



پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بر اساس فرایند سلسله مراتبی-فازی (FAHP) و تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (مطالعه موردی: حوزه رودخانه ماربر)

محمد رضا سجادی، احمد احمدی، بهناز بیگدلی

دریافت: ۱۴ دی ۱۳۹۸ / پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۱۱ آذر ۱۳۹۹

چکیده

مواد و روش‌ها در مرحله اول، اطلاعات مربوط به منطقه جمع‌آوری و لایه‌های اطلاعاتی در فضای سیستم اطلاعات جغرافیایی فراهم گردید. سپس با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیر فازی و با قضاوت کارشناسان، لایه‌ها و زیر لایه‌ها وزن‌دهی شدند. از دو روش همپوشانی وزن‌دار و همپوشانی فازی برای پهنه‌بندی نتایج تحلیل‌های سلسله مراتبی فازی و غیر فازی استفاده شد. ترکیب دو روش تحلیل سلسله مراتبی و دو روش همپوشانی باعث ایجاد چهار نقشه پهنه‌بندی برای منطقه مورد نظر شد. ابزار همپوشانی فازی امکان تجزیه و تحلیل احتمال وقوع پدیده متعلق به چندین مجموعه را در تحلیل همپوشانی چند معیاره فراهم می‌کند. نه تنها همپوشانی فازی اعضای تأثیرگذار در وقوع یک پدیده را تعیین می‌کند، بلکه روابط بین عضویت چند مجموعه را تجزیه و تحلیل می‌کند. همپوشانی وزنی نیز یکی از روش‌های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل‌های همپوشانی برای پاسخ به سؤالات چند معیاری مانند انتخاب محل و مدل مناسب است. که این روش مقادیر موجود در رسترهای ورودی را به یک مقیاس ارزیابی مشترک از نظر مناسب بودن یا اولویت، ریسک و یا مقیاس مناسب یکسان‌سازی می‌کند و مقادیر سلول هر یک از ردیف ورودی را با توجه به اهمیت رسترها افزایش

پیشینه و هدف زمین لغزش به عنوان یک حادثه مهیب می‌تواند موجب آسیب رساندن به انسان، از دست دادن زندگی، زیان اقتصادی و از بین بردن میراث فرهنگی و طبیعی شود. در حالی که نیاز به روشی برای پیش‌بینی مستقیم محل وقوع زمین لغزش احساس می‌شود و در حال حاضر امکان پیش‌بینی مستقیم وجود ندارد، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش می‌تواند روش غیرمستقیم مناسبی برای پاسخ به این نیاز باشد. هدف از این مطالعه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه رودخانه ماربر در محدوده سمیرم استان اصفهان با استفاده از ادغام داده در ترکیب با روش‌های تحلیل سلسله مراتبی است.

محمد رضا سجادی^۱، احمد احمدی^۲، بهناز بیگدلی^۳ (✉)

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۳. استادیار گروه ژئوتکنیک، راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: bigdeli@shahroodut.ac.ir

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1399.11.4.2.2>

می‌دهد. همچنین مقادیر حاصل سلول را با هم ترکیب می‌کند تا رستر خروجی تولید کند. در ادامه پس از ایجاد چهار نتیجه پهنه‌بندی از مفهوم ادغام تصمیم‌گیری‌ها برای تلفیق نتایج و ایجاد نتیجه نهایی استفاده می‌شود. ادغام تصمیم‌گیری‌ها یا در حالت کلی ادغام یا تلفیق داده، تصمیم‌گیری‌های مختلف حاصل از روش‌ها یا داده‌های متفاوت را با هم ترکیب یا تلفیق می‌کند تا در نهایت تصمیم‌گیری را حاصل کند که هم دقت بیشتری دارد و هم اعتماد به آن بسیار بیشتر از نتیجه یک تصمیم‌گیری انفرادی است.

نتایج و بحث منطقه مورد مطالعه در فاصله ۶۰ کیلومتری از شهر سمیرم در حوزه رودخانه ماربر واقع شده است. به‌طور کلی عوامل مختلفی می‌توانند در ناپایداری شیب‌ها و فراهم کردن شرایط برای بروز زمین‌لغزش مؤثر باشند. از میان تمامی عوامل مؤثر، در این تحقیق هشت عامل شیب، جهت شیب، فاصله تا گسل، فاصله تا راه‌ها، فاصله تا زهکش، فاصله تا مناطق مسکونی، لیتولوژی و میزان بارش جهت بررسی بیشتر زمین‌لغزش انتخاب شدند. این لایه‌های مؤثر با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی مدل رقومی ارتفاعی، خطوط گسل، موقعیت راه‌ها، موقعیت آبراه‌ها، موقعیت مناطق مسکونی، لیتولوژی و ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه به دست آمد. مدل رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر از سایت USGS تهیه شد. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و در فضای GIS، نقشه‌های شیب و جهت شیب در ۵ کلاس تولید گردید. نقشه گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد. سپس در محیط ArcGIS و به کمک ابزار فاصله اقلیدسی لایه فاصله تا گسل ایجاد و با توجه به میزان فاصله هر نقطه تا گسل‌ها، لایه نهایی فاصله تا گسل در ۵ گروه کلاس‌بندی شد. همچنین برای تهیه نقشه میزان بارش محدوده مورد مطالعه از میانگین اطلاعات بارش سازمان هواشناسی کشور در ۱۰ سال اخیر در ۱۹ ایستگاه اطراف ناحیه مورد مطالعه استفاده شد. سپس با توجه به میزان بارش، فاصله میان ۱۹ ایستگاه هواشناسی به ۵ گروه تقسیم‌بندی گردید. منطقه مورد مطالعه در قسمت بارندگی زیاد و بسیار زیاد

قرار گرفته است. نقشه راه‌های منطقه از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه مورد مطالعه تهیه شد. برای مطالعه تأثیرات راه‌های محدوده مورد مطالعه در ایجاد زمین‌لغزش نیاز به تولید نقشه فاصله تا راه‌ها بود که این نقشه با استفاده از نقشه راه تهیه شد و فاصله هر نقطه تا راه‌ها در ۵ گروه مشخص گردید. برای تهیه نقشه زهکش منطقه از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه مورد تحقیق استفاده شد. جهت استفاده از لایه زهکش به‌عنوان یک لایه مؤثر، لایه فاصله تا زهکش در محیط ArcGIS و ابزار فاصله اقلیدسی تولید شد. در نهایت لایه فاصله تا زهکش در ۵ گروه کلاس‌بندی شد. جهت بررسی مناطق مسکونی در پدیده زمین‌لغزش از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای مشاهده تأثیر لایه مناطق مسکونی در وقوع زمین‌لغزش نیاز به تولید پهنه‌بندی فاصله تا مناطق مسکونی وجود داشت که این لایه در محیط ArcGIS و در پنج کلاس تولید شد. برای بررسی تأثیر لیتولوژی در این منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شد. همچنین سنگ‌ها با توجه به جداول کانی‌شناسی به ۲ گروه سنگ نرم و سنگ سخت تقسیم‌بندی شد.

نتیجه‌گیری پهنه‌بندی با روش تحلیل سلسله مراتبی-همپوشانی وزن‌دار، تحلیل سلسله مراتبی-همپوشانی فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی-همپوشانی وزن‌دار و در نهایت تحلیل سلسله مراتبی فازی-همپوشانی فازی به ترتیب دارای دقت ۸۰٪، ۸۶٪ و ۷۵٪ و ۸۸٪ بود و پس از ادغام نتایج حاصل از این ۴ روش، دقت پهنه‌بندی به ۹۰٪ افزایش یافت. مقایسه و صحت‌سنجی نتایج با نرخ پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های تاریخی منطقه نشان داد روش‌های پهنه‌بندی، نتایج مناسبی داشتند اما در نهایت با ادغام اطلاعات، نتایج بهبود بیشتری یافتند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سلسله مراتبی فازی، پهنه‌بندی، خطر زمین‌لغزش، حوزه رودخانه ماربر

احتمال وقوع زمین لغزش را با استفاده از مدل‌های دو متغیره (عامل اطمینان و شاخص آنتروپی) و مدل چند متغیره (رگرسیون لگاریتمی) انجام دادند. ابتدا نقشه فهرست زمین لغزش‌ها با استفاده از گزارش‌ها و تصاویر هوایی قبلی و همچنین با نقشه برداری از منطقه، آماده شده است. در نتیجه ۳۲۱ زمین لغزش نقشه برداری شده‌اند که از آن‌ها به طور تصادفی، ۲۴۱ عدد (۷۵٪) برای ساخت مدل‌های احتمالاتی زمین لغزش استفاده شده است. در حالی که ۸۰ مورد (۲۵٪) باقی مانده برای صحت سنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. تأثیر ارزیابی احتمالات زمین لغزش‌ها با استفاده از GIS و آمار، وابسته به انتخاب مناسب عواملی است که نقش اصلی در پایداری شیب دارند. در این تحقیق، عوامل وابسته به شرایط در زمین لغزش‌ها، ارزیابی شده‌اند: گرادیان شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای نقشه، سنگ‌شناسی، استفاده از زمین، فاصله از گسل‌ها، رودخانه و جاده‌ها، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انتقال رسوبات. این عوامل از نقشه توپوگرافی، نقشه زهکش‌ها، نقشه جاده و نقشه جغرافیایی به دست آمده‌اند. در نهایت تصدیق نقشه احتمالات زمین لغزش با استفاده از منحنی مشخصات دریافت کننده اجرایی (Receiver Operating Characteristic) انجام شده است. نتایج تخمین نقشه ROC نشان داد که نقشه احتمالات با استفاده از شاخص مدل آنتروپی با مقدار مساحت زیر نمودار ۰/۹۰۱۶ بیشترین دقت پیش‌بینی را با مقدار ۹۰/۱۶ درصد دارا است. به طور مشابه، نقشه‌های احتمالاتی تولید شده با استفاده از مدل رگرسیون منطقی و مدل عامل اطمینان، دقت پیش‌بینی ۸۶/۲۹ و ۸۳/۵۷ را دارا می‌باشند؛ بنابراین، نتیجه این شده است که تمامی مدل‌های به کار رفته در این تحقیق، دقت معقول و مناسبی در پیش‌بینی احتمال وقوع زمین لغزش بخش جاده موگلینگ-نارایانگات نشان داده‌اند. جیانگ و همکاران (۱۳) پهنه بندی زمین لغزش را در استان یونان چین با استفاده از روش‌های رگرسیون منطقی، خود رگرسیون فضایی، رگرسیون وزنی جغرافیایی و رگرسیون بردار پشتیبان انجام دادند و با توجه به مقایسه نتایج حاصل با نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش، روش رگرسیون بردار پشتیبان

زمین لغزش (Landslide) حرکتی است که به صورت سقوط سنگ یا خاک و یا هردوی آن‌ها، بر روی سطوح گسیختگی رخ می‌دهد که این سطوح می‌توانند به صورت منحنی (لغزش چرخشی) و یا خطی (لغزش انتقالی) ایجاد شود. فل و همکاران (۱۲) حساسیت زمین لغزش را برای شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش و ارتباط آن‌ها با مجموعه عوامل مؤثر در نظر گرفتند. این روش‌های غیرمستقیم شامل مدل سازی کمی و کیفی و انواع مختلف تکنیک‌های آنالیز است. تولید نقشه‌های پهنه بندی زمین لغزش به طور کلی شامل دو دسته روش می‌شود؛ (۱) روش‌های کیفی که مبتنی بر دانش متخصصین و توسعه‌ی موجودی زمین لغزش‌ها است؛ مانند روش تحلیل سلسله مراتبی که بسیاری از محققین از آن استفاده می‌کنند. (۲) روش‌های کمی از جمله مدل سازی‌های دو متغیره و چند متغیره که برای استفاده آماری از زمین لغزش استفاده می‌شوند. احمد (۳) پهنه بندی زمین لغزش را در منطقه چیتاگونگ متروپولیتان بنگلادش با سه روش میانگین وزنی رتبه‌ای، تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب خطی وزنی انجام داد و مشاهده کرد تمامی روش‌ها از دقت خوبی برخوردار هستند. عابدینی و تولابی (۱) پهنه بندی زمین لغزش را با روش‌های فاکتور ریسک اسمی زمین لغزش، نسبت فرکانس و تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند و با صحت سنجی نتایج حاصله، پیش‌بینی روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و روش نسبت فرکانس را نسبت به روش فاکتور ریسک اسمی مناسب‌تر دانستند. علاوه بر این تحقیق کلی و جامع در مورد روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، آپچور و همکاران (۲)، برا و همکاران (۷)، کاپاستا و همکاران (۱۵)، کومار و آنابالگان (۱۶)، سویدی و همکاران (۲۳) و وجتکوا و وجتک (۲۴)، وو و همکاران (۲۵)، در تحقیقات خود از پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده کردند. چاندرا و همکاران (۸) اقدام به پهنه بندی زمین لغزش در جاده موگلینگ-نارایانگات و منطقه پیرامون آن در حوزه نپال هیمالیا کردند. آن‌ها ارزیابی

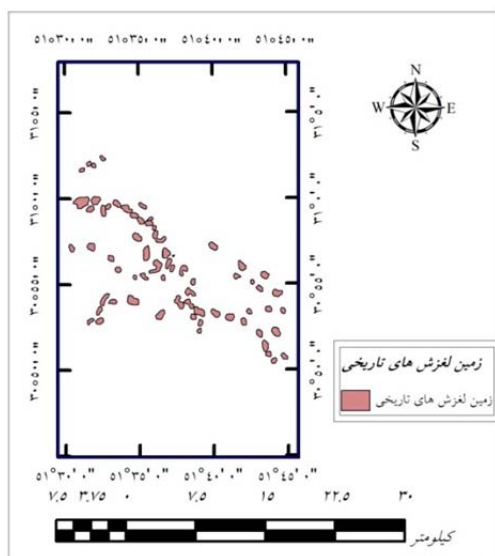
می‌شود. به علت رخداد زمین‌لغزش‌های بسیار زیاد در منطقه مورد مطالعه و وجود بیش از ۴۰ منطقه مسکونی در این حوزه، بررسی خطر و ریسک زمین‌لغزش اهمیت بسیار بالایی دارد. پیش‌بینی می‌شود ادغام نتایج بتواند دقت پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های منطقه را افزایش دهد.

مواد روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حدفاصل $51^{\circ} 29'$ تا $51^{\circ} 45'$ طول شرقی و $30^{\circ} 44'$ تا $31^{\circ} 07'$ عرض شمالی و در فاصله تقریبی ۶۰ کیلومتری از شهر سمیرم واقع شده است. همچنین در این منطقه حوضه رودخانه ماربر قرار گرفته است. این ناحیه جزء رشته‌کوه‌های زاگرس است (شکل ۱).

(Support Vector Regression) نتایج بهتری را به دست آورد. آنبالگان و سینگ (۴)، بهاروند و سوری (۶)، داهال و همکاران (۹)، دای و لی (۱۰) و رحمتی و زند (۱۹) از روش‌های کمی در پهنه‌بندی زمین‌لغزش استفاده کرده‌اند. هدف از این مطالعه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه رودخانه ماربر با بهره جستن از دو روش همپوشانی فازی و همپوشانی وزن‌دار در روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی و سپس ادغام نتایج با روش رأی‌دهی وزن‌دار است. روش‌های پیشین معمولاً از یک روش تصمیم‌گیری بر پایه وزن‌های حاصل استفاده می‌کردند ولی در این تحقیق سعی می‌شود وزن‌های حاصل در روش‌های مختلفی بکار برده شوند تا نتایج پهنه‌بندی متفاوتی حاصل شود. به‌علاوه با توجه به دقت و نتایج متفاوت حاصل از روش‌های مختلف پهنه‌بندی، در انتها روشی بر پایه ادغام اطلاعات به‌منظور ادغام نتایج پهنه‌بندی بکار برده

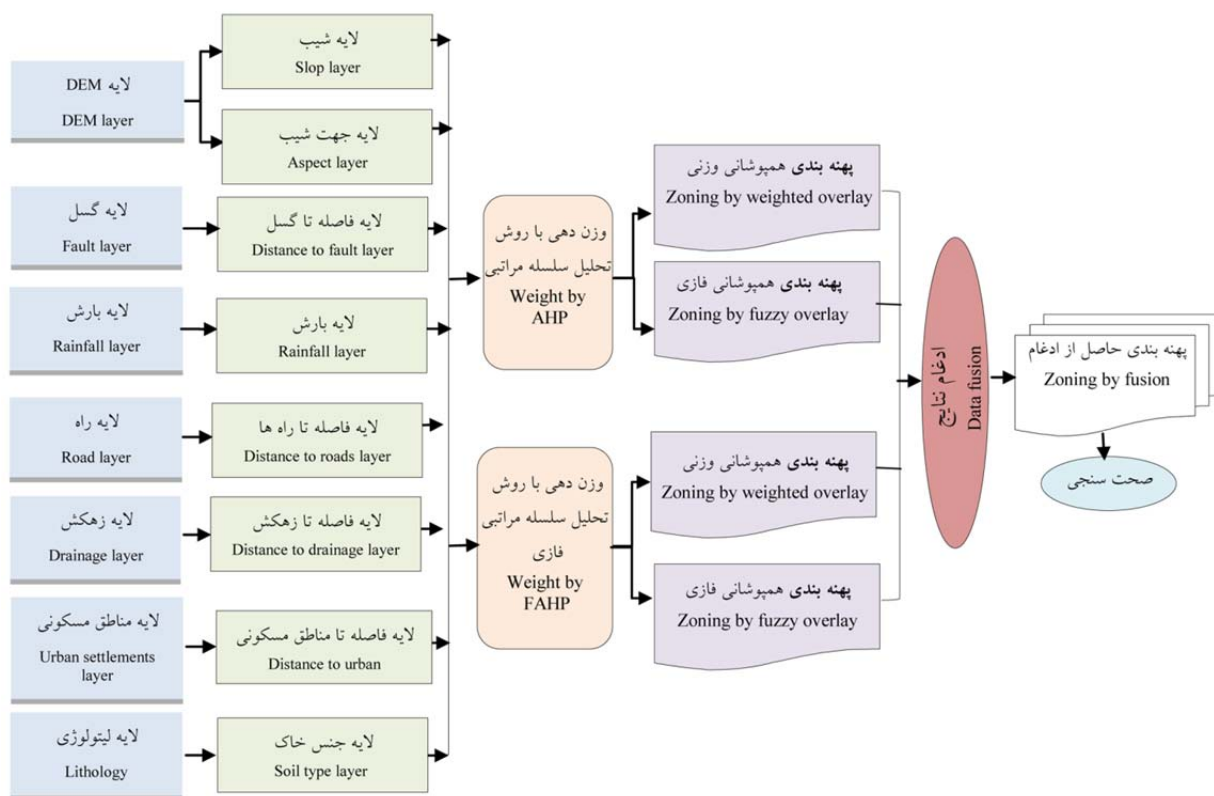


شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و زمین‌لغزش‌های تاریخی

Fig. 1. Study area and Historical landslides

ادغام نتایج حاصل از این روش‌ها می‌تواند به بهبود نتایج پهنه‌بندی کمک کند. شکل ۲ مراحل مختلف روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه رودخانه، روشی بر پایه ادغام روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی ارائه می‌شود. با توجه به مزایا و معایب روش‌های پیشین، استفاده هم‌زمان از چندین روش پهنه‌بندی و سپس



شکل ۲. روش پیشنهادی به منظور پهنه بندی خطر زمین لغزش
 Fig. 2. The proposed method for landslide hazard zoning

تحقیق هشت عامل شیب، جهت شیب، فاصله تا گسل، فاصله تا راه‌ها، فاصله تا زهکش، فاصله تا مناطق مسکونی، لیتولوژی و میزان بارش جهت بررسی بیشتر زمین لغزش انتخاب شدند.

داده‌های مورد استفاده

مدل رقومی ارتفاعی یک فایل دیجیتال است که شامل ارتفاعات زمین برای موقعیت‌های زمین در فواصل منظم افقی است (۱۸). مدل رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر از سایت USGS تهیه شده است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و در فضای GIS، نقشه‌های شیب و جهت شیب منطقه تولید شد. به‌طور کلی شیب‌های منطقه از ۰ تا ۸۴ درجه متغیر هستند. در نهایت لایه شیب و جهت شیب در ۵ گروه کلاس بندی شدند.

گسل به‌طور کلی مشاهده شده است که احتمال وقوع زمین لغزش در مناطق نزدیک به گسل افزایش می‌یابد که نه تنها

ابتدا داده‌های جمع آوری شده از منطقه، بررسی و پردازش می‌شوند. این داده‌ها شامل نقشه اطلاعات ارتفاعی منطقه یا DEM، اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف منطقه مورد نظر، لایه گسل، نقشه لیتولوژی منطقه، آبراه‌ها، جاده‌ها و مناطق مسکونی است. با پردازش این لایه‌ها در محیط GIS لایه‌های اطلاعاتی نهایی فراهم می‌شود. دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی برای محاسبه وزن لایه‌ها استفاده می‌شود. همچنین پس از به دست آمدن وزن لایه‌ها از دو روش تحلیل سلسله مراتبی، دو روش همپوشانی وزنی و همپوشانی فازی برای اعمال وزن‌ها بر لایه‌ها استفاده می‌شود. در نهایت روش ادغام رأی‌گیری وزن دار نتایج پهنه بندی حاصل را با یکدیگر ادغام کرده و نقشه نهایی پهنه بندی خطر زمین لغزش را تولید می‌کند. به‌طور کلی عوامل مختلفی می‌توانند در ناپایداری شیب‌ها و فراهم کردن شرایط برای بروز زمین لغزش مؤثر باشند. از میان تمامی عوامل مؤثر، در این

بر ساختارهای مواد سطحی تأثیر می‌گذارد بلکه موجب نفوذپذیری در سطح زمین می‌شود که این باعث بی‌ثباتی در شیب می‌شود (۱۴). نقشه گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. سپس در محیط ArcGIS و به کمک ابزار فاصله اقلیدسی لایه فاصله تا گسل ایجاد شده و با توجه به میزان فاصله هر نقطه تا گسل‌ها، لایه نهایی فاصله تا گسل در ۵ گروه کلاس‌بندی شد. بارش اشباع شیب توسط آب یکی از علل اصلی زمین‌لغزش است. اشباع می‌تواند در قالب میزان بارش شدید، ذوب برف و تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی اتفاق بیفتد. برای تهیه نقشه میزان بارش محدوده مورد مطالعه از میانگین اطلاعات بارش سازمان هواشناسی کشور در ۱۰ سال اخیر در ۱۹ ایستگاه اطراف ناحیه مورد مطالعه استفاده شد. سپس با توجه به میزان بارش، فاصله میان ۱۹ ایستگاه هواشناسی به ۵ گروه تقسیم‌بندی شد. منطقه مورد مطالعه در قسمت بارندگی زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است.

راه در نواحی کوهستانی، خاک‌برداری بر روی شیب جهت احداث جاده یک روش رایج است که تا حد زیادی پایداری شیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۱). نقشه راه‌های منطقه از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه مورد مطالعه تهیه شده‌اند. برای مطالعه تأثیرات راه‌های محدوده مورد مطالعه در ایجاد زمین‌لغزش نیاز به تولید نقشه‌ی فاصله تا راه‌ها بود که این نقشه با استفاده از نقشه راه تولید شد و فاصله هر نقطه تا راه‌ها در ۵ گروه مشخص شد.

زهکش تجزیه و تحلیل شبکه‌های زهکشی یک ابزار قدرتمند به منظور بررسی زمین‌لغزش‌های بزرگ است (۱۷). برای تهیه نقشه زهکش منطقه از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه مورد تحقیق استفاده شد. جهت استفاده از لایه زهکش به عنوان یک لایه مؤثر، لایه فاصله تا زهکش به کمک محیط GIS و ابزار فاصله اقلیدسی تولید شد. در نهایت لایه فاصله تا زهکش در ۵ گروه کلاس‌بندی شد.

مناطق مسکونی بررسی تأثیر مناطق مسکونی بر ایجاد زمین‌لغزش به دلیل نشست‌های زمین ناشی از برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی حائز اهمیت است. جهت بررسی مناطق مسکونی در پدیده زمین‌لغزش از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای مشاهده تأثیر لایه مناطق مسکونی در وقوع زمین‌لغزش نیاز به تولید پهنه‌بندی فاصله تا مناطق مسکونی وجود داشت که این لایه در محیط ArcGIS تولید شد. سپس لایه نزدیکی به مناطق مسکونی در ۵ گروه کلاس‌بندی شد.

لیتولوژی به‌طور گسترده‌ای مشخص شده است که پارامترهای زمین‌شناسی به شدت بر وقوع زمین‌لغزش‌ها تأثیر می‌گذارند، زیرا تغییرات سنگ‌شناسی و ساختاری اغلب منجر به تفاوت استحکام و نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود (۲۰). برای بررسی تأثیر لیتولوژی در این منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شده است. برای تقسیم‌بندی و تعیین حد بین خاک و سنگ از مرز مقاومت فشاری تک‌محوره ۱ مگا پاسکال استفاده شد. بدین منظور کانی‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره کمتر از ۱ مگا پاسکال به عنوان خاک و کانی‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره بیشتر از ۱ مگا پاسکال به عنوان سنگ انتخاب شدند؛ و همچنین گروه سنگ با توجه به جداول کانی‌شناسی به ۲ گروه سنگ نرم و سنگ سخت تقسیم‌بندی شدند.

روش تحلیل سلسله مراتبی

تکنیک تحلیل سلسله مراتبی یا (Analytical Hierarchy Process) را ساعتی در سال ۱۹۷۷ پیشنهاد کرد. در این روش ابتدا مسائل پیچیده تجزیه می‌شوند و به مسائل ساده تقسیم می‌شوند و سپس از طریق مقایسات زوجی بین گزینه‌ها ترجیحات سیستم مشخص می‌شود. در مرحله بعدی بین گزینه‌ها سازگاری ایجاد می‌شود. این روش دارای سه فاز اساسی در اجراست.

فاز اول؛ محاسبه وزن و ضرایب اهمیت از ماتریس‌های نشان‌دهنده ارجحیت سطر به ستون است استفاده می‌شود. مقایسه زوجی. برای تشکیل ماتریس مقایسه از جدول ۱ که

جدول ۱. شدت ارجحیت گزینه‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی

Table 1. Option's preference intensity for AHP

ارزش Value	ارجحیت Preference
۱	ارجحیت یکسان گزینه A_1 بر گزینه A_h Same preference of A_1 over A_h
۲	ارجحیت خیلی کم گزینه A_1 بر گزینه A_h Very low preference of A_1 over A_h
۳	ارجحیت کم گزینه A_1 بر گزینه A_h Low preference of A_1 over A_h
۴	ارجحیت نسبتاً کم گزینه A_1 بر گزینه A_h Relatively Low preference of A_1 over A_h
۵	ارجحیت متوسط گزینه A_1 بر گزینه A_h Medium preference of A_1 over A_h
۶	ارجحیت نسبتاً زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Relatively high preference of A_1 over A_h
۷	ارجحیت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h High preference of A_1 over A_h
۸	ارجحیت خیلی زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Very high preference of A_1 over A_h
۹	ارجحیت بی‌نهایت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Unlimited preference of A_1 over A_h

در گام سوم میانگین درایه‌های بردار ناسازگاری را به دست آورده که این مقدار تقریبی از بزرگ‌ترین مقدار ویژه یا λ_{max} است. در ادامه در گام چهارم نشانگر ناسازگاری از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. هنگامی که m (n) برابر با تعداد گزینه‌ها (شاخص‌ها) است.

$$ICI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad [3]$$

در گام پنجم نرخ ناسازگاری از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$ICR = \frac{ICI}{RI} \quad [4]$$

فاز سوم؛ ادغام وزن‌ها و ضرایب اهمیت و استخراج امتیاز نهایی گزینه‌ها. در این فاز وزن‌ها و ضرایب اهمیت حاصل از ماتریس‌های مقایسات زوجی که سازگاری آن‌ها تأیید شده

فاز دوم؛ محاسبه نرخ ناسازگاری و اصلاح ماتریس‌های ناسازگار. برای محاسبه نرخ ناسازگاری باید گام‌های زیر طی شود. در گام اول هر یک از ماتریس‌های تصمیم، در بردار وزن یا ضرایب آن ماتریس که در فاز اول محاسبه شد ضرب شده و بردار به دست آمده که یک بردار ستونی است بردار مجموع موزون یا WSV نامیده می‌شود (رابطه ۱).

$$WSV = A \times W(A_i) \quad [1]$$

در گام دوم بردار ناسازگاری یا ICV که برابر با حاصل تقسیم نظیر با نظیر (نه ماتریسی) بردار WSV بر بردار وزن‌ها یا ضرایب است، محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$ICV = WSV/W(A_i) \quad [2]$$

دوم ارزش موزون هر گزینه در تمام شاخص‌ها با یکدیگر جمع شده تا ارزش و امتیاز نهایی گزینه‌ها (U_i) استخراج شود و در گام نهایی گزینه‌ها به ترتیب از صعودی به نزولی رتبه‌بندی می‌شود.

است باهم ادغام می‌شوند تا امتیاز نهایی گزینه‌ها به دست آید که بر اساس آن رتبه‌بندی کلی گزینه‌ها ارائه می‌شود. این فاز شامل سه گام اساسی زیر است: گام اول وزن هر شاخص در ضرایب اهمیت گزینه‌ها با ازای آن شاخص ضرب شده تا ارزش موزون هر گزینه در هر شاخص مشخص شود. در گام

جدول ۲. شدت ارجحیت گزینه‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

Table 2. Option's preference intensity for fuzzy AHP

ارزش Value	ارجحیت Preference
$(\frac{1}{3}, 1, 2)$	ارجحیت یکسان گزینه A_1 بر گزینه A_h Same preference of A_1 over A_h
$(1, 2, 3)$	ارجحیت خیلی کم گزینه A_1 بر گزینه A_h Very low preference of A_1 over A_h
$(2, 3, 4)$	ارجحیت کم گزینه A_1 بر گزینه A_h Low preference of A_1 over A_h
$(3, 4, 5)$	ارجحیت متوسط گزینه A_1 بر گزینه A_h Medium preference of A_1 over A_h
$(5, 6, 7)$	ارجحیت نسبتاً زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Relatively high preference of A_1 over A_h
$(6, 7, 8)$	ارجحیت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h High preference of A_1 over A_h
$(7, 8, 9)$	ارجحیت خیلی زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Very high preference of A_1 over A_h
$(8, 9, 9)$	ارجحیت بی‌نهایت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h Unlimited preference of A_1 over A_h

$$V_{1,h} = \begin{cases} 1 & b_1 \geq b_h \\ 0 & c_1 \geq a_h \\ \frac{a_h - c_1}{(b_1 - c_1) - (b_h - a_h)} & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad [6]$$

سپس در هر ماتریس مقایسات زوجی، کمترین شدت برتری یک گزینه بر گزینه‌های دیگر وزن اولیه آن گزینه در آن ماتریس را نشان می‌دهد؛ وزن‌های اولیه، بر مجموعشان تقسیم شده تا وزن‌های نسبی (w_1) به دست آید. در نهایت، وزن هر شاخص در وزن‌های به دست آمده از ماتریس مقایسه گزینه-ها در آن شاخص ضرب می‌شود تا ارزش موزون هر گزینه در هر شاخص مشخص شود (۵). در این تحقیق پرسشنامه‌ها در

روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای استخراج وزن‌ها

روش تحلیل سلسله مراتبی فازی باحالت‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین این رویکردها را چانگ (۱۹۹۶) پیشنهاد کرد که آن را تحلیل گسترش نامید (۱). در این تکنیک از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود. ابتدا از هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی و به ازای هر گزینه یا شاخص یک عدد فازی S مطابق رابطه ۵ تعیین شد.

$$\tilde{S}_l = \left(\frac{\sum_{h=1}^n a_{lh}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^n c_{lh}}, \frac{\sum_{h=1}^n b_{lh}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^n b_{lh}}, \frac{\sum_{h=1}^n c_{lh}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^n a_{lh}} \right) \quad [5]$$

با توجه به حالت‌های مختلف برتری گزینه‌ها، پارامتر شدت برتری طبق رابطه ۶ تعیین شد.

روش‌ها یا داده‌های متفاوت را باهم ترکیب یا تلفیق می‌کند تا در نهایت تصمیم‌گیری‌ای را حاصل کند که هم دقت بیشتری دارد و هم اعتماد به آن بسیار بیشتر از نتیجه یک تصمیم‌گیری انفرادی است (۲۲). یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد در ادغام تصمیم‌گیری‌ها، روشی بر پایه مفهوم رأی‌گیری است. در این روش با تصمیم هر روش تصمیم‌گیری به صورت یک رأی برخورد می‌شود (۲۰). ساده‌ترین حالت این روش بانام حداکثر رأی شناخته می‌شود. در این روش اگر همه روش‌های تصمیم‌گیری دارای وزن و دقت یکسانی باشند، تصمیم تمام طبقه‌بندی‌کننده‌ها برای یک نمونه ورودی، با وزن یکسان در نظر گرفته می‌شود و تصمیم با بیشترین رأی به عنوان کلاس برنده برای نمونه ورودی معرفی می‌شود. با این فرض که $D_i, i=1, \dots, M$ مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری به تعداد M و $W_{ij}, j=1, \dots, c$ تعداد کلاس‌های موجود باشد، برای هر طبقه‌بندی‌کننده، بردار c بعدی $[d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ic}]$ در نظر گرفته می‌شود. d_{ij} می‌تواند مقادیر ۱ یا ۰ را بگیرد به این ترتیب که اگر روش تصمیم‌گیری نمونه ورودی را متعلق به کلاس خاص مورد نظر دانست به آن مقدار ۱ و اگر متعلق ندانست مقدار ۰ داده می‌شود. همان‌طور که پیش‌ازاین ذکر شد، در حالت رأی‌گیری ساده که وزن همه طبقه‌بندی‌کننده‌ها برابر است، کلاس با حداکثر رأی برنده خواهد بود (رابطه ۷).

$$\sum_{i=1}^L d_{i,k} = \max_{j=1}^L d_{i,j} \quad [7]$$

هنگامی که روش‌های تصمیم‌گیری دارای دقت‌های مختلف هستند، حالت خاصی از این روش بانام حداکثر رأی وزن‌دار به کار برده می‌شود. به این ترتیب نقش روش‌هایی که دقت بیشتری دارند در رأی‌گیری بیشتر می‌شود و وزن بیشتری به آن‌ها تعلق می‌گیرد درحالی‌که روش‌های پهنه‌بندی با دقت کمتر وزن کمتری را در ادغام دریافت می‌کنند. رابطه ۸ رأی‌نهایی در حالت وزن‌دار را نمایش می‌دهد (۱۱).

$$g_j(x) = \sum_{i=1}^M d_{i,j} \times b_j \quad [8]$$

قالب جداول مقایسات زوجی در اختیار کارشناسان خبره قرار گرفت. کارشناسان مقایسات زوجی بین عوامل مؤثر وقوع زمین لغزش را با توجه به جدول ۱ و جدول ۲ انجام داده و ارجحیت عوامل را نسبت به یکدیگر مشخص کردند، سپس با اتفاق نظر رأی خود را در قالب یک نتیجه واحد بیان کردند. سپس فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی با توجه به روند فوق بر روی رأی کارشناسان صورت پذیرفت و در نتیجه درصد اهمیت لایه‌ها (وزن لایه‌ها) مشخص شد. پس از ایجاد وزن‌ها به دو روش تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی، دو روش همپوشانی به منظور اعمال وزن‌ها در لایه‌ها استفاده می‌شود.

روش‌های همپوشانی وزنی و فازی

روش‌های همپوشانی مورد استفاده در این تحقیق شامل؛ روش همپوشانی وزنی. یکی از روش‌های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل‌های همپوشانی برای پاسخ به سؤالات چند معیاری مانند انتخاب محل و مدل مناسب است. این ابزار شامل گام‌هایی به شرح زیر است: اول، مقادیر موجود در رسترهای ورودی، به یک مقیاس ارزیابی مشترک از نظر مناسب بودن یا اولویت، ریسک و یا مقیاس مناسب یکسان‌سازی می‌شوند. دوم، مقادیر سلول هر یک از ردیف ورودی با توجه به اهمیت رسترها افزایش می‌یابد. سوم، مقادیر حاصل سلول باهم ترکیب می‌شوند تا رستر خروجی تولید شود. (۲) روش همپوشانی فازی. دیگر روش مورد استفاده است. ابزار همپوشانی فازی امکان تجزیه و تحلیل احتمال وقوع پدیده متعلق به چندین مجموعه را در تحلیل همپوشانی چند معیاره فراهم می‌کند. نه تنها همپوشانی فازی اعضای تأثیرگذار در وقوع یک پدیده را تعیین می‌کند، بلکه روابط بین عضویت چند مجموعه را تجزیه و تحلیل می‌کند.

ادغام تصمیم‌گیری‌ها

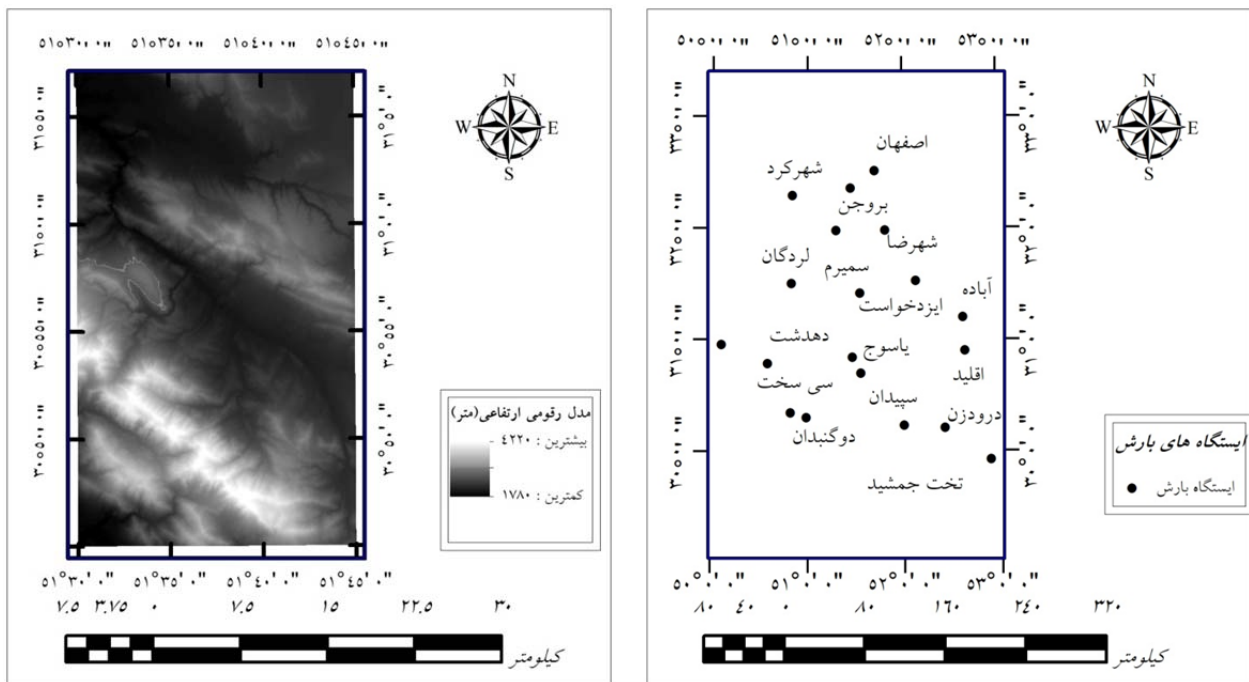
ادغام تصمیم‌گیری‌ها (Decision Fusion) یا در حالت کلی ادغام یا تلفیق داده، تصمیم‌گیری‌های مختلف حاصل از

اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. لایه‌های مؤثر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، مناطق مسکونی و جاده‌ها با استفاده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه مورد مطالعه تهیه شده‌اند. همچنین مدل رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شده است. لایه‌های مؤثر لیتولوژی و گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. همچنین نقشه زمین‌لغزش‌های تاریخی در منطقه از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. شکل ۳ داده‌های اولیه جمع‌آوری شده برای این منطقه را نمایش می‌دهد.

در این رابطه b_j وزن هر روش پهنه‌بندی است. در روش پیشنهادی در این تحقیق از دقت تخمین زمین‌لغزش‌های تاریخی در هر روش پهنه‌بندی به‌عنوان وزن آن روش استفاده خواهد شد.

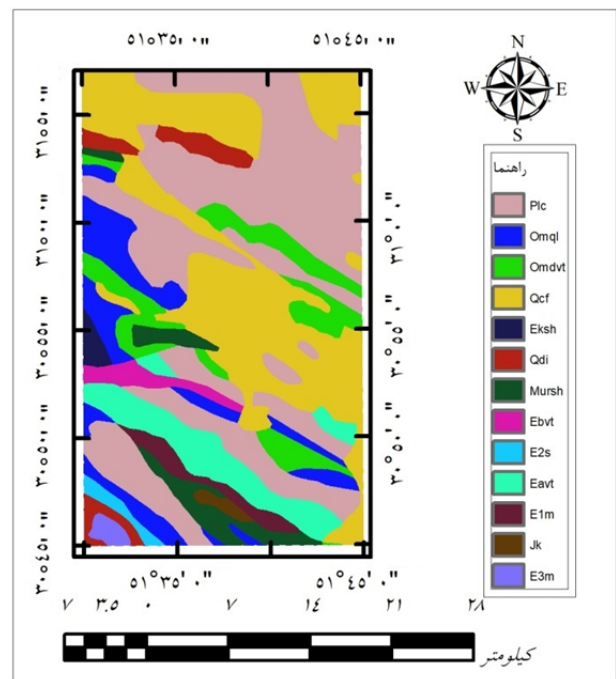
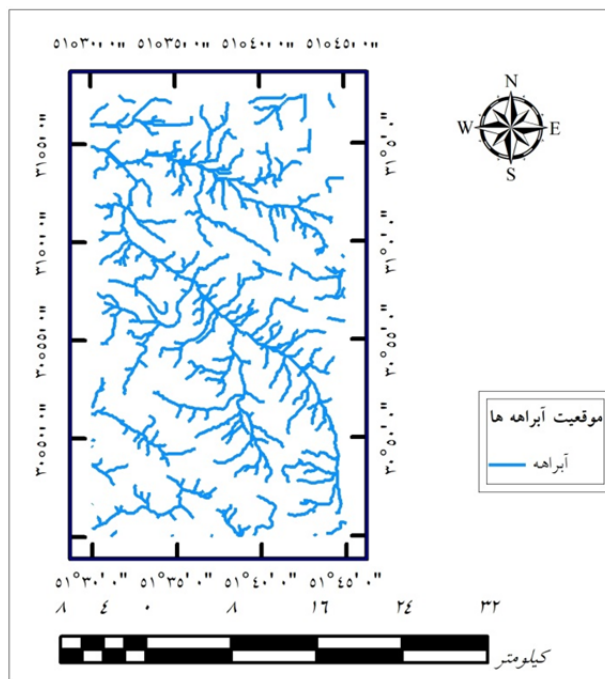
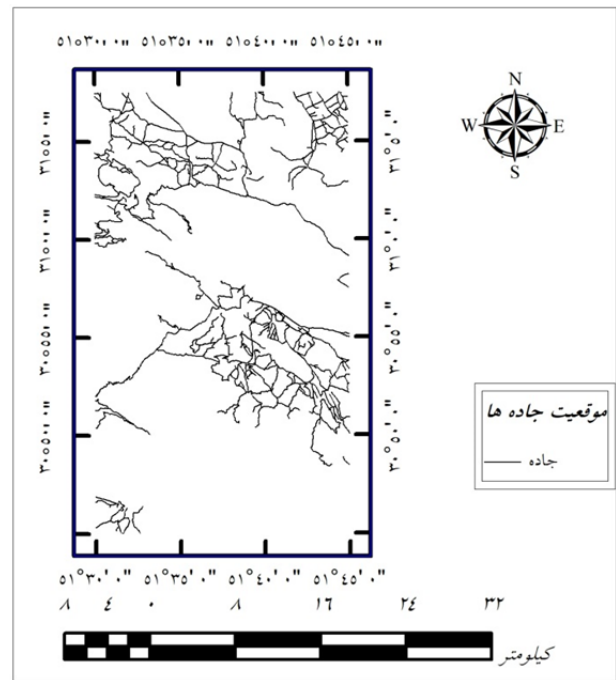
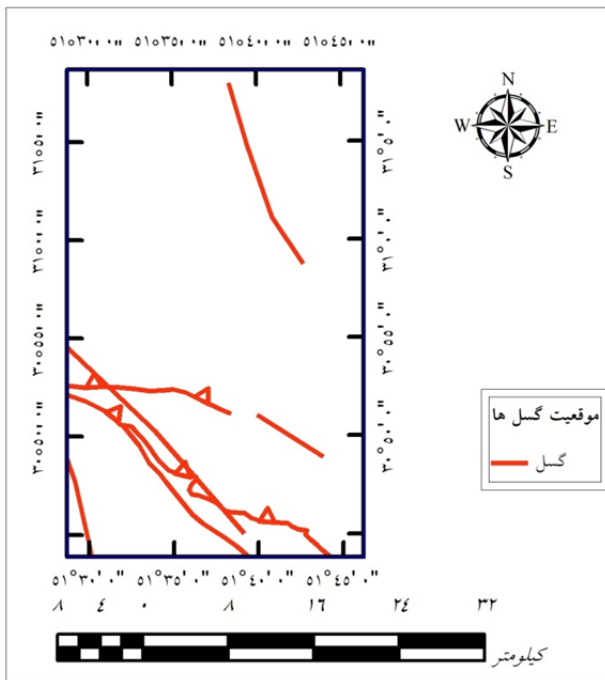
نتایج

لایه‌های مؤثر با استفاده از نقشه‌های موجود از ناحیه مورد مطالعه تولید می‌شوند. بدین منظور از نقشه رقومی ارتفاعی منطقه، نقشه آبراهه‌ها، جاده‌ها و گسل‌ها، نقشه زمین‌شناسی منطقه و نقشه داده ایستگاه‌های سینوپتیک به‌عنوان لایه‌های اولیه استفاده شد. تمامی لایه‌های مورد استفاده در



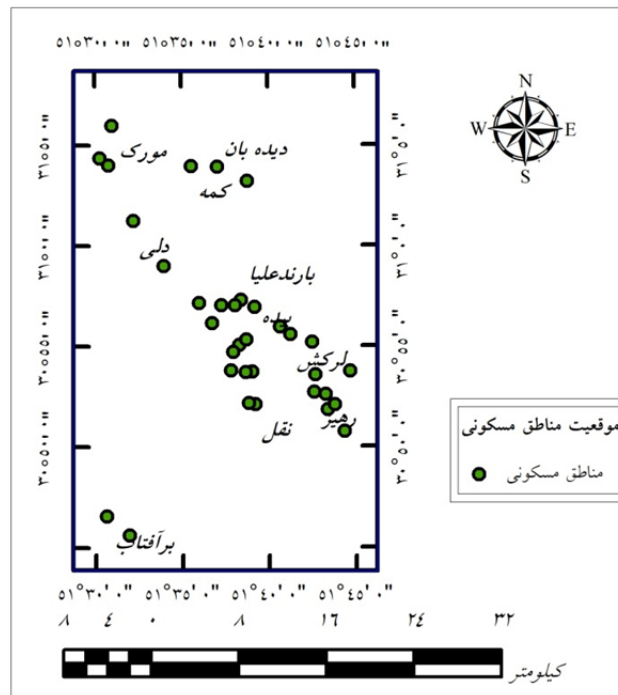
شکل ۳. نقشه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک، مدل رقومی ارتفاعی، جاده‌ها، گسل‌ها، لیتولوژی، آبراهه‌ها و موقعیت مناطق مسکونی

Fig. 3. Location of Synoptic station map, digital elevation model, roads, faults, lithology, stream, urban settlements



شکل ۳. (ادامه)

Fig. 3. (continued)

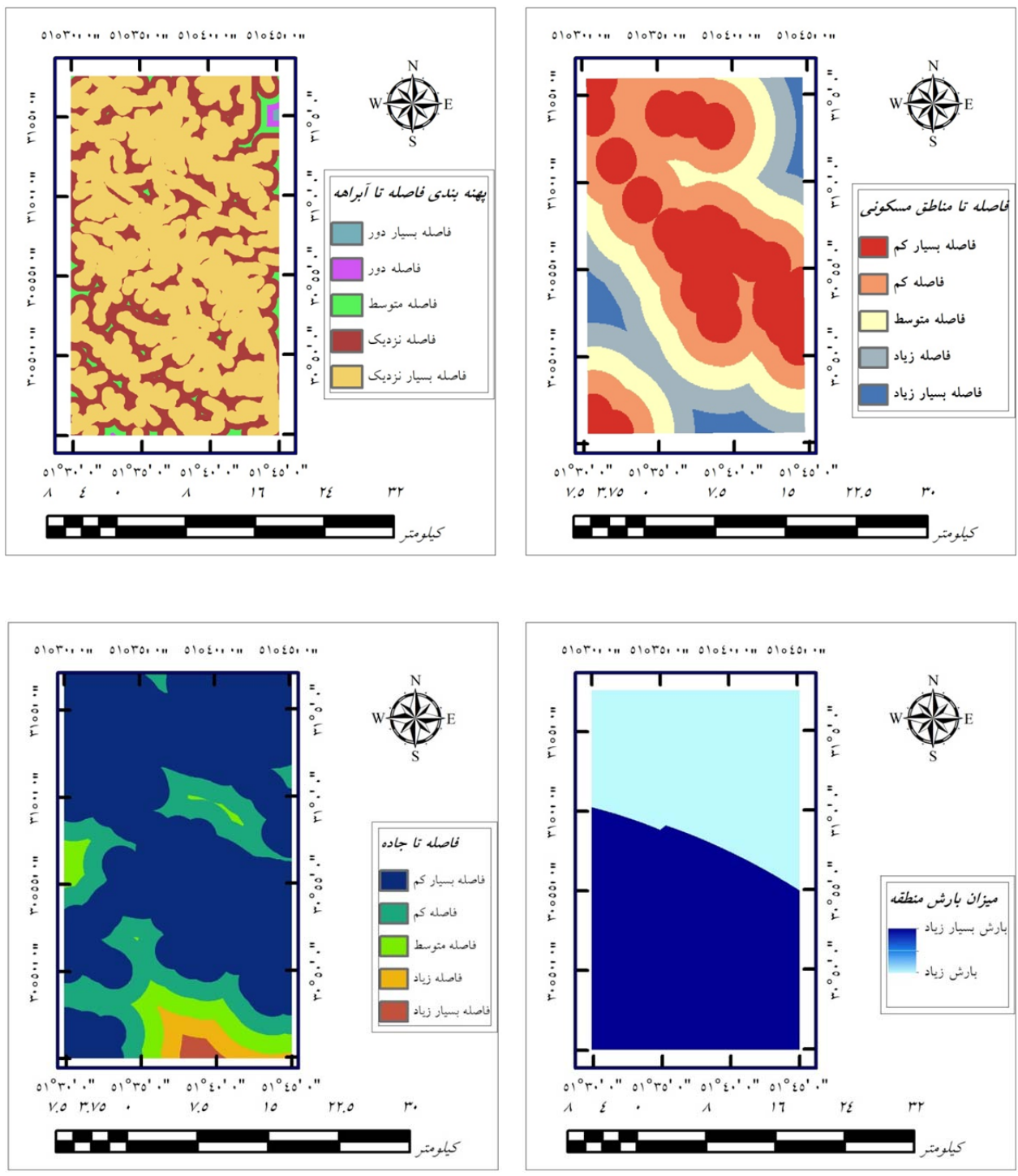


شکل ۳. (ادامه)

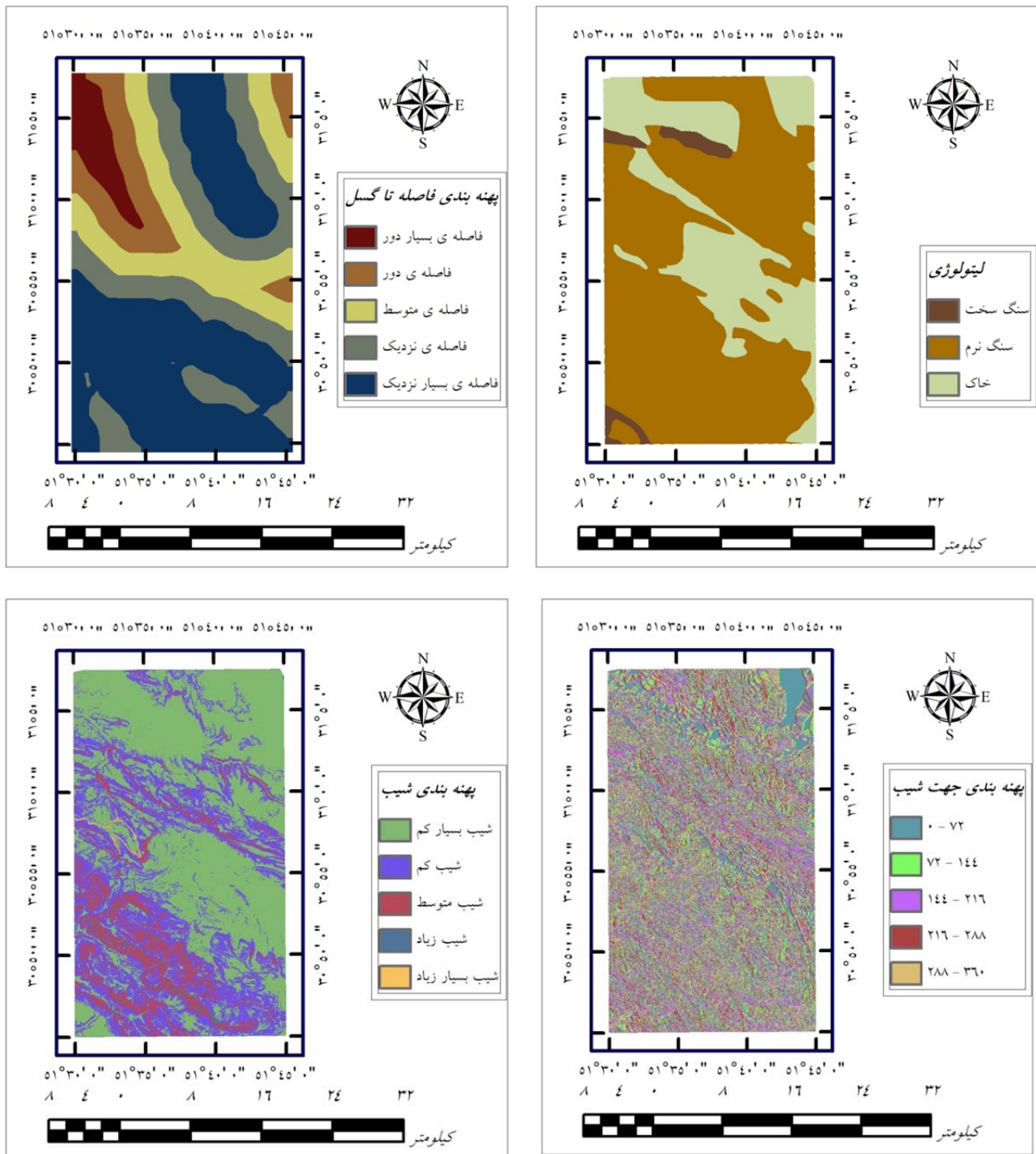
Fig. 3. (continued)

اخیر در ۱۹ ایستگاه اطراف ناحیه مورد مطالعه استفاده شد. همچنین لایه‌های مؤثر شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و با اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شده است (شکل ۴).

بعد از تهیه لایه‌های اولیه، به منظور تهیه لایه‌های مؤثر در محیط ArcGIS و با استفاده از فاصله اقلیدسی نقشه‌های فاصله از خطوط گسل، فاصله از رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و فاصله از جاده تهیه شده‌اند. برای تهیه نقشه میزان بارش منطقه نیز از میانگین داده‌های بارش سازمان هواشناسی کشور در ۱۰ سال



شکل ۴. نقشه فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا آبراهه‌ها، میزان بارش، فاصله تا جاده، لیتولوژی، فاصله تا گسل، شیب و جهت شیب
 Fig. 4. Distance to urban settlements, distance to stream, rainfall, distance to road, lithology, distance to fault, slope and aspect map



شکل ۴. (ادامه)

Fig. 4. (continued)

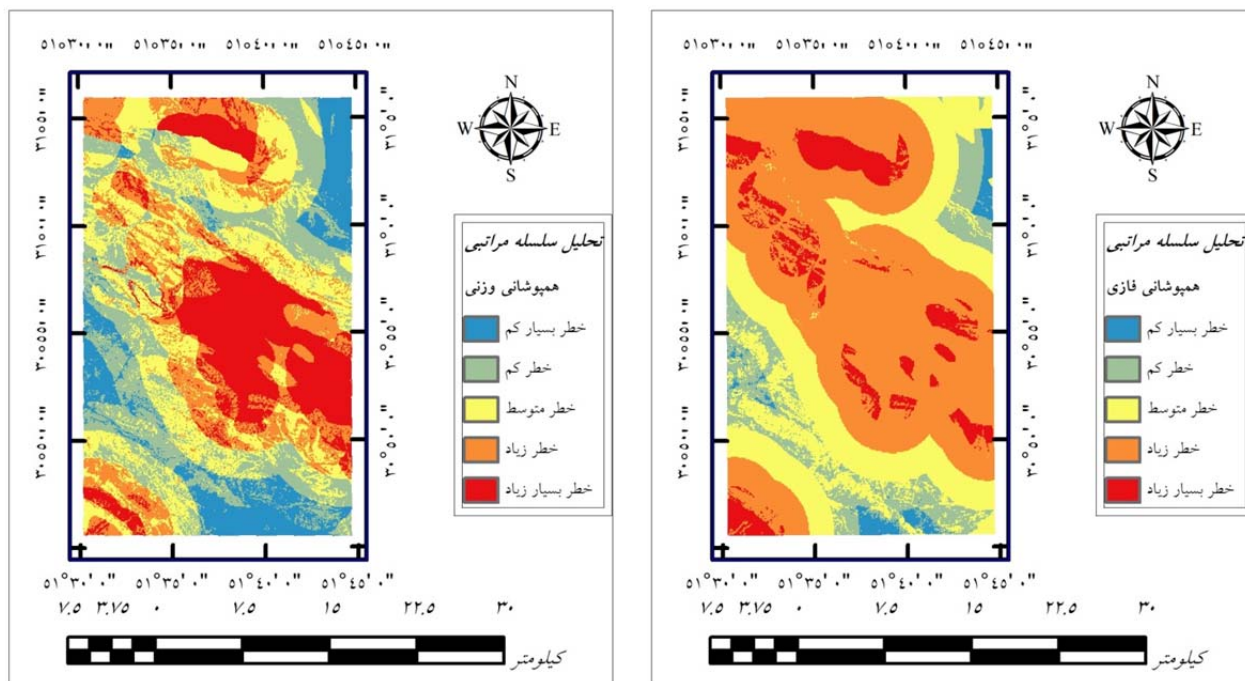
توجیه شود. تعدادی از زمین لغزش‌ها با الگویی در راستای آبراهه اصلی منطقه که از شمال غرب منطقه‌ی مورد مطالعه آغاز می‌شود و از مناطق مسکونی عبور می‌کند به وقوع پیوسته است. برداشت غیراصولی از منابع و سفره‌های آب زیرزمینی

بحث

طبق مشاهدات تعداد زیادی از زمین لغزش‌ها در محدوده‌ای با شیب کم و حتی تخت رخ داده‌اند. دلیل وقوع این زمین لغزش‌ها می‌تواند با لایه‌های مناطق مسکونی و آبراهه

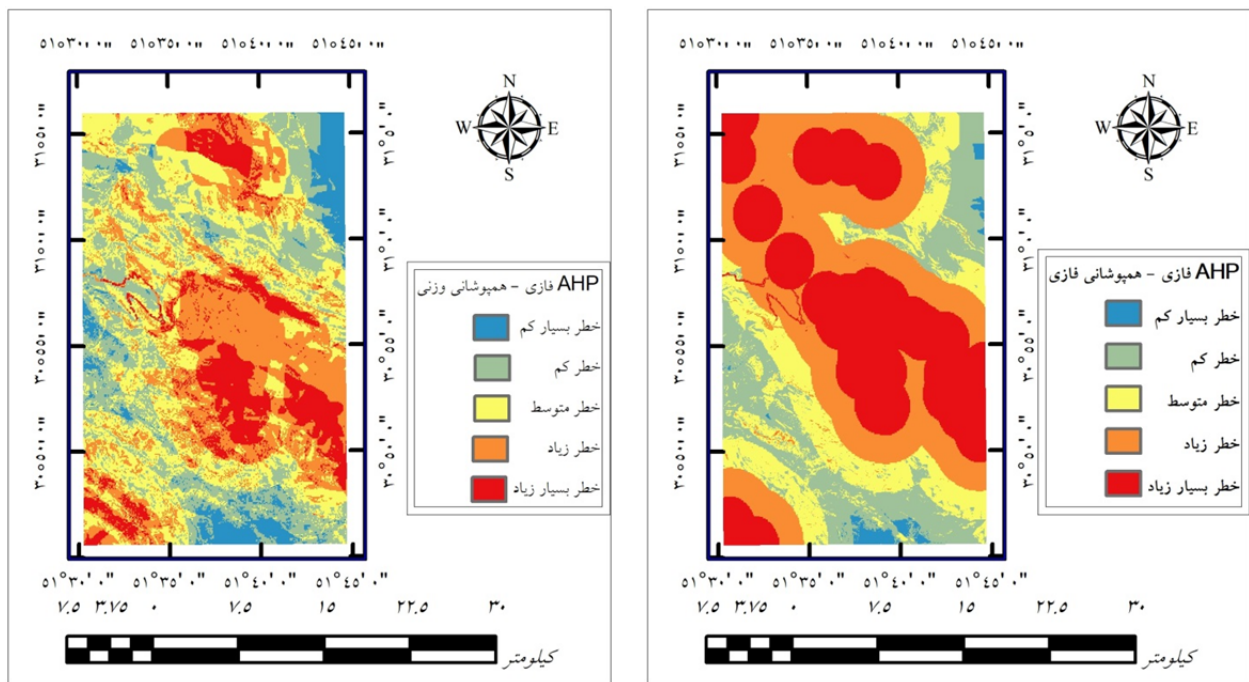
است. پس از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی منطقه مورد مطالعه، مطابق روش پیشنهادی روش تحلیل سلسله مراتبی با گردآوری نظر کارشناسان اجرا شد و وزن‌های نهایی هر لایه حاصل شد. این وزن‌ها در نهایت با استفاده از دو روش همپوشانی وزن‌دار و همپوشانی فازی در لایه‌ها اعمال شد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله مراتبی و تحت دو روش همپوشانی نامبرده شده، در شکل ۵ ارائه شده است.

شرایط را برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌کند. همچنین با توجه به حضور گسل زاگرس در محدوده مورد مطالعه، انتظار می‌رود قسمتی از زمین لغزش‌ها بر روی این گسل به وقوع بپیوندد. اما با توجه به مطالعات صورت گرفته در این مورد، به دلیل نوع ساختار این گسل و همچنین سمت و جهت فعالیت گسل زاگرس تأثیر حضور گسل در قسمت شمالی- شرقی مشاهده خواهد شد و به همین دلیل زمین لغزش قابل ملاحظه‌ای در قسمت جنوبی- غربی و همچنین بر روی گسل رخ نداده



شکل ۵. نتایج پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله مراتبی، همپوشانی فازی و همپوشانی وزن‌دار

Fig. 5. Zoning results by AHP, fuzzy overlap and weighted overlap



شکل ۶. نتایج پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله مراتبی - فازی، همپوشانی فازی و همپوشانی وزنی

Fig. 6. Results of zoning by Fuzzy-AHP, fuzzy overlap and weighted overlap

نتایج حاصل از این مرحله را نمایش می‌دهد. برای ارزیابی چهار نقشه پهنه‌بندی حاصل، از زمین‌لغزش‌های تاریخی ثبت‌شده در منطقه استفاده شد. جدول ۳ نتایج دقت هر روش را در پیش‌بینی این زمین‌لغزش‌ها نشان می‌دهد.

در ادامه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای به دست آوردن وزن‌های هر لایه بر اساس نظر کارشناسان اجرا شد. همچنین دو روش همپوشانی ذکرشده برای عمال وزن‌ها در لایه‌ها و ایجاد نقشه پهنه‌بندی نهایی بکار برده شد. شکل ۶

جدول ۳. صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

Table 3. Accuracy assessment for different landslide zoning maps

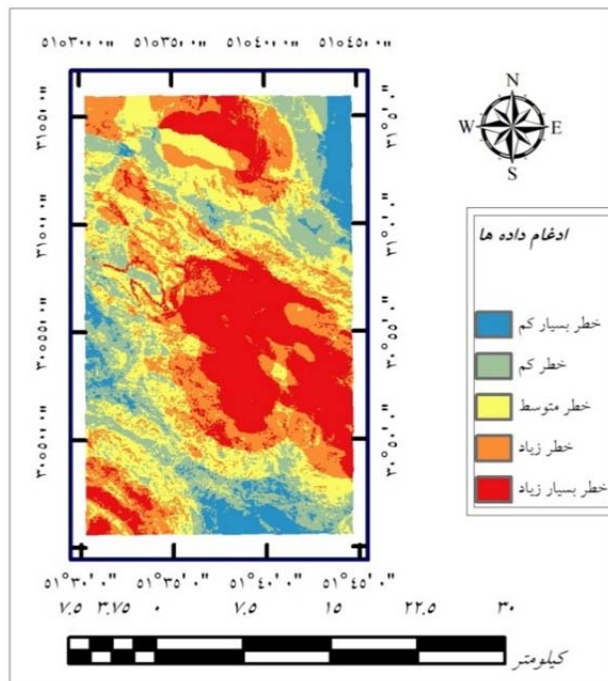
درصد زمین‌لغزش‌های موجود در هر روش Landslides percentage for methods				تعداد مجموع زمین‌لغزش‌ها Number of landslides	محدوده خطر Risk range
FAHP - همپوشانی فازی FAHP-fuzzy overlay	FAHP-همپوشانی وزنی FAHP-weighted overlay	AHP-همپوشانی فازی AHP-fuzzy overlay	AHP-همپوشانی وزنی AHP-weighted overlay		
۸۸٪	۷۵٪	۸٪	۸٪	۶۸	خطر زیاد و بسیار زیاد High and very high risk
۴٪	۱۱٪	۵٪	۳٪		خطر متوسط Medium risk
۸٪	۱۴٪	۹٪	۱۷٪		خطر کم و بسیار کم Low and very low risk

همپوشانی فازی و وزن‌دار، مشاهده می‌شود در نقشه‌هایی که از همپوشانی فازی استفاده شده است، باینکه پیش‌بینی مناسبی از

با توجه به نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی و همچنین

پیش‌بینی شده است که این مورد نشان از کاهش دقت این روش‌ها جهت پیش‌بینی دقیق زمین‌لغزش‌ها دارد.

زمین‌لغزش‌های تاریخی انجام شده است اما مناطق زیادی به‌عنوان مناطق با خطر زمین‌لغزش زیاد و بسیار زیاد



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حاصل از ادغام نتایج

Fig. 7. Landslide zoning map for fusion method

رأی‌گیری وزن‌دار با یکدیگر ادغام می‌شوند. شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی نهایی حاصل از ادغام را نمایش می‌دهد. به‌منظور مقایسه دقت روش پیشنهادی دقت نقشه پهنه‌بندی نهایی با تکیه بر زمین‌لغزش‌های تاریخی به دست آمد. جدول ۴ نتایج مربوط به پهنه‌بندی حاصل از ادغام را نمایش می‌دهد.

همچنین در نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش که از همپوشانی وزن‌دار استفاده شده است، روش تحلیل سلسله مراتبی ۸۰٪ زمین‌لغزش‌ها را در محدوده‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد پیش‌بینی کرد که نشان‌دهنده دقت بیشتر این روش در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی است. در نهایت چهار نتیجه حاصل از روش‌های مختلف پهنه‌بندی، به روش

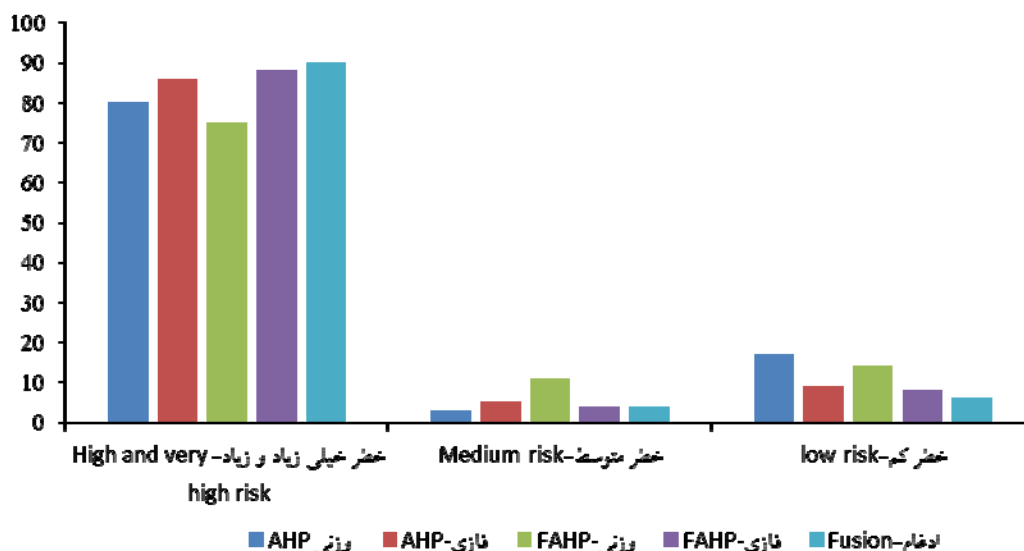
جدول ۴. صحت‌سنجی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

Table 4. Accuracy assessment landslide hazard maps

محدوده‌ی خطر Risk range	تعداد مجموع زمین‌لغزش‌ها Number of landslides	درصد زمین‌لغزش‌های موجود در محدوده (ادغام اطلاعات) Landslide percentage in range (data fusion)
خطر زیاد و بسیار زیاد High and very high risk		٪۹۰
خطر متوسط Medium risk	۶۸	٪۴
خطر کم و بسیار کم Low and very low risk		٪۶

خطر بسیار زیاد و زیاد طبقه‌بندی کرده است و همچنین درصد کمتری از زمین‌لغزش‌های تاریخی را در دسته خطر کم قرار داده است (شکل ۸).

دقت روش‌های مختلف پهنه‌بندی در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های تاریخی را به‌خوبی نشان می‌دهد که روش ادغام درصد بیشتری از زمین‌لغزش‌های تاریخی را در کلاس



شکل ۸. مقایسه دقت نقشه‌های پهنه‌بندی

Fig. 8. Accuracy comparison for different zoning methods

ادغام نتایج حاصل از این ۴ روش، دقت پهنه‌بندی به ۹۰٪ افزایش یافت. اگرچه استفاده از روش حداکثر رأی وزن‌دار جهت ادغام اطلاعات باعث افزایش دقت پهنه‌بندی شد اما استفاده از لایه‌های اطلاعاتی متفاوت و یا استفاده از روش ادغام اطلاعات فازی، موضوعاتی هستند که می‌توانند در آینده مورد توجه بیشتر قرار بگیرند.

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌های رخ داده در ایران و سایر کشورها، تلفات جانی و مالی و خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد کرده است. همین خسارات نشان از اهمیت بررسی و پیش‌بینی این پدیده دارد. در این تحقیق برای بررسی خطر زمین‌لغزش در محدوده سمیرم استان اصفهان از ۴ روش پهنه‌بندی متفاوت با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و همچنین با استفاده از همپوشانی وزن‌دار و همپوشانی فازی به کمک قضاوت کارشناس خبره و در نهایت ادغام نتایج حاصل از این روش‌ها استفاده شد. پس از بررسی نتایج و انجام صحت‌سنجی مشاهده شد پهنه‌بندی با روش تحلیل سلسله مراتبی و همپوشانی وزن‌دار، تحلیل سلسله مراتبی و همپوشانی فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی و همپوشانی وزن‌دار و در نهایت تحلیل سلسله مراتبی فازی و همپوشانی فازی به ترتیب دارای دقت ۸۰٪، ۸۶٪، ۷۵٪ و ۸۸٪ بودند و پس از

References

1. Abedini M, Tulabi S. 2018. Assessing LNRF, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: a comparative study of Nojian watershed in Lorestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77(11): 405. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7524-1>.
2. Achour Y, Boumezbeur A, Hadji R, Chouabbi A, Cavaleiro V, Bendaoud EA. 2017. Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8): 194. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>.

3. Ahmed B. 2015. Landslide susceptibility modelling applying user-defined weighting and data-driven statistical techniques in Cox's Bazar Municipality, Bangladesh. *Natural Hazards*, 79(3): 1707-1737. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1922-4>.
4. Anbalagan R, Singh B. 1996. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains - a case study from Kumaun Himalaya, India. *Engineering Geology*, 43(4): 237-246. doi:[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00033-6).
5. Asgharizadeh MJ. 2018. Multi-criteria decision making techniques. First Edition. University of Tehran Press. 562 p. (In Persian).
6. Baharvand S, Soori S. 2016. Landslide hazard zonation using artificial neural network (Case study: Sepiddasht-Lorestan, Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science)*, 6(4): 15-31. (In Persian).
7. Bera A, Mukhopadhyay BP, Das D. 2019. Landslide hazard zonation mapping using multi-criteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from Eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim. *Natural Hazards*, 96(2): 935-959. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03580-w>.
8. Chandra DK, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu IC, Dhital MR, Althuwaynee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65(1): 135-165. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0347-6>.
9. Dahal RK, Hasegawa S, Nonomura A, Yamanaka M, Dhakal S, Paudyal P. 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3): 496-510. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>.
10. Dai FC, Lee CF. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3): 213-228. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3).
11. Fauvel M, Chanussot J, Benediktsson J. 2006. A combined support vector machines classification based on decision fusion. In: 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Citeseer. 2494-2497.
12. Fell R, Corominas J, Bonnard C, Cascini L, Leroi E, Savage W. 2008. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng Geol*, 102(3-4): 85-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>.
13. Jiang W, Rao P, Cao R, Tang Z, Chen K. 2017. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation. *Journal of Geographical Sciences*, 27(4): 439-462. doi:<https://doi.org/10.1007/s11442-017-1386-4>.
14. Kanungo DP, Arora MK, Sarkar S, Gupta RP. 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, 85(3): 347-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.004>.
15. Kayastha P, Dhital MR, De Smedt F. 2012. Landslide susceptibility mapping using the weight of evidence method in the Tinau watershed, Nepal. *Natural Hazards*, 63(2): 479-498. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0163-z>.
16. Kumar R, Anbalagan R. 2016. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India*, 87(3): 271-286. doi:<https://doi.org/10.1007/s12594-016-0395-8>.
17. Kuncheva LI, Whitaker CJ. 2003. Measures of Diversity in Classifier Ensembles and Their Relationship with the Ensemble Accuracy. *Machine Learning*, 51(2): 181-207. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1022859003006>.
18. Lynn H, Bobrowsky PT. 2008. The landslide handbook: a guide to understanding landslides. US Geological Survey Reston, 129 p.
19. Rahmati M, Zand F. 2018. Landslide hazard zonation using geographic information system landslide (Case study: Robat-Siahpoush rural district, Lorestan province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science)*, 8(4): 63-75. (In Persian).

20. Ruta D, Gabrys B. 2000. An overview of classifier fusion methods. *Computing and Information systems*, 7(1): 1-10.
21. Sharma S, Mahajan AK. 2018. Comparative evaluation of GIS-based landslide susceptibility mapping using statistical and heuristic approach for Dharamshala region of Kangra Valley, India. *Geoenvironmental Disasters*, 5(1): 4. doi:<https://doi.org/10.1186/s40677-018-0097-1>.
22. Soeters R, Van Westen C. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. In: *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C., U.S.A. 129-177 p.
23. Subedi P, Subedi K, Thapa B, Subedi P. 2019. Sinkhole susceptibility mapping in Marion County, Florida: Evaluation and comparison between analytical hierarchy process and logistic regression based approaches. *Scientific reports*, 9(1): 1-18. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43705-6>.
24. Vojteková J, Vojtek M. 2020. Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1): 131-148. doi:<https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233>.
25. Wu Y, Li W, Liu P, Bai H, Wang Q, He J, Liu Y, Sun S. 2016. Application of analytic hierarchy process model for landslide susceptibility mapping in the Gangu County, Gansu Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(5): 422. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-015-5194-9>.



Original
paper

Landslide hazard zonation based on fuzzy-analytical hierarchy process (FAHP) and Multi-criteria decision analysis (Case study: Marbar river basin)

Mohammad Reza Sajjadi, Ahmad Ahmadi, Behnaz Bigdeli

Received: 4 January 2020 / Accepted: 5 August 2020

Available online 1 December 2020

Abstract

Background and Objective Landslide as a terrifying disaster can cause human and economic losses and the destruction of cultural and natural heritage. While the need for a method to directly predict the location of landslides has vital importance but currently, the prediction is not possible. The zoning of landslide hazard can be an efficient indirect approach. This paper proposes a method for landslide hazard zoning based on the decision fusion and Analytical Hierarchy Process (AHP) in the Semirrom of Isfahan province.

Materials and Methods In the first step of the proposed methodology of this research, GIS information layers of the study area are collected. Then by using of fuzzy and non-fuzzy hierarchical analysis method and based on expert knowledge, the layers and sub-layers were weighted. In addition, two different overlay methods including weighted overlay and fuzzy overlay are applied for zoning of the AHP and fuzzy AHP results. Combination of both AHP and fuzzy AHP methods with two overlay methods create four zoning maps for the area. The Fuzzy Overlay tool makes it possible for the analysis of the possibility of a phenomenon belonging to multiple sets in a multi-criteria overlay analysis. Not only the fuzzy overlay determines the influential members in the occurrence of a phenomenon but also analyzes the relationships between the memberships of several sets. Weight overlapping is one of the most effective methods used to overlay analysis to address multiple-criteria questions such as location selection and appropriate models. This method will adopt the values in the input raster to a common evaluation criterion for suitability or priority, risk, or appropriate scale.

M.R. Sajjadi ¹, A. Ahmadi ², B. Bigdeli(✉) ³

1. MSc. Student of Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. Associate Professor, Department of Water and Environment, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3. Assistant Professor, Department of Geotechnic, Road and Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

e-mail: bigdeli@shahroodut.ac.ir

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1399.11.4.2.2>

The cell values of each row of inputs increase with the increase of importance of the raster. It also combines the resultant cells to produce the output raster. After obtaining four zoning maps, a decision fusion strategy is applied for the fusion of these maps. Decision fusion systems or in general data fusion or combination strategies combines various decisions made from different methods or data to ultimately make decisions that are more precise and reliable than the result obtained from a single decision. One of the most important and effective methods for integrating decisions is based on the concept of voting. In this method, one vote is assigned to each decision. The simplest form of this method is known as the majority voting. In this method, if all decision-making methods have the same weight and accuracy, the decision of all strategies for an input sample is considered to be the same weight, and the decision with the highest score will be introduced as the winning class for the input sample.

Results and Discussion The study area is located approximately 60 kilometers from Semirrom city. Also, this area is located in Marbur River watershed. Generally, different factors can be effective in slope instability and landslide, which in this research, slope, aspect, distance to fault, distance to roads, distance to drainages, distance to residential areas, lithology and rainfall were selected for assessing the landslide phenomenon. These effective layers are obtained from information data such as Digital Elevation Model (DEM), fault lines, rivers location, streams location, residential areas, roads location, lithology and synoptic stations. The digital elevation model (DEM) of the region is prepared with 30 meters pixel size from the USGS website. By using DEM in GIS, slope

and aspect maps in five classes are created. Faults map of the studied area is obtained from 1:100000 geology map of the Geology organization center of the country. Also, by using Euclidean distance in GIS, distance to faults layer is created in five classes. For preparation of rainfall map, the rainfall content of the studied area has been used from the average rainfall data of the Iran Meteorological Organization in the last 10 years of 19 meteoroidal stations. Based on the rainfall information, the area is divided into five classes. Roads map of the area is obtained from 1:25000 map of National Cartographic Center. The distance to road layer is created from roads map of the area and divided into five classes. For drainage and residential area maps, a 1:25000 map from NCC is applied. Also, distance to residential area layer is created by this map in five classes. For assessment of the lithology in this area, a 1:100000 geology map is applied.

Conclusion Results showed that the zoning methods provide satisfactory results, but eventually the results were improved with the decision fusion strategy. For validation our finding the results were compared with historical landslides. Based on the results, it was concluded that zoning by four different combinations: hierarchical analysis and overweight analysis, hierarchical analysis and fuzzy overlay, fuzzy hierarchical analysis and weighted overlay, and fuzzy hierarchical analysis and fuzzy overlaying, have a precision of 80%, 86%, 75% and 88% respectively. After integrating the results of these four methods, the accuracy of the zoning increased to 90%.

Keywords: Fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), Zoning, Landslide hazard, Marbar river basin