شیب) یا هر سه لایهٔ مذکور بر حسب نوع زمین‌لغزش برای ارزیابی حساسیت استاتیکی ارزیابی می‌شود. 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

حساسیت، وارد تحلیل می‌گردند. این متغیرها از این‌رو متغیرهای اصلاح کننده نامیده شده‌اند که نقشی افزایش‌دهنده یا کاهش‌دهنده داشته و در صورت برقراری شرط لازم، حساسیت را یک درجه بالا یا پایین می‌برند (مثلاً از خطر پایین به متوسط). دو لایه فاصله از به‌هم‌ریختگی (با نقش افزایش‌دهنده) و پوشش گیاهی (با نقش کاهش‌دهنده) همواره در این بخش قرار می‌گیرند. برای برخی از انواع زمین‌لغزش‌ها نیز (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 می‌گردد. زیربخش خطر لرزه‌ای، اثر تکان‌های زلزله را روی حساسیت استاتیکی محاسبه شده به‌وسیلهٔ زیربخش قبلی در نظر می‌گیرد. به‌طور چشم‌گیری، محدودهٔ ممکن مقادیر تراکم که به‌وسیلهٔ بخش 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 (شکل**۱۲**). چنان‌که در شکل **۱۲** 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 (شکل**۱۱**). مطابق با شکل**۱۱**، نکتهٔ مهم آن است که محدودهٔ ممکن مقادیر تراکم (و در نتیجه معادل کمی خطر) برای هر نوع زمین‌لغزش متفاوت است.



شکل۱۱. نمودار جریانی داده‌ها برای بخش مقدار تراکم خطر کمل، معرف ورودی‌ها (اطلاعات تشدید کننده)، خروجی‌ها، و ترتیب قوائد [۱۱]، [۱۲]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



شکل۱۲. بلوک قوانین خطر لرزه‌ای برای بهمن‌های سنگی [۱۱]، [۱۲]

تجزیه و تحلیل نتایج پهنه‌بندی به‌روش کمل

کمل به‌منظور فراهم آوردن امکان تحلیل منطقه‌ای در نرم افزار آرک جی ای اس Arc GIS™ پیاده‌سازی شده است [۱۱]. زمانی که اطلاعات لازم برای هر یک از ورودی‌های کمل فراهم گردید، تابع‌های تعریف شده در GIS مقادیر هر یک از واحدهای سلولی به شکل رستری را محاسبه کرده و مقادیر همهٔ سلول های 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**۱۱**). بازه‌های تراکم مطابق با تعاریف "خیلی‌کم"، "کم"، "متوسط"، "زیاد"، "خیلی زیاد" تابع عضویت در کمل هستند (شکل**۱۳**). چنان‌که در شکل **۱۳** مشاهده می‌شود، تعداد بیش‌تر زمین‌لغزش‌های چرخشی خاکی بر روی نواحی با تراکم پیش‌بینی شده "متوسط"زمین‌لغزش منطبق شده‌اند، هم‌چنین کمل برای بخش‌هایی از محدودهٔ پژوهش تراکم "کم" زمین‌لغزش چرخشی و بلوکی خاکی پیش‌بینی کرده است، ولی در واقعیت هیچ نوع زمین‌لغزش چرخشی و بلوکی خاکی در این نواحی رخ نداده‌است. علت این پیش‌بینی نادرست می‌تواند این باشد که به‌علت در دسترس نبودن تصاویر ماهواره‌ای لاندست[۱] مربوط به زمان رخداد زلزله (سال ۱۳۷۵) ناچاراً از تصاویر لاندست سال ۱۳۷۸ استفاده شده است. زیرا زلزلهٔ ۱۳۷۵ سرعین منجر بـه تغییـر سطـح آب‌های

۱. Landsat

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

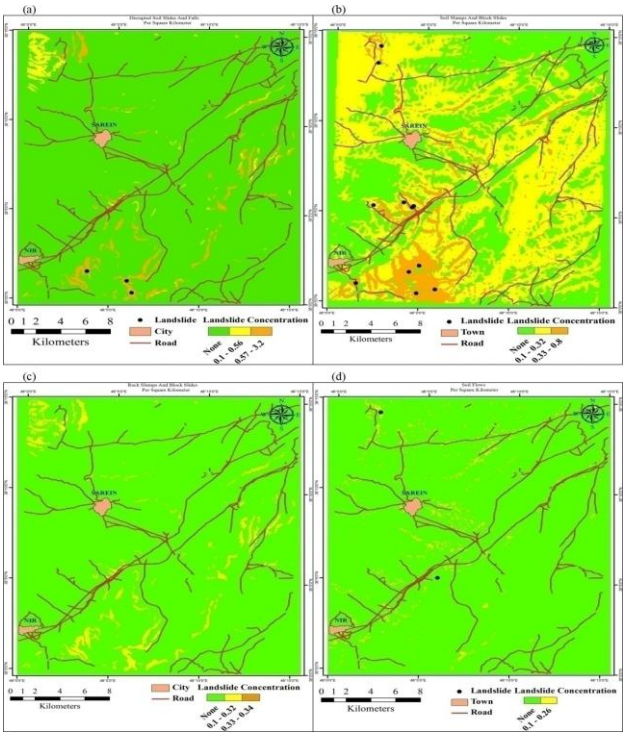
زیرزمینی و بالطبع مقدار رطوبت در محدودهٔ پژوهش شده است و با درنظر گرفتن این‌که متغیر رطوبت برای رخ‌داد لغزش‌های چرخشی و بلوکی خاکی جزء متغیرهای اصلی است. بنا بر این پیش‌بینی نادرست برای این نوع از زمین‌لغزش می‌تواند منطقی باشد. زلزلهٔ سرعین منجر به رخ‌داد هیچ نوع زمین‌لغزش سنگی نشده است [۱۳]، درحالی که کمل برای بخش‌های محدودی از ناحیهٔ بررسی شده امکان رخ‌داد لغزش‌های بلوکی و چرخشی سنگی پیش‌بینی کرده و برای این نوع زمین‌لغزش نقشهٔ تراکم خطر ارائه کرده است. به‌علاوه، نقشهٔ مربوط به تراکم زمین‌لغزش برای ریزش سنگی و بهمن سنگی ارائه نشده است. اصلی‌ترین پارامتر برای ممکن بودن رخ‌داد ریزش سنگی، زاویه شیب است و با توجه به این‌که حداقل حدآستانه‌ای (فازی) 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 و اکثر نقاط صرف‌نظر از ناهمواری‌های موضعی، شیب کم‌تر از ۵ درجه دارند، 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 بهمن‌سنگی، شدت زلزله است و حداکثر شدت لرزه‌ای دستگاهی در محدودهٔ بررسی شده VIII در مقیاس اصلاح شده مرکالی است. این مقدار کم‌تر از حداقل حدآستانه‌ای (فازی) لازم (MMI IX) برای رخ‌داد بهمن‌های سنگی در کمل است، بنا بر این امکان رخ‌داد بهمن‌سنگی نیز در محدودهٔ پژوهش وجود ندارد.

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵سرعین با استفاده از روش مهدویفر

مراحل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] شامل سه بخش اصلی است. بخش اول تشکیل بانک اطلاعاتی داده است. برای تشکیل بانک اطلاعاتی داده‌ها، ابتدا با روی هم‌اندازی نقشهٔ زاویهٔ شیب و جهت شیب نقشهٔ واحدهای شیبی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



شکل۱۳. 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 خاکی سریع با استفاده از کمل. دایره‌های توپر زمین‌لغزش‌های رخ‌داده ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین، اردبیل هستند.

تهیه شده است. این واحدها به‌معنای بخشی از دامنه‌ها است که از نظر شیب و جهت شیب در بازه معینی تغییر می‌کند [۱]. در مرحلهٔ بعد با روی هم‌اندازی نقشهٔ واحدهای شیبی با نقشهٔ زمین‌شناسی، جنس غالب هر واحد دامنه‌ای براساس نقشهٔ زمین‌شناسی و هم‌چنین حداکثر ضریب اصطکاک داخلی($\acute{\emptyset}$)، چسبندگی (c')و وزن حجمی مواد (γ) هر واحد براساس جنس زمین‌شناسی استخراج شده است. سپس دوباره نقشهٔ واحدهای شیبی با نقشهٔ رطوبت و زاویهٔ شیب روی هم‌اندازی شده است تا حداکثر مقدار رطوبت و حداکثر زاویهٔ شیب هر واحد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

دامنه‌ای استخراج شود [۱]. سپس ضریب پایداری استاتیکی (رابطهٔ ۵) [٦] و شتاب حدی هر واحد (رابطهٔ ٦) [۳٦] محاسبه شده است.

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin\alpha} + \frac{\tan\varphi'}{\tan\alpha} - \frac{m\gamma_w \tan\varphi'}{\gamma \tan\alpha} \qquad [٦] \ (۵)$$

که در آن Ǿ زاویهٔ اصطکاک مؤثر، Ć چسبندگی مؤثر، α زاویهٔ شیب، γ وزن حجمی مواد، γ_w وزن حجمی آب، t ضخامت عمود بر شیب ورقهٔ گسیخته شده و m نسبت ضخامت ورقهٔ که اشباع شده، هستند.

$$a_C = (F_S - 1) g \sin\alpha \qquad [۳٦] \ (٦)$$

که در آن a_c شتاب حدی، F_S ضریب پایداری استاتیکی، g شتاب ثقل زمین و α زاویهٔ شیب است.

بخش دوم اخذ اطلاعات زلزله است. این اطلاعات که شامل بزرگای گشتاوری (M_W)، طول و عرض جغرافیایی مرکز زلزله[۱] است، به‌صورت فایل متنی[۲] در اختیار سامانه قرار داده شده است [۱].

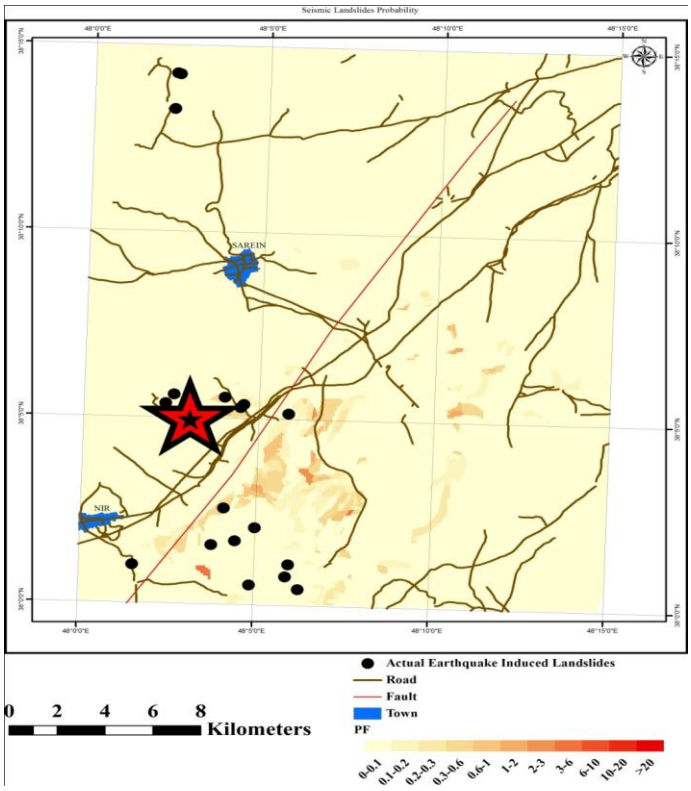
بخش سوم آنالیز داده‌هاست، که به‌وسیلهٔ سامانه انجام گرفته است. سامانه با توجه به مختصات رومرکز و مراکز پلیگون‌ها (اطلاعات دریافتی زلزله به‌صورت فایل متنی و بانک اطلاعاتی)، فاصلهٔ آن‌ها (R) را تا رومرکز محاسبه و اقدام به انتخاب پلیگون‌های اطراف رومرکز تا شعاع خاصی می‌کند (در این تحقیق برای محاسبهٔ فاصلهٔ تمام پلیگون‌ها از رومرکز زلزله، شعاع ۲۵ کیلومتر به‌عنوان شعاع مؤثر در نظر گرفته شده است) [۱]. در مرحلهٔ بعد، با استفاده از رابطهٔ ۷، شدت آریاس (I_a) برای هر پلیگون محاسبه و نقشهٔ هم‌شدت آریاس تهیه گردیده است.

سپس با استفاده از شدت آریاس و شتاب حدی و رابطهٔ ۸، جابه‌جایی نیومارک برای هر پلیگون محاسبه گردیده است [۱]. در نهایت با استفاده از رابطهٔ ۹، احتمال وقوع زمین‌لغزش برای هر پلیگون محاسبه و نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله برای محدودهٔ پژوهش براساس روش مهدویفر (۱۳۸۵) برحسب درصد تهیه شده است (شکل۱٤). نمودار سامانه تهیه شده به‌وسیلهٔ مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

۱. Coordinate ۲. Text file

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]



شکل ۱٤. نقشهٔ احتمال رخ‌داد زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱]. دایره‌های توپر زمین‌لغزش‌های واقعی ناشی از زلزله ۱۳۷۵سرعین، اردبیل هستند.

$$\log I_a = -3.880 + 0.810M - \log R - 0.002R \pm 0.460P \qquad [۱] \ (۷)$$

که در این رابطه I_a شدت آریاس برحسب متر بر مجذور ثانیه، M بزرگای گشتاوری، R فاصلهٔ کانونی برحسب کیلومتر، P انحراف معیار است.

$$\log D_N = 1.087 \log I_\alpha - 7.176 \log \alpha_c + 1.398 \pm 0.397 \qquad [۱] \ (۸)$$

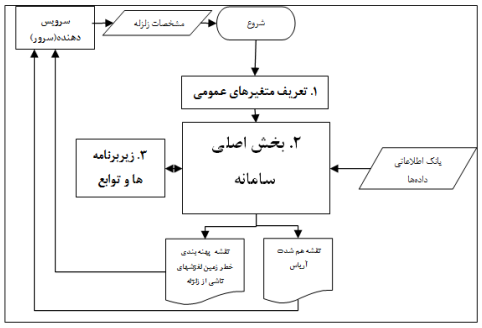
که در این رابطه D_N جابه‌جایی نیومارک[1] [۳٦] بر حسب سانتی‌متر، I_a شدت آریاس برحسب متر بر مجذور ثانیه و a_C شتاب حدی برحسب g (شتاب ثقل زمین) هستند.

$$P(f) = 0.274\left[1 - \exp\left(-0.052 D_N^{1.663}\right)\right] \qquad [۱] \ (۹)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

که در این رابطه P(f) نسبت سلول‌های لغزشی و D_N جابه‌جایی نیومارک برحسب سانتی‌متر هستند.



شکل۱۵. نمودار جریانی سامانهٔ تهیه شده به‌وسیلهٔ مهدویفر (۱۳۸۵) [۱]

مقایسهٔ روش کمل با روش مهدویفر (۱۳۸۵)

برای ارزیابی نقشهٔ پهنه‌بندی تهیه شده با روش کمل در منطقهٔ بررسی شده اقدام به انطباق نقشهٔ پهنه‌بندی با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منطقه شده است. در نقشه‌های تراکم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله پیش‌بینی با استفاده از روش کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] (شکل۱۳) مشاهده می‌شود. کمل برای ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته، لغزش‌های بلوکی و چرخشی خاکی، تراکم "کم" تا "متوسط" را پیش‌بینی کرده است و به‌طور جالب توجه، ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی گسسته، لغزش‌های بلوکی و چرخشی خاکی واقعی ناشی از زلزلهٔ ۱۳۷۵ سرعین عمدتاً بر روی نقاط با تراکم "متوسط" زمین‌لغزش منطبق شده‌اند. هم‌چنین کمل برای جریان‌های خاکی، فقط تراکم "کم" را پیش‌بینی کرده است و جریان‌های خاکی واقعی ناشی از زلزلهٔ ۱۳۷۵ سرعین بر روی همین نقاط با تراکم "کم" زمین‌لغزش منطبق شده‌اند. به عبارت دیگر می‌توان گفت ارزیابی صورت گرفته حاکی از انطباق کامل زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه سرعین با نقشه‌های تراکم خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله تهیه شده با روش کمل‌است.

در نقشهٔ احتمال رخداد زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزلهٔ ۱۳۷۵سرعین با استفاده از روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] (شکل۱٤) مشاهده می‌شود که به‌جز یک مورد همهٔ زمین‌لغزش‌های واقعی ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین عمدتاً بر روی نقاط با کم‌ترین احتمال رخداد زمین‌لغزش ناشی از

۱. Newmark Displacement

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

زلزله (۰.۱٪– ۰٪) منطبق شده‌اند و فقط یک نمونه زمین‌لغزش ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین بر روی نقاط با احتمال رخ‌داد ۰.۳٪ – ۰.۲٪ منطبق شده است. بنا بر این درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که عمل‌کرد کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین به مراتب بهتر از روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] 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 مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزارهای 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 محققان، زمینهٔ گسترش این علم را مانند علوم مشابه دیگر فراهم‌ساخته است.

از سال ۲۰۰۷ روش‌هایی نظیر روش کمل [۱۱] ارائه‌شد که با داده‌های موجود، بیش‌تر هم‌خوان است و عدم قطعیت‌ها را بهتر در نظر می‌گیرد [۱۱].

در این تحقیق با توجه به‌عدم رخ‌داد لغزش‌های چرخشی و بلوکی سنگی در محدودهٔ بررسی شده [۱۳] و نتایج حاصل از نرم‌افزار کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] که بیان‌گر رویداد زمین‌لغزش‌های مذکور است، می‌توان نتیجه گرفت که روش کمل در مورد زمین‌لغزش‌های خاکی عمل‌کرد بهتری نسبت به زمین‌لغزش‌های سنگی داشته است. به‌طور قابل بحث کمل بخش کوچکی از محدودهٔ بررسی شده را مستعد برای رخ‌داد لغزش‌های پیوسته سنگی پیش‌بینی کرده است، در صورتی این نوع از زمین‌لغزش در واقعیت رخ نداده است و تراکم ناحیه‌ای مربوطه را بیش از حد واقعی پیش‌بینی کرده است. چندین نقطه ضعف در روش کمل [۱۲] وجود دارد، این نقاط ضعف عبارتند از:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

- بهمن‌های خاکی و لغزش‌های خاکی گسسته با مقدار زاویهٔ شیب یک‌سانی مشخص نمی‌شوند.
- گسترش‌های جانبی خاک (نوعی زمین‌لغزش گروه III) به‌علت این‌که نوع متفاوتی از داده‌ها و اطلاعات برای تعیین آن مورد نیاز است، در ساختار روش کمل در نظر گرفته نشده است [۱۲].

لازم به توضیح است که در محدودهٔ بررسی شده دو نمونه زمین‌لغزش از نوع گسترش جانبی رخ داده است، ولی به‌علت این‌که کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] برای این نوع از زمین‌لغزش نقشهٔ تراکم ارائه نمی کند، امکان مقایسه وجود نداشته است.

هم‌چنین مقایسهٔ تجربی روش کمل با روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] مشخص کرده است که با استفاده از روش کمل زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین عمدتاً بر روی نقاط با تراکم پیش‌بینی شده "متوسط" منطبق شده‌اند ولی در روش مهدویفر (۱۳۸۵)[۱] به‌جز یک مورد همهٔ زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین عمدتاً بر روی نقاط با کم‌ترین احتمال رخ‌داد زمین‌لغزش ناشی از زلزله (۰.۱٪- ۰٪) منطبق شده‌اند.

دلیل دقت کم و ناکارآمدی روش مهدویفر (۱۳۸۵)[۱]، به احتمال زیاد مربوط به مقادیر پارامترهای مقاومتی ژئوتکنیکی(Ć و Ø) حاصل از معیار هوک و براون (۱۹۸۰) [۳۷] است. در این معیار مقادیر پارامترهای مقاومتی ژئوتکنیکی از طریق بررسی‌های صحرایی بدست می‌آید، بنا بر این دقت این روش تا حدودی اندک است و درعین حال همراه با عدم قطعیت فراوان است. هم‌چنین براساس جیبسون و دیگران (۱۹۹۸) [٦]، مبنای تعیین این پارامترها، قضاوت کارشناسی است. به‌طوری‌که روش‌های مبتنی بر قضاوت مهندسی کاملاً وابسته به تبحر فرد و نوع دید وی دارد.

بنا بر این در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که عمل‌کرد روش کمل [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۷۵ سرعین به‌مراتب بهتر از روش مهدویفر (۱۳۸۵) [۱] است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

منابع

۱. مهدویفر م. ر.، *ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور*، پایان‌نامهٔ دکتری، ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی، پژوهش‌گاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸٦).

2. Monday J. L., "Building back better: Creating a sustainable community after a disaster", Natural hazards informer, Natural Hazards Center (2002).
3. Keefer D. K.," Landslides caused by earthquakes", Bulletin of the Geological Society of America (1984).
4. Keefer D. K., "Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution -the 1989 Loma Prieta, California event", Engineering Geology (2000).
5. 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).
6. 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).
7. Jibson R. W., "Regression models for estimating coseismic landslide displacement", Engineering Geology (2007).
8. 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 ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

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

۱۰. 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).

11. Miles S. B., Keefer D. K., "Comprehensive areal model of earthquake-induced landslides: Technical specification and user guide", U.S. Geological Survey (2007).

12. Miles S. B., Keefer D. K., "Evaluation of CAMEL-comprehensive areal model of earthquake-induced landslides", Engineering Geology (2009[b]).

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

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

۱۵. پارسی‌زاده ف.، پویان ژ.، توکلی ب.، تیو م.، عباسی م. ر.، غفوری‌آشتیانی م.، فلاحی و.، کوهیان ر.، *زمین‌لرزه ۱۲/۱۰/ ۷۵ گلستان*، اردبیل. موسسهٔ‌بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷٦).

۱٦. 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).

17. Miles S. B., Keefer D. K., "Toward a Comprehensive Areal Model of Earthquake-Induced Landslides", Natural Hazards Center (2009[a]).

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 sets. Information and Control (1965).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

20. Berkan R., Trubatch S., "Fuzzy Systems Design Principles:Building Fuzzy IF-THEN Rule Bases", New York: IEEE Press (1997).
21. Zadeh L. A., "Fuzzy logic equals computing with words", IEEE Transactions on Fuzzy Systems (1996).
22. 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).
23. 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).
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.
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.
27. Wang, Y., Keefer, D. K., Wang Z., "Seismic hazard mapping in Eugene-Spring field, Oregon", Oregon Geology (1998).
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).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]

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. Cruden D., Varnes D., Landslide types and processes", in A. Turner and R. Schuster (Ed.), Landslides: Investigations and Mitigation (1996).

32. Keefer D. K., "The susceptibility of rock slopes to earthquake-induced failure", Association of Engineering Geologists Bulletin (1993).

33. Ryan Larry, "Creating a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) image Using Multi Spec", The GLOBE Program (1997).

۳٤. میرصانعی ر.، مهدویفر رضا، *تهیهٔ راهنمای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در ایران*. پژوهشکده سوانح طبیعی (۱۳۸۵).

35. Miles S. B.," Participatory model assessment of earthquake-induced landslide hazard models و"Natural Hazards Center (2010).

36. Newmark N. M., "Effect of Earthquakes on Dams and Embankments", Geotechnique (1965).

37. Hoek E., Brown E. T., "Empirical strength criterion for rock masses", Geotechnical. Engineering (1980).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.4.3]