

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در استان تهران با استفاده از روش‌های داده محور و تحلیل سلسله مراتبی

فرناز کامران‌زاد^۱، عماد محصل افشار^۱، مسعود مجرب^۲ و حسین معماریان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

زمین لغزش یکی از پدیده‌های طبیعی است که هر سال سبب ایجاد خسارات مالی و جانی فراوانی در سطح کشور می‌شود. از این رو تشخیص مناطق مستعد لغزش، برای به کارگیری روش‌های پیش‌گیری یا مقابله با ناپایداری دامنه‌ها به منظور کاهش خطر و ریسک حاصل از آنها، بسیار اهمیت دارد. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش یکی از روش‌های غیرمستقیم و کارآمد در شناسایی این مناطق است. هدف از این مطالعه، استفاده از روش‌های تحلیل آماری (داده‌محور) و قضاوت کارشناسی (تحلیل سلسله مراتبی) برای تعیین میزان خطر و تهیه نقشه پهنه‌بندی در محدوده استان تهران است. به این منظور، ابتدا از میان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین لغزش، ۶ عامل مقدار شیب، جهت شیب، جنس مصالح زمین‌شناسی، فاصله از گسل، شتاب زمین لرزه و میزان بارندگی که تهیه داده‌هایشان برای همه استان تهران امکان‌پذیر بود، بر پایه قضاوت مهندسی در محیط GIS کلاسه‌بندی شدند. در روش داده‌محور، با قطع لایه‌های اطلاعاتی با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و در روش AHP، بر پایه قضاوت کارشناس خبره، لایه‌ها و زیرلایه‌های اطلاعاتی، وزن‌دهی و با هم تلفیق شدند و سپس برای هر روش، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محیط GIS تهیه شد. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج نشان داد که در روش داده‌محور، ۹۲/۹٪ از زمین لغزش‌ها در محدوده خطرناک (مجموع پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر نقشه) با مساحت ۷۱۳۵/۱۵ کیلومتر مربع (۳۷/۲٪ از مساحت کل استان تهران) و در روش AHP، ۹۶/۵٪ از زمین لغزش‌ها در محدوده خطرناک با مساحت ۱۰۳۴۴/۷ کیلومتر مربع (۵۳/۹٪ از مساحت کل استان تهران) قرار گرفته‌اند. در پایان با تقسیم درصد تعداد زمین لغزش در پهنه خطرناک به درصد مساحت پهنه خطرناک در کل مساحت استان تهران، نسبت عددی ۲/۵ برای روش داده‌محور و نسبت عددی ۱/۷۹ برای روش AHP محاسبه شد. مقایسه مقادیر نسبت عددی دو روش فوق نشان داد که روش داده‌محور با نسبت عددی بزرگ‌تر، جواب بهتری داشته است. زیرا نشان‌دهنده آن است که در روش AHP، درصد بالایی از زمین لغزش‌ها را در مساحت کوچک‌تری به‌عنوان پهنه خطرناک پوشش داده و بنابراین در تعیین پهنه خطرناک نسبت به روش AHP دقت بالاتری داشته است.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، خطر زمین لغزش، داده محور، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، استان تهران، GIS.

*نویسنده مسئول: فرناز کامران‌زاد

E-mail: f_kamranzad@ut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

مشکل پیچیده و چندبعدی خطر زمین لغزش است که نیاز به تخصص‌های مختلف علوم زمین به‌ویژه زمین‌ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی، آمار، علوم کامپیوتر، فیزیک، فناوری اطلاعات و اقتصاد دارد (Guzzetti et al., 1999). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، تقسیم‌بندی سطح زمین به نواحی مجزای همگن و رتبه‌بندی این نواحی بر پایه میزان خطر واقعی یا بالقوه ناشی از حرکت توده‌ای روی شیب دامنه‌هاست (Varnes, 1984). بنابراین نقشه خطر زمین لغزش به طراحان و مهندسان در جهت انتخاب مکان مناسب برای اجرای طرح‌های توسعه کمک بزرگی می‌کند و نتایج آن می‌تواند به عنوان داده اولیه برای کمک به مدیریت ناپایداری‌ها و طراحی کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرد (Pradhan, 2011).

تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در کشور ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به کارهای پیشین انجام شده به روش AHP (بای و حاجی‌میررحیمی، ۱۳۸۷؛ حاتمی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۱)، روش آمار دومتغیره (نصرآزادانی و شیرانی، ۱۳۸۸)، روش نیلسن (شریفی و دریاباری، ۱۳۸۴)، روش رگرسیون چند متغیره (جوادی و همکاران، ۱۳۹۱)، روش مدل آنتروپی (مقیم و همکاران، ۱۳۹۱)، روش فاکتور اطمینان (بهشتی‌راد و همکاران، ۱۳۸۸)، روش منطق فازی (فرداد و همکاران، ۱۳۹۰) و روش شبکه عصبی مصنوعی (راکعی و همکاران، ۱۳۸۶؛ سوری و همکاران، ۱۳۹۰) اشاره کرد.

هدف از این مطالعه، پهنه‌بندی خطر رخداد زمین لغزش در استان تهران به کمک دو روش داده‌محور (Data Driven) و تحلیل سلسله مراتبی AHP (Analytical Hierarchy Process) است. به علت سابقه رخداد لغزش‌های بسیار

حرکت توده‌ای مواد تشکیل‌دهنده زمین، از یک شیب به سمت پایین را زمین لغزش یا ناپایداری دامنه می‌نامند (IAEG Commission on Landslides, 1990). این حرکت رو به پایین مواد سطحی، تحت تأثیر گرانزش زمین صورت گرفته و میزان حرکت این مواد با حضور آب موجود در رسوبات افزایش می‌یابد (Pareta et al., 2012). زمین لغزش هر سال در بیشتر استان‌های کشور موجب خسارات اقتصادی به راه‌ها، خطوط راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آب‌رسانی، تأسیسات معدنی، تأسیسات استخراج، پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی درون شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها می‌شود یا آنها را مورد تهدید قرار می‌دهد (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۱۳۹۰). بر پایه یک برآورد اولیه، هر سال ۵۰۰ میلیارد ریال خسارات مالی از راه زمین لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود و این در صورتی است که از بین رفتن منابع طبیعی غیرقابل بازگشت به شمار آورده نشوند (کمک‌پناه و همکاران، ۱۳۷۳). بنابراین، این رقم تنها به خسارات مستقیم اشاره دارد و خسارات غیرمستقیم، مانند هدر رفتن خاک که یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های ملی است، افزایش حجم رسوبات در پشت سدها، تغییر بوم‌سامانه (اکوسیستم) مناطق و از بین رفتن جنگل‌ها، خساراتی بیش از این رقم را بر اقتصاد کشور تحمیل می‌کند (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۱۳۸۱). از این رو در دهه‌های اخیر، تحلیل و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، توجه بسیاری از مهندسان و پژوهشگران حوزه علوم زمین را به خود معطوف کرده است. هدف از چنین بررسی‌هایی، به دست آوردن راه حلی برای

ترانشه‌برداری و ایجاد گودال اشاره کرد. در این مطالعه، به‌منظور پهنه‌بندی خطر رخداد زمین‌لغزش در استان تهران، از میان عوامل یادشده، ۶ عامل مقدار شیب، جهت شیب، میزان بارندگی، شتاب زمین‌لرزه، جنس زمین‌شناسی و فاصله از گسل، که از مهم‌ترین علل ناپایداری دامنه هستند و تهیه داده‌هایشان برای کل استان تهران ممکن بود، به عنوان عوامل ایجاد لغزش در نظر گرفته و نقش هر یک به‌صورت رقومی در بانک داده‌ها آماده‌سازی شد (شکل ۲). برای پردازش داده‌های خام موجود و کاهش عدم قطعیت‌ها در محاسبات بعدی و تلفیق صحیح لایه‌های اطلاعاتی، ابتدا فضای محاسباتی یعنی نقشه‌های رستر هر یک از عوامل مؤثر در محدوده مورد مطالعه، با اندازه پیکسل‌های یکسان تهیه شد که در این مطالعه از اندازه پیکسل 50×50 متر برای رسم نقشه‌های رستر ۶ عامل مؤثر لغزش در محدوده استان تهران استفاده شده است. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر، باید برای هر لایه اطلاعاتی، با کمک معیاری مناسب، تعدادی زیرلایه (کلاس) تعریف شود. سپس به کمک روش‌های داده‌محور و نظر کارشناس خبره، وزن هر یک از لایه‌های اصلی و زیرلایه‌هایشان تعیین و در پایان با ترکیب آنها، میزان خطر در هر پیکسل از نقشه برآورد شد. در ادامه به چگونگی تهیه و آماده‌سازی هر یک از عوامل مؤثر در زمین‌لغزش پرداخته می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، تا زمان این مطالعه، ۸۵ زمین‌لغزش در استان تهران به‌طور دقیق ثبت شده است (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۹۲) که بیشترشان در محدوده شمال استان و در شهرستان‌های شمیرانات و ساوجبلاغ متمرکزاند (شکل ۲-الف).

۳-۱. شیب

شیب یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در لغزش مواد از سطح زمین است. بر پایه ریخت‌شناسی، هر منطقه مطالعاتی ممکن است دارای شیب‌های گوناگونی باشد. استان تهران در محدوده میان پوسته چین‌خورده ارتفاعات رشته‌کوه البرز در شمال و نواحی پست دشتی در جنوب آن واقع است. به‌طور کلی استان تهران را می‌توان بر پایه ریخت‌شناسی آن شامل ۳ نوع شیب مختلف دانست. این استان دارای یک شیب عمومی در جهت شمال به جنوب است. در نواحی شمالی و مرتفع استان به علت وجود چین‌خوردگی‌ها و ایجاد ارتفاعات بلند، شیب‌های محلی تند بسیار زیاد است و از سویی شیب محلی در جنوب آن به دلیل منتهی شدن به دشت هموار ری و شهریار، بسیار آرام است. به‌منظور بررسی تأثیر عامل شیب در رخداد زمین‌لغزش، ابتدا نقشه مقدار شیب بر پایه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) استان تهران (STRM) تهیه و با توجه به آن، تغییرات شیب متوسط دامنه‌ها در حدود صفر تا ۷۲ درجه تعیین شد (شکل ۲-ب). به‌منظور ایجاد رده‌بندی مقادیر شیب دامنه‌ها بر پایه یک روند منطقی، ابتدا نمودار ستونی شیب دامنه‌ها رسم شد (شکل ۳). در این نمودار سه روند در تغییرات فراوانی داده‌ها دیده می‌شود. در بخش اول نمودار و برای شیب‌های صفر تا ۱۰ درجه، روند نمودار به‌صورت نمایی کاهشی است. برای شیب‌های متوسط ۱۰ تا ۲۵ درجه، فراوانی تقریباً ثابت و برای شیب‌های بزرگ از ۲۵ تا ۷۲ درجه، رفتار فراوانی نمودار دوباره به‌صورت کاهشی است. بنابراین بر پایه روند یادشده تغییرات شیب نمودار ستونی و وجود مرز تقریباً قابل تشخیص در میان این روندها، ۳ رده (زیرلایه اطلاعاتی) به عنوان شیب کم (۰-۱۰ درجه)، شیب متوسط (۱۰-۲۵ درجه) و شیب زیاد (۲۵-۷۲ درجه) برای این منطقه تعریف شد (شکل ۴).

۳-۲. جهت شیب

جهت شیب نشان‌دهنده تأثیر متفاوت میزان دریافت نور خورشید، بادهای گرم و خشک و میزان بارش در جهات مختلف است (سپهوند، ۱۳۸۹). رده‌بندی جهت شیب با توجه به حضور عوامل مختلف در جهات مختلف شیب دامنه و تفاوت در روند گسترش دامنه‌ها صورت می‌گیرد. دامنه کوه‌های استان تهران در رشته‌کوه البرز، دارای روند عمومی خاوری-باختری هستند و جهت شیب عمومی دره‌ها شمالی-جنوبی است (شکل ۲-ت). واضح است که به دلیل قرارگیری منطقه در نیم‌کره شمالی، دامنه‌های جنوبی نسبت به دامنه‌های شمالی آن، تابش بیشتری از نور

قبلی، وجود عوامل مؤثر فعال در ناپایداری دامنه‌ها و نیز الگوی مترامک سکونت و شهرنشینی و سازه‌های مهم مهندسی، بررسی خطر و ریسک زمین‌لغزش در این استان اهمیت بسیار بالایی دارد. از این رو در این مقاله، ابتدا داده‌های مربوط به ۶ عامل مؤثر در زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، جنس زمین‌شناسی، بارندگی، شتاب زمین‌لرزه و فاصله از گسل برای کل محدوده استان تهران گردآوری شده است. سپس با قطع نقش پراکنش زمین‌لغزش‌ها در روش داده‌محور و قضاوت کارشناسی در روش AHP، لایه‌ها و زیرلایه‌های اطلاعاتی وزن‌دهی و با تلفیق لایه‌های وزن‌دار برای هر روش، نقشه پهنه‌بندی خطر رخداد زمین‌لغزش، شامل ۴ پهنه با پتانسیل بسیار پرخطر، پرخطر، خطر متوسط و کم‌خطر تهیه و تفسیر شده است. در پایان، به‌منظور مقایسه دقت دو روش در برآورد ناحیه خطرناک زمین‌لغزش (مجموع پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر نقشه) در استان تهران، نسبت عددی NR_R محاسبه شده است.

۲- معرفی محدوده مورد مطالعه

استان تهران با مساحتی حدود ۱۹۱۹۶ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی ۵۰ تا ۵۳ درجه خاوری و ۳۵ تا ۳۶/۵ درجه شمالی واقع است (شکل ۱). این استان به دلیل داشتن ویژگی‌های گوناگون سنگ‌شناختی، زمین‌ساختی، زمین‌ریخت‌شناختی، توپوگرافی، لرزه‌خیزی و شرایط گوناگون آب‌وهوایی، مستعد خطر زمین‌لغزش است و به دلیل تراکم شهرنشینی، از دید ریسک زمین‌لغزش نیز بسیار اهمیت دارد. از دید ساختاری بخش شمالی استان به پهنه زمین‌ساختی البرز و بخش‌های جنوبی آن به پهنه ایران مرکزی نسبت داده می‌شود. عبور گسل‌های بزرگ مشا و شمال تهران در شمال و گسل ایوانکی در جنوب این استان، گوناگونی در شیب و جهت شیب دامنه‌های رشته‌کوه البرز و همچنین تناوب لایه‌های توف سبز و شیل‌های توفی، نهشته‌های ماسه‌ای سفت نشده، تراس‌های کهن و گدازه‌های بازالتی، شرایط مساعدی را برای ناپایداری دامنه‌ها به‌ویژه در شمال این استان فراهم کرده است. مهم‌ترین مناطق لغزشی استان تهران از دید کمیت و کیفیت به ترتیب عبارتند از: حوضه‌های آبخیز طالقان، سد لتیان، سد کرج، دماوند و ماملو، فیروزکوه، سد لار، رودخانه کردان و شمال تهران (فتاحی اردکانی، ۱۳۷۳). مخاطرات لغزش در تهران سابقه زیادی دارد. برای نمونه می‌توان به لغزش‌های کهن گلابدره در شمال شهر تهران، لغزش بزرگ مبارک‌آباد در جاده هراز و لغزش تار در شمال خاور دماوند اشاره کرد که احتمال می‌رود بر اثر فعالیت گسل مشا و رخداد زمین‌لرزه در این مناطق رخ داده باشند. طی سال‌های اخیر نیز لغزش‌های بسیاری در محدوده استان تهران به‌ویژه به علت افزایش کاربری زمین‌ها صورت گرفته است؛ مانند لغزش‌های دروازه سنگی اوشان-فشم در سال ۱۳۸۳، شهرک مجلس فرحزاد در سال ۱۳۸۳، میگون در اسفند ۱۳۸۴، سد لتیان در سال ۱۳۸۴، آتشگاه کرج در سال ۱۳۸۶. تاکنون تعداد زیادی زمین‌لغزش در استان تهران شناسایی شده‌اند که از این میان ۸۵ زمین‌لغزش به‌طور دقیق به همراه جزئیات و عوامل ایجادکننده آنها ثبت شده‌اند (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۹۲) و دارای گزارش تفصیلی هستند که داده‌های این ۸۵ زمین‌لغزش مبنای کار در این پژوهش است.

۳- معرفی و آماده‌سازی داده‌ها

اولین گام در تحلیل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، در اختیار داشتن داده‌ها و اطلاعاتی در مورد زمین‌لغزش‌های پیشین رخ داده در منطقه مورد مطالعه و عوامل مؤثر در رخداد آنهاست. عوامل زیادی می‌توانند در ناپایداری دامنه‌ها نقش داشته باشند که از آن میان می‌توان به مقدار شیب دامنه، جهت شیب، جنس و ترکیب کانی‌شناسی و مصالح زمین‌شناسی، سطح آب زیرزمینی، زمین‌لرزه، فاصله از گسل، کابری زمین‌ها، ارتعاش ناشی از کار ماشین‌آلات ساختمانی یا ترافیک، وجود آبراهه‌ها، بارش باران و برف، چرخه هوازدگی (مرطوب شدن، خشک شدن و انحلال)، فرونشست زمین،

نتیجه رویداد زمین لرزه هستند (Pedram, 1991). در بسیاری از زمین لرزه‌ها، خسارات غیرمستقیم مانند رخداد زمین لغزش، برابر و یا حتی بیش از خسارات مستقیم ناشی از خود زمین لرزه بوده است (مهدوی فر، ۱۳۸۱). برای بررسی اثر متغیر شتاب زمین لرزه از نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لرزه در ایران (Tavakoli & Ghafory-Ashtiany, 1999) استفاده شد. از آنجایی که بیشتر زمین لغزش‌های ثبت شده در استان تهران در محدوده شمالی استان در پهنه با خطر بسیار بالا (۰/۳۵g) ثبت شده‌اند و دو پهنه خطر دیگر (۰/۲۵g و ۰/۳g) در ناحیه دشت و دارای تعداد کمی زمین لغزش هستند (شکل ۲-ج)، با در نظر گرفتن این مسئله، کل محدوده استان به دو پهنه با شتاب ۰/۳g-۰/۲g و ۰/۳۵g رده‌بندی شد (شکل ۹).

۳-۶. میزان بارندگی

بارندگی یکی از عوامل مؤثر در ایجاد ناپایداری دامنه‌هاست. بیشترین تعداد گسیختگی دامنه‌ها پس از بارندگی‌های سنگین و یا ذوب برف در بهار و به علت نفوذ آب در شکاف‌ها صورت می‌گیرد (شادفر و یمانی، ۱۳۸۶). برای بررسی اثر بارندگی در رخداد زمین لغزش‌ها در استان تهران، ابتدا آمار متوسط بارش ماهیانه سازمان هواشناسی کشور برای ۵۰ سال گذشته در استان تهران تهیه (شکل ۲-ث) و نمودار ستونی متوسط بارندگی ماهانه رسم شد (شکل ۱۰). بر پایه این نمودار، در نقاط مختلف استان تهران، مقادیر بارندگی متوسط ماهانه میان ۱۲۷ تا ۷۸۰ میلی‌متر است. به کمک تغییرات روند نمودار ستونی می‌توان سه رده برای مقادیر بارندگی تعریف کرد. بخش اول نمودار ستونی که مربوط به بارندگی کم حدود ۲۷۰-۰ میلی‌متر است، بیشترین فراوانی را نشان می‌دهد. دسته دوم مقادیر بارندگی متوسط است که محدوده ۵۰۰-۲۷۰ میلی‌متر را دربر می‌گیرد و دسته سوم که فراوانی کمتری را نسبت به دو بخش پیش نشان می‌دهد، مربوط به مقادیر بارندگی زیاد در حدود بیشتر از ۵۰۰ میلی‌متر است. بنابراین بر این اساس، ۳ رده به عنوان زیرلایه بارندگی تعریف شد (شکل ۱۱).

۴-۴. معرفی روش‌ها

در این مطالعه به منظور تعیین میزان خطر رخداد زمین لغزش در نقاط مختلف استان تهران از دو روش داده‌محور و تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است؛ به طوری که تحلیل خطر در روش داده‌محور بر پایه آمار داده‌های زمین لغزش‌های ثبت شده و در روش AHP بر پایه تصمیم‌گیری چندمعیاری توسط قضاوت کارشناس خبره صورت می‌گیرد.

۴-۱. روش داده‌محور

مبنای اصلی محاسبات در هر مطالعه آماری با کمک روش داده‌محور، وجود اطلاعاتی در مورد تعداد و مکان رخداد پدیده‌ها و عوامل مؤثر در ایجاد آنهاست. در این روش‌ها رابطه متغیر مؤثر در رخداد زمین لغزش با پراکندگی زمین لغزش‌ها، مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد (اشقلی فراهانی، ۱۳۸۰). بنابراین، از اطلاعات رخدادهای پیشین یک پدیده برای وزن‌دهی به عوامل اصلی مؤثر در ایجاد آن پدیده و وزن‌دهی به زیرلایه‌هایشان استفاده می‌شود و وزن و سهم مشارکت هر یک از متغیرهای مؤثر در رخداد زمین لغزش به دست می‌آید (افلاکی، ۱۳۶۸). در روش داده‌محور اگر فرض شود چندین عامل مهم در ایجاد یک پدیده نقش داشته باشند، وزن هر یک از این عوامل اصلی از تقسیم تعداد دفعات تکرار آن عامل به تعداد کل رخداد عوامل مؤثر به دست می‌آید. برای به دست آوردن وزن زیرلایه‌های هر عامل اصلی مؤثر، مسئله به این صورت روشن می‌شود که اگر برای نمونه، از یک پدیده (مانند زمین لغزش) ۲۰ عدد نمونه رخداد مطلوب وجود داشته باشد که تعدادی عامل اصلی در ایجاد آن پدیده نقش داشته و یکی از آن عوامل اصلی (مانند جنس زمین‌شناسی) سه زیرلایه I، II و III (مانند خاک، سنگ نرم و سنگ سخت) داشته باشد، وزن هر زیرعامل برابر نسبت نمونه‌های منتسب به آن گزینه به کل نمونه‌های

خورشید را در طول روز دریافت می‌کنند و آب و هوای خشک‌تری دارند و در برابر آن دامنه‌های شمالی آن مرطوب و پرباران‌تر هستند. از سویی به دلیل جهت حرکت عمومی بادها از باختر به خاور، میزان بارش‌های جوی در دامنه‌های باختری نیز بیشتر از دامنه‌های خاوری است. بنابراین به دلیل گوناگونی شرایط آب‌وهوایی در ۴ جهت اصلی رشته کوه البرز، جهات شیب دامنه‌ها به ۴ رده شمالی، جنوبی، خاوری و باختری رده‌بندی شدند (شکل ۵).

۳-۳. جنس زمین‌شناسی

در ابتدا داده‌های جنس زمین‌شناسی از نقشه زمین‌شناسی استان تهران (احدنژاد، ۱۳۸۱) استخراج شد (شکل ۲-ح). برای رده‌بندی جنس مواد زمین‌شناسی مؤثر در ناپایداری دامنه‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد. در بسیاری از مطالعات پیشین این رده‌بندی بر پایه سازندهای اصلی یا لایه‌های زمین‌شناسی مهم موجود در منطقه انجام شده است (راکعی و همکاران، ۱۳۸۶؛ سوری و همکاران، ۱۳۹۰). اما از آنجایی که مفهوم لغزش در مهندسی ژئوتکنیک، به عدم مقاومت توده سنگی یا خاکی واقع در دامنه در برابر نیروهای محرک بر می‌گردد، در این مطالعه سعی شده است تا برای ایجاد یک رده‌بندی منطقی، از مشخصات ژئومکانیکی مصالح و قضاوت مهندسی استفاده شود. به این منظور در ابتدا فهرست ۷۳ نوع جنس مصالح زمین‌شناسی موجود در استان تهران از نقشه زمین‌شناسی استخراج شد. سپس با کمک جداول ژئوتکنیکی موجود (معماریان، ۱۳۸۷) مقاومت فشاری تک‌محوری مانند هر ۷۳ نوع جنس به طور تقریبی برآورد شد. از دید ژئوتکنیکی، مقاومت فشاری تک‌محوری ۱ مگاپاسکال مرز میان خاک و سنگ تعریف می‌شود. بنابراین مصالح موجود در منطقه با مقاومت فشاری تک‌محوری کمتر از ۱ مگاپاسکال به عنوان خاک و بالاتر از این حد به عنوان سنگ دسته‌بندی شدند. سپس سنگ‌ها نیز بر پایه جداول سختی و مقاومت هر نوع جنس، به دو دسته سنگ‌های نرم و سخت تقسیم شدند (جدول ۱). در پایان، لایه‌ها بر پایه مقاومت و سختی مصالح زمین‌شناسی به سه رده خاک، سنگ نرم و سنگ سخت تقسیم شدند (شکل ۶).

۳-۴. فاصله از گسل

گسل‌ها در ایجاد و یا فعال‌سازی دوباره مناطق دارای پتانسیل لغزش نقش مؤثری دارند. خردشدگی و برشی شدن در مناطق گسلی، نفوذ آب از این مناطق به درون دامنه‌ها، پدایش ناپیوستگی در پیرامون گسل و اختلاف فرسایش در دامنه‌ها از جمله اثراتی است که می‌توان به آنها اشاره کرد. حرکت گسل نیز می‌تواند به نوعی شروع لغزش در دامنه باشد (راکعی و همکاران، ۱۳۸۶). بنابراین فاصله از گسل نقش مهمی در رخداد لغزش دارد. برای محاسبه حریم گسل، ابتدا نقشه گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) (شکل ۲-چ) تهیه شد و بر پایه آن، نمودار ستونی طول گسل‌های فعال (L_p) موجود در استان تهران به دست آمد (شکل ۷). بر پایه تغییرات نمودار ستونی طول گسل‌ها، ۳ مرز میان فراوانی‌ها تعیین و بنابراین ۳ دسته گسل با طول کوتاه (کمتر از ۱۰ کیلومتر)، گسل‌های متوسط (با طول ۱۰-۳۰ کیلومتر) و گسل‌های بزرگ (بیشتر از ۳۰ کیلومتر) رده‌بندی شدند. در مرحله بعد برای هر یک از این سه دسته، طول گسیختگی سطحی (SRL) طبق رابطه تجربی (Zare (1995) بر پایه ۳۷٪ طول گسل برای محدوده گسل‌های ایران و نیز بزرگای گشتاوری (M_w) بر پایه رابطه Wells & Coppersmith (1994) به دست آمد (جدول ۲). در پایان، عرض متوسط گسیختگی به عنوان حریم گسل (RW) بر پایه رابطه تجربی Wells & Coppersmith (1994) برای هر دسته تعیین شد (جدول ۳). از آنجایی که فاصله از گسل به عنوان یکی از عوامل مؤثر در زمین لغزش در نظر گرفته شده است، برای انجام محاسبات تحلیل خطر، منطقه به دو رده درون حریم گسل و بیرون از آن تقسیم شد (شکل ۸).

۳-۵. شتاب زمین لرزه

بررسی‌های صحرایی در ایران نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌های کهن بزرگ،

در این روش محاسبه خطر زمین‌لغزش در سه مرحله اصلی انجام شده است:

- ۱) محاسبه وزن عوامل اصلی مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش
- ۲) محاسبه وزن زیر لایه‌های هر یک از عوامل اصلی
- ۳) محاسبه وزن‌های پایانی برای تولید نقشه پهنه‌بندی

برای به دست آوردن وزن عوامل اصلی زمین‌لغزش، در ابتدا برای هر یک از ۵ عامل اصلی ثبت شده، بر پایه اولویت، ضریبی در نظر گرفته می‌شود (جدول ۵). برای عوامل اصلی قابل بررسی زمین‌لغزش، نسبت مجموع تکرار ضرب در ضرب اولویت عامل به مجموع کل به دست می‌آید. این نسبت همان وزن آن عامل است که هر چه تکرار بیشتری داشته باشد و یا در اولویت‌های جلوتر ثبت شده باشد، آن عامل وزن بیشتری می‌گیرد. در مطالعه حاضر برای ایجاد زمین‌لغزش ۶ عامل مؤثر در نظر گرفته شد که بدین ترتیب وزن هر یک از این عوامل اصلی طبق روش بالا به دست آمد (جدول ۶) برای به دست آوردن وزن هر کدام از زیر لایه‌های یک عامل اصلی، از نسبت گرفتن تعداد زمین‌لغزش‌های رخ داده در زیر لایه مورد نظر، به کل زمین‌لغزش‌ها استفاده می‌شود. برای نمونه عامل شتاب در زمین‌لغزش‌های استان تهران به دو زیر لایه شتاب متوسط و شتاب بالا تقسیم شده است. از میان ۸۵ زمین‌لغزش ثبت شده، ۷۲ مورد از آنها در ناحیه با شتاب بالا و ۱۳ مورد در ناحیه شتاب متوسط جای گرفته‌اند. بنابراین وزن زیر لایه شتاب بالا برابر $84/7\%$ و وزن زیر لایه شتاب متوسط $19/3\%$ به دست می‌آید. وزن زیر لایه‌های عوامل اصلی دیگر نیز به همین ترتیب به دست آمد (جدول ۷). سپس مقدار وزن هر زیر لایه هر یک از عوامل در وزن خود عامل ضرب و مجموع مقادیر ۶ عامل برای هر پیکسل از نقشه به دست آمد. خروجی حاصل نقشه‌ای دارای نواحی مختلفی است که مقداری از صفر تا شش دارد. مقدار صفر متناظر با کمترین خطر زمین‌لغزش و مقدار شش متناظر با مناطق با بالاترین خطر زمین‌لغزش است. برای تحلیل و مقایسه نتایج، نقشه پهنه‌بندی به ۴ پهنه با خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد رده‌بندی شد (شکل ۱۴).

۵-۲. کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی در تحلیل خطر زمین‌لغزش

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های استان تهران به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی ابتدا سلسله مراتب محاسبات تعیین شد (شکل ۱۵). سپس پرسش‌نامه‌هایی در اختیار افراد خبره قرار گرفت تا بر پایه تجربه و علم این افراد در مسئله زمین‌لغزش، به ۶ عامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش‌ها و زیر لایه‌های آنها وزن‌دهی شود. افراد خبره شامل جمعی از اساتید دانشکده فنی دانشگاه تهران و کارشناسان زمین‌لغزش سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری هستند. پرسشنامه‌ها بر پایه سامانه نمره‌دهی جدول ۴ و مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی برای زمین‌لغزش‌های استان تهران تکمیل و پس از آن محاسبه وزن‌های عوامل اصلی و زیر لایه‌ها طبق روش AHP انجام شد (جدول‌های ۸ و ۹). مشابه روش داده‌محور، پس از ضرب وزن هر زیر لایه در وزن عامل آن زیر لایه، وزن‌های پایانی به روش AHP به دست آمد. به طوری که به هر پیکسل از نقشه استان تهران میزان خطر مقداردهی و نقشه پهنه‌بندی با ۴ پهنه با خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد تهیه شد (شکل ۱۶).

۵-۳. تحلیل و تفسیر نتایج

پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی، تفسیر و بررسی اعتبار و میزان دقت و درستی نتایج حاصل از هر دو روش و نیز مقایسه میان روش‌ها صورت گرفت. برای هر نقشه چهار پهنه (بسیار پرخطر، پرخطر، خطر متوسط و کم‌خطر) تعریف و با تقسیم مساحت هر یک از این پهنه‌ها به مساحت کل استان تهران، سهم هر یک از پهنه‌ها در استان تهران بر حسب درصد به دست آمد ($S_i\%$) (جدول ۱۰). در مرحله بعد، تعداد زمین‌لغزش‌های موجود در هر پهنه شمارش و با تقسیم آن بر کل ۸۵ مورد زمین‌لغزش رخ داده در استان، درصد رخداد زمین‌لغزش در هر پهنه به دست آمد ($L_i\%$) (جدول ۱۱). برای مقایسه نتایج حاصل از دو روش داده‌محور و AHP، با تقسیم $L_i\%$ به $S_i\%$ در هر پهنه نسبت عددی (Numerical Ratio) NR_i به دست آمد (جدول ۱۲).

رخداد پدیده است. با این شرط که هر داده حتماً و بیشینه به یک گزینه منتسب باشد (شکل ۱۲). پس از تعیین مقدار وزن‌های عوامل اصلی و زیر لایه‌های هر یک از آنها، برای به دست آوردن وزن پایانی هر جزء از نقشه، باید وزن پایانی هر زیر لایه در کل را به دست آورد که نشانگر میزان اهمیت آن ویژگی در کل است. اگر لایه‌های عوامل اصلی به بخش‌های زیر لایه‌ها تقسیم و برای هر زیر لایه، مقدار وزن آن قرار داده شود، برای عامل نقشه رده‌بندی تولید می‌شود که هر بخش از آن، مقداری برابر وزن زیر لایه خود را دارد. چنانچه مقادیر هر یک از نقشه‌های رده‌بندی وزن داده شده در وزن خود عامل اصلی ضرب و همه این نقشه‌ها با هم جمع شوند، نقشه پایانی دارای نواحی مختلفی است که هر ناحیه آن مقدار دارد و به عنوان نقشه پهنه‌بندی ارائه می‌شود.

۴-۲. روش تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Saaty, 1980) شناخته شده‌ترین و مورد استفاده‌ترین روش نسبت‌دهی چندمعیاری است. روش AHP امکان تعیین اهمیت نسبی مجموعه‌ای از متغیرهای موجود در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاری را فراهم می‌کند. این روش موجب ترکیب قضاوت در مورد معیارهای کیفی غیر قابل مشاهده در کنار معیارهای کمی محسوس می‌شود (Badri, 2001). به طور کلی فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر سه اصل زیر استوار است (Dagdeviren, 2008):

- ۱) ایجاد یک سلسله مراتب
- ۲) قضاوت مقایسه‌ای میان گزینه‌ها و معیارها
- ۳) ترکیب اولویت‌ها

در مرحله اول روش AHP، یک مسئله چندمعیاری در ابتدا به سلسله مراتبی از عناصر تصمیم‌گیری وابسته به هم (اهداف، نسبت‌ها، معیارها، گزینه‌ها و ...) تقسیم می‌شود که در یک ساختار سلسله مراتبی مشابه با سطوح شجره‌نامه خانوادگی به ترتیب قرار می‌گیرند. در این ساختار، هدف کلی مسئله در بالا، معیارهای چندگانه که گزینه‌ها را تعریف می‌کنند در وسط و گزینه‌های تصمیم‌گیری در پایین جای می‌گیرند (Albayrak & Erensal, 2004) (شکل ۱۳). در مرحله دوم پس از ایجاد ساختار سلسله مراتبی، چگونگی اولویت‌بندی به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها در هر سطح آغاز می‌شود. اولویت نسبی داده شده به هر عنصر در سلسله مراتب، با مقایسه سهم دوبره‌دو هر عنصر در یک سطح پایین با توجه به معیار (یا عناصر) با یک رابطه علت و معلولی تعیین می‌شود (Macharis et al., 2004). مقایسه‌های زوجی چندگانه بر پایه یک مقیاس مقایسه استاندارد با ۹ سطح توسط کارشناسان خبره به عنوان تصمیم‌گیرندگان به صورت قضاوت‌های شفاهی و با مقداردهی عددی انجام می‌شود (جدول ۴). در مرحله سوم این روش، پس از مقایسه زوجی میان عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح، اولویت‌ها توسط یک ماتریس وزن‌ها و به صورت ریاضی با هم ترکیب می‌شود و وزن عناصر به دست می‌آید (قدسی‌پور، ۱۳۹۱).

۵-۱. کاربرد روش‌ها در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

۵-۱-۱. کاربرد روش داده‌محور در تحلیل خطر زمین‌لغزش

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش داده‌محور، ابتدا فهرست کاملی از زمین‌لغزش‌های دقیق ثبت شده در استان تهران از بانک اطلاعات تفصیلی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشوری تهیه شد. تا زمان بررسی حاضر، فهرست داده‌ها شامل ۸۵ زمین‌لغزش رخ داده با مختصات مکانی و عوامل مؤثر در ایجاد آنها است. گفتنی است که در زمان تهیه داده‌های هر زمین‌لغزش، ۵ عامل اصلی به ترتیب اولویت تأثیر در ایجاد ناپایداری توسط کارشناس سازمان یادشده در محل رخداد ثبت شده است. بنابراین وزن لایه‌های عامل‌های اصلی زمین‌لغزش و زیر لایه‌های آنها مستقیماً از اطلاعات زمین‌لغزش‌های ثبت شده به دست آمده است.

به‌موقع و دقیق اطلاعات لرزه‌ای ممکن است گاه سبب شود تا عامل شتاب زمین لرزه، به اشتباه به عنوان عامل تأثیرگذار ثبت نشود. ضمن آنکه عوامل مؤثر دیگری مانند میزان فرسایش و کاربری زمین‌ها به‌صورت کوتاه‌مدت به‌دقت قابل بررسی و ثبت نیست. همچنین می‌توان تأثیر عوامل بیشتری را در ایجاد خطر زمین‌لغزش بررسی کرد که هر یک مشکلات خاص خود را دارد. برای نمونه کنترل دایم پوشش گیاهی، پایش سطح آب زیرزمینی در نزدیکی دامنه مستعد لغزش، حجم برف روی دامنه‌ها و مدت زمان مرطوب بودن دامنه، جهت باد و میزان تابش خورشید عوامل تأثیرگذاری هستند که اندازه‌گیری آنها نیازمند امکانات زیادی است و یا ممکن نیست.

۳) در روش تحلیل سلسله مراتبی، پرسشنامه‌ای که برای مقایسه زوجی میان عوامل و یا زیرلایه‌ها طراحی شده است، جزئیات زیادی را مورد پرسش قرار می‌دهد؛ به‌طوری که برای مقایسه میان عوامل اصلی و زیرلایه‌های آنها به تعداد زیادی جدول مقایسه‌ای نیاز است. همچنین برای مقایسه میان دو عامل، کمی کردن میزان ترجیح در ۹ سطح (جدول ۴) بسیار دشوار است و دقت معنی‌داری ندارد. در صورتی که می‌توان پرسش‌ها را با ۳ نمره به معنی‌های ارجحیت کم یا متوسط و یا زیاد راحت‌تر انجام داد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی خطر زمین‌لغزش در استان تهران از دو روش داده‌محور بر پایه آمار زمین‌لغزش‌های پیشین و روش تحلیل سلسله مراتبی بر پایه قضاوت کارشناس خبره برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در ایجاد خطر زمین‌لغزش استفاده شد. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، مجموع پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر نقشه به عنوان پهنه خطرناک معرفی شد و محاسبه نسبت درصد زمین‌لغزش در پهنه خطرناک به درصد مساحت این پهنه در کل مساحت استان تهران نشان داد که روش داده‌محور با نسبت عددی ۲/۵ پاسخ مطلوب‌تری را نسبت به روش AHP با نسبت عددی ۱/۷۹ ارائه می‌کند و دقت آن در برآورد محدوده خطرناک بیشتر است.

سپاسگزاری

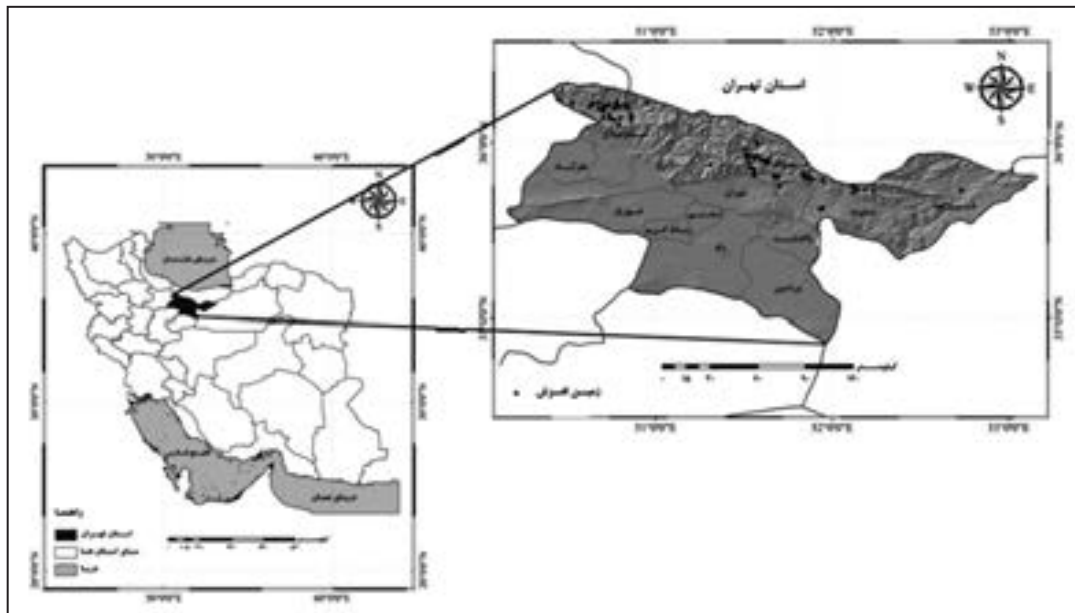
از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور برای در اختیار گذاشتن داده‌های زمین‌لغزش استان تهران، از آقایان مهندس اکبری، مهندس قبادی و مهندس قربانی در بخش پایدارسازی دامنه‌های لغزشی و مهندسی این سازمان برای راهنمایی‌های ارزشمند و استفاده از تجارب و نقطه‌نظرات‌شان و نیز از شرکت پارس پیاب برای در اختیار گذاشتن داده‌های هواشناسی ۵۰ سال گذشته استان تهران سپاسگزاری می‌شود.

$$NR_i = L_i\% / S_i\% \quad (1)$$

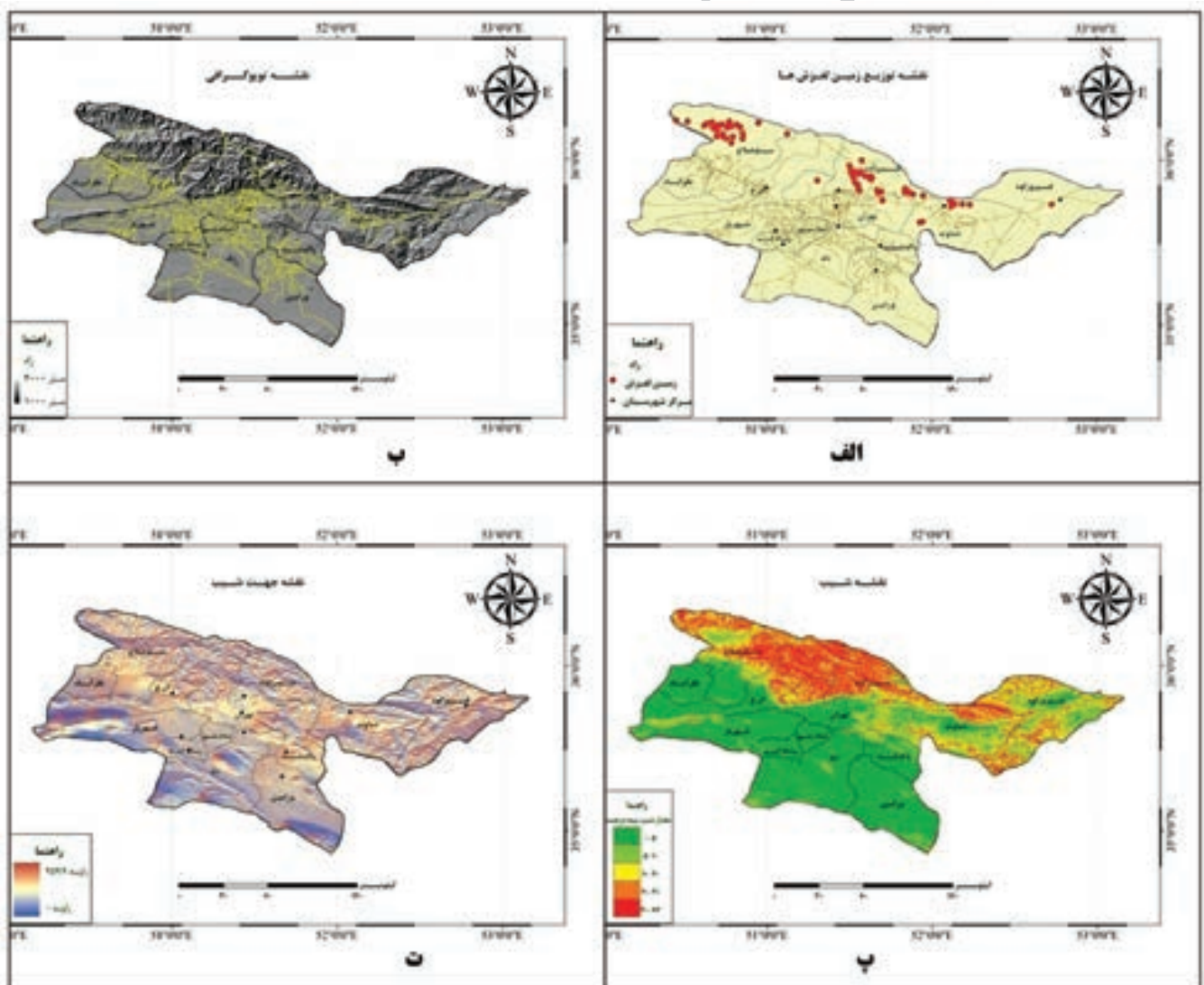
بنابراین برای هر یک از پهنه‌ها، این نسبت عددی با تقسیم درصد زمین‌لغزش هر پهنه به درصد مساحت آن به دست آمد. از آنجایی که مطالعات پهنه‌بندی در ابعاد استان انجام شده است و با توجه به ریسک بالای زمین‌لغزش در استان تهران، تعیین یک ناحیه خطرناک مفید است. از این رو محدوده خطرناک نقشه به‌صورت مجموع پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر در نظر گرفته شد و به‌منظور تعیین دقت هر روش در برآورد، نسبت عددی NR_R برای این محدوده خطرناک به دست آمد. هر چه این نسبت عددی بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده آن است که تعداد بیشتری زمین‌لغزش در محدوده کوچک‌تری از نقشه پوشش داده شده است. نتایج نشان داد که در روش داده‌محور ۹۲/۹٪ از زمین‌لغزش‌ها در محدوده خطرناک با مساحت ۷۱۳۵/۱۵ کیلومتر مربع (۳۷/۲٪ از مساحت کل استان) و در روش AHP ۹۶/۵٪ از زمین‌لغزش‌ها در این محدوده با مساحت ۱۰۳۴۴/۷ کیلومتر مربع قرار گرفته‌اند که این مساحت در واقع ۵۳/۹٪ از مساحت کل استان تهران را دربرمی‌گیرد. بنابراین نسبت عددی در روش داده‌محور ۲/۵ و در روش AHP ۱/۷۹ به دست آمد. مقایسه این دو نسبت عددی نشان می‌دهد که دقت و درستی روش داده‌محور در ارائه نتایج از روش AHP بیشتر است. زیرا روش داده‌محور در مقایسه با روش AHP، درصد بالایی از زمین‌لغزش‌ها را در مساحت کوچک‌تری به‌عنوان پهنه خطرناک پوشش داده است.

با توجه به این مطالعه مشخص شد که در برآورد خطر رخدادهای زمین‌لغزش به روش‌های داده‌محور و تحلیل سلسله مراتبی، چالش‌های زیادی وجود دارد؛ برای نمونه: ۱) به‌علت فاصله زیاد برخی از زمین‌لغزش‌های مهم از مناطق شهری و مشکل دسترسی به آن مناطق، عدم بررسی زمین‌لغزش‌ها بر پایه یک استاندارد یکسان و هزینه‌بر بودن بررسی همه رخدادهای کوچک و بزرگ ناپایداری دامنه‌ها، می‌توان ادعا کرد که بانک اطلاعات تفصیلی زمین‌لغزش‌ها در استان تهران از دید تعداد محدود است و این داده‌ها به‌صورت کامل و همگن در دسترس نیست. در نتیجه کم بودن تعداد نمونه‌ها از جامعه کل زمین‌لغزش‌ها می‌تواند خطای پهنه‌بندی خطر را بالا ببرد. همچنین نمونه‌ها تصادفی انتخاب نشده‌اند و بیشتر، زمین‌لغزش‌های نزدیک به راه یا تأسیسات و فعالیت‌های بشری ثبت شده‌اند که سبب می‌شود چگونگی توزیع داده‌ها نامتوازن باشد.

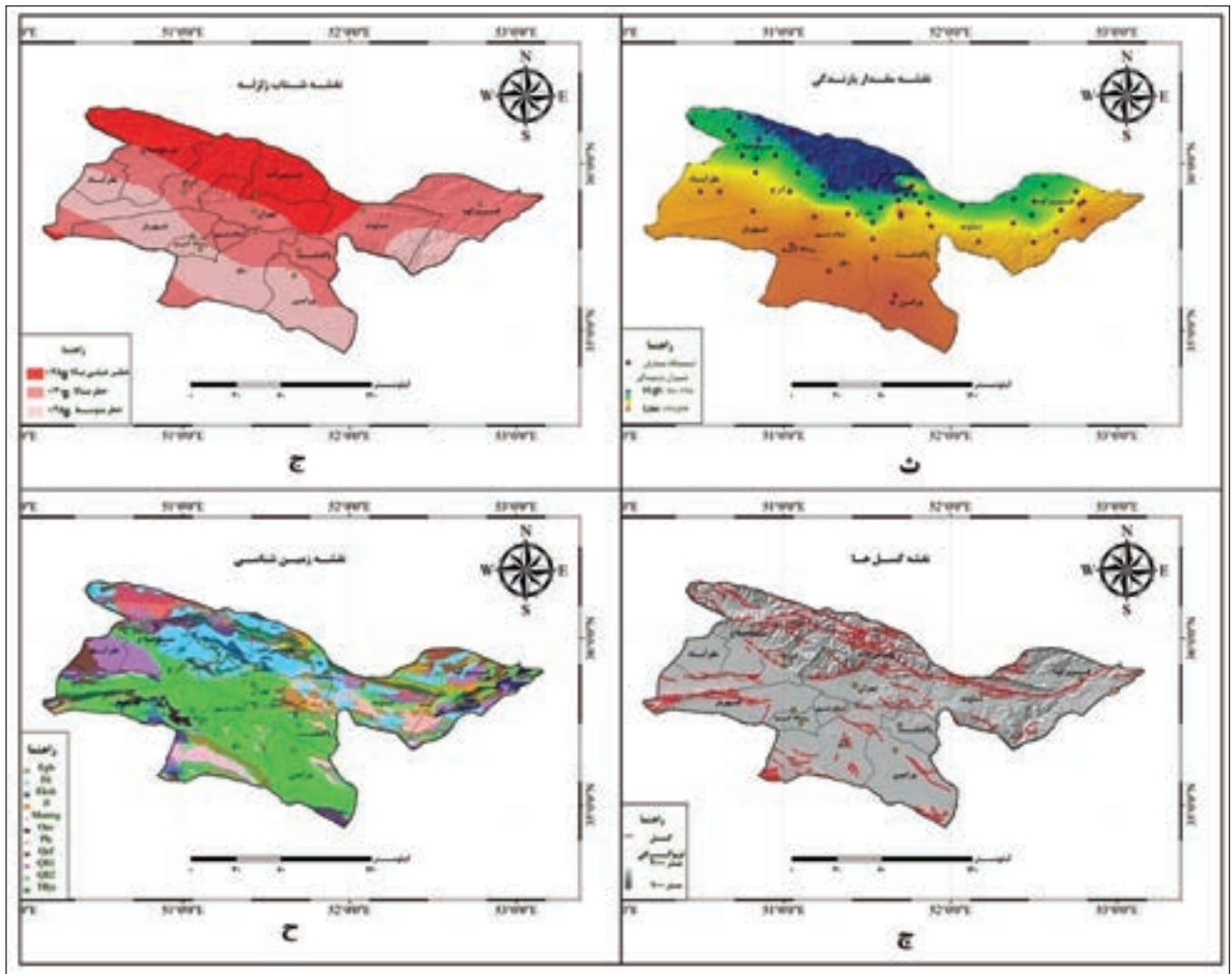
۲) ثبت عوامل تأثیرگذار در لغزش تا حد زیادی به نظر کارشناس حاضر در منطقه وابسته است. برای نمونه برای ثبت عامل شتاب زمین لرزه نیاز است تا داده‌های مربوط به رخدادهای زمین‌لرزه مؤثر در رخدادهای زمین‌لغزش در اختیار باشد. بنابراین عدم بررسی



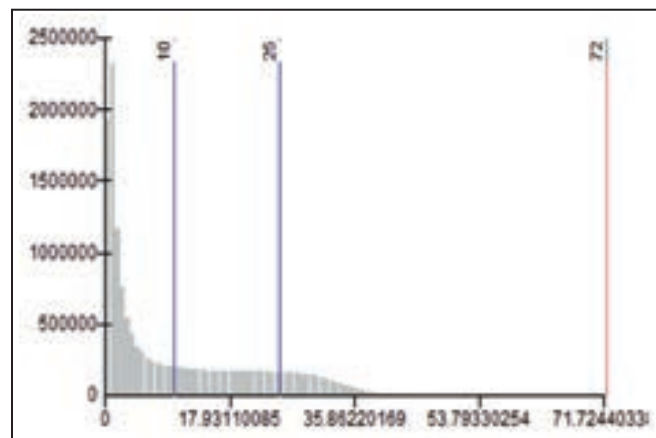
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان تهران در کشور.



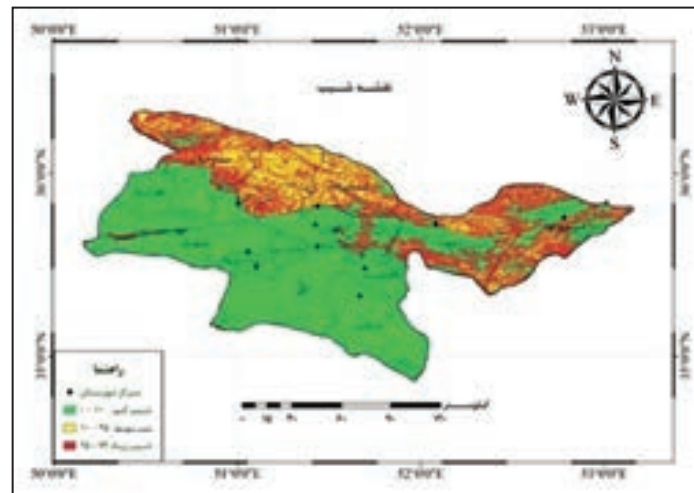
شکل ۲- نقشه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در برآورد خطر زمین‌لغزش در استان تهران. الف) پراکنش زمین‌لغزش‌ها (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، ۱۳۹۲)؛ ب) توپوگرافی (نقشه DEM مربوط به SRTM)؛ پ) شیب (مستخرج از نقشه DEM)؛ ت) جهت شیب (مستخرج از نقشه DEM).



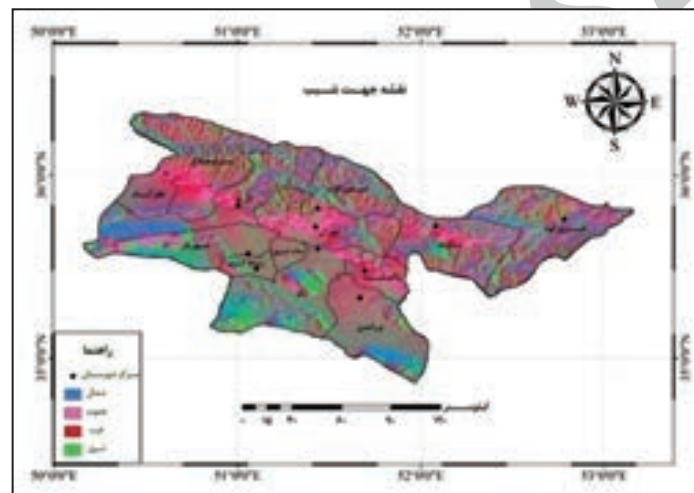
شکل ۲- نقشه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در برآورد خطر زمین‌لغزش در استان تهران. (ث) بارندگی (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۲)؛ (ج) شتاب زمین‌لرزه (Tavakoli & Ghafory-Ashtiani, 1999)؛ (چ) گسل (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲)؛ (ح) زمین‌شناسی (احدنژاد، ۱۳۸۱).



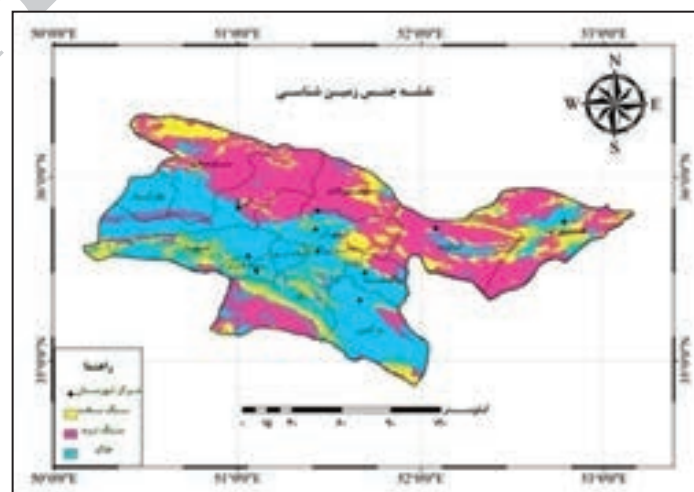
شکل ۳- چگونگی تقسیم‌بندی و انتخاب رده‌ها در لایه شیب بر پایه نمودار ستونی نقشه شیب منطقه.



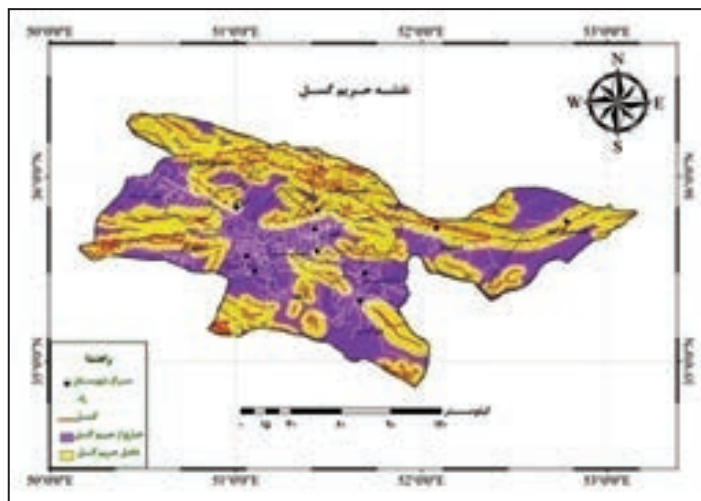
شکل ۴- نقشه رده‌بندی شده شیب با ۳ زیرلایه با شیب ۰-۱۰، ۱۰-۲۵ و ۲۵-۷۲ درجه.



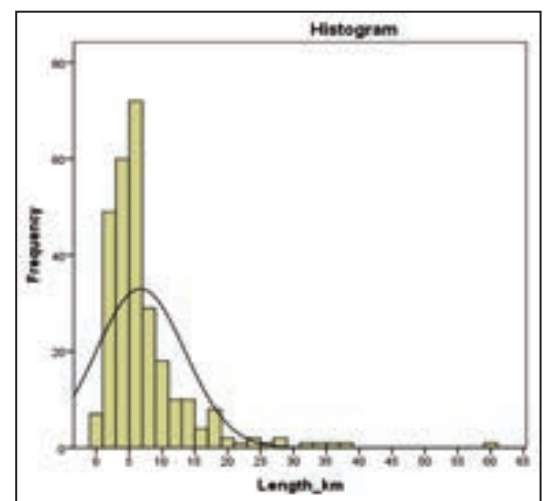
شکل ۵- نقشه رده‌بندی شده جهت شیب با ۴ زیرلایه شمالی، جنوبی، خاوری و باختری.



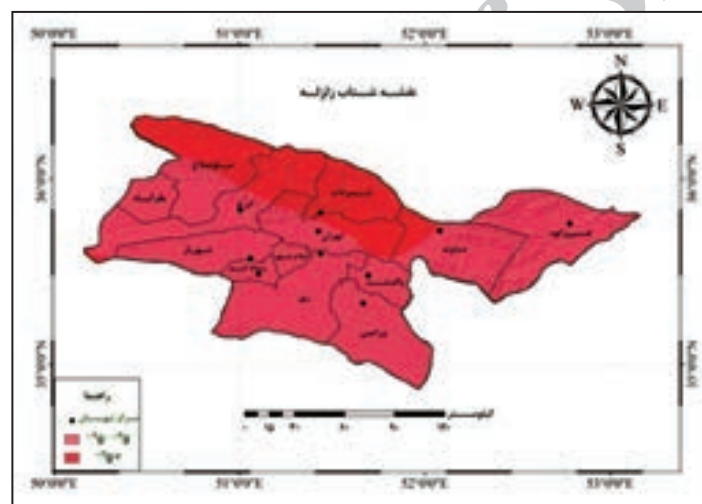
شکل ۶- نقشه رده‌بندی جنس مصالح بر پایه مشخصات ژئومکانیکی به ۳ دسته خاک، سنگ نرم و سنگ سخت.



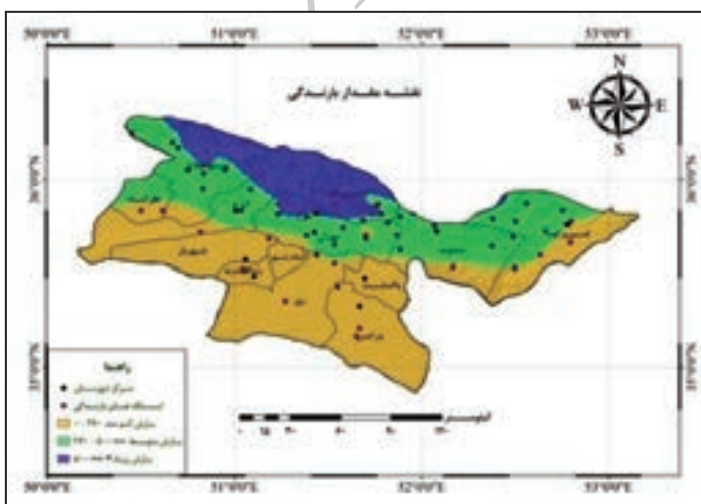
شکل ۸- نقشه رده‌بندی منطقه به دو پهنه درون و بیرون از حریم گسل.



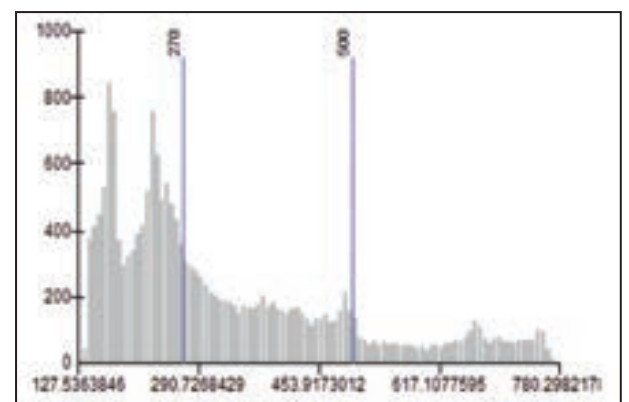
شکل ۷- نمودار ستونی (هیستوگرام) طول گسل‌های فعال استان تهران.



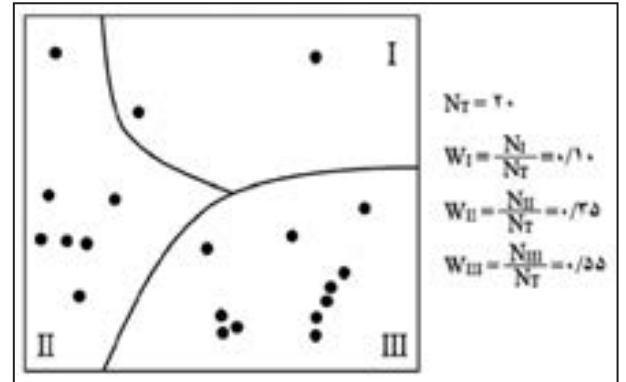
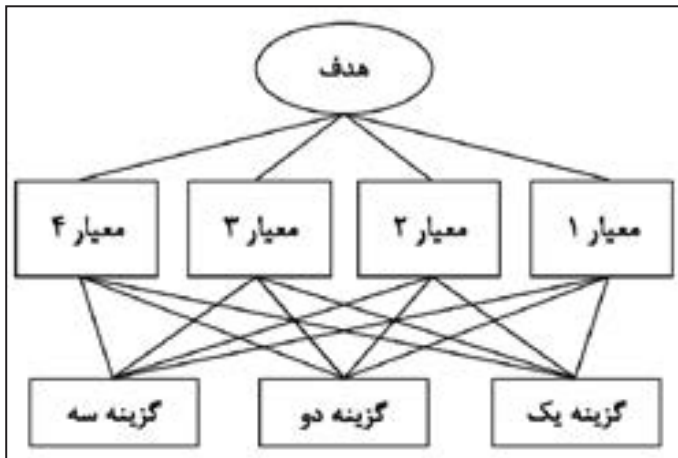
شکل ۹- نقشه رده‌بندی مقادیر شتاب زمین لرزه.



شکل ۱۱- نقشه رده‌بندی مقادیر بارندگی ماهیانه.

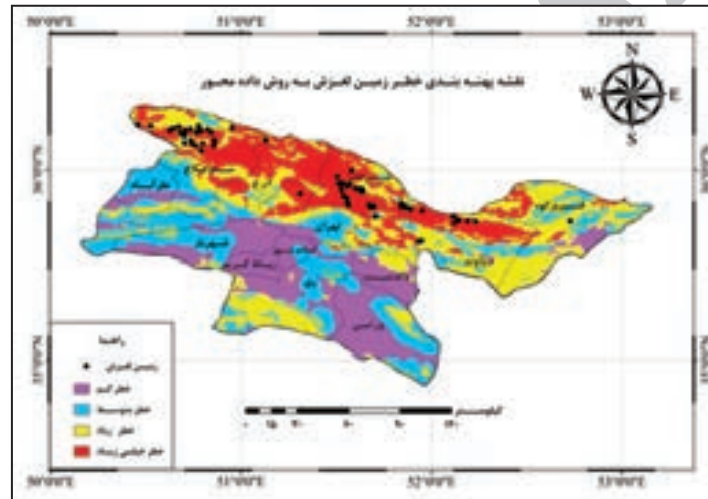


شکل ۱۰- نمودار ستونی مقادیر بارندگی در ۵۰ سال گذشته در استان تهران.

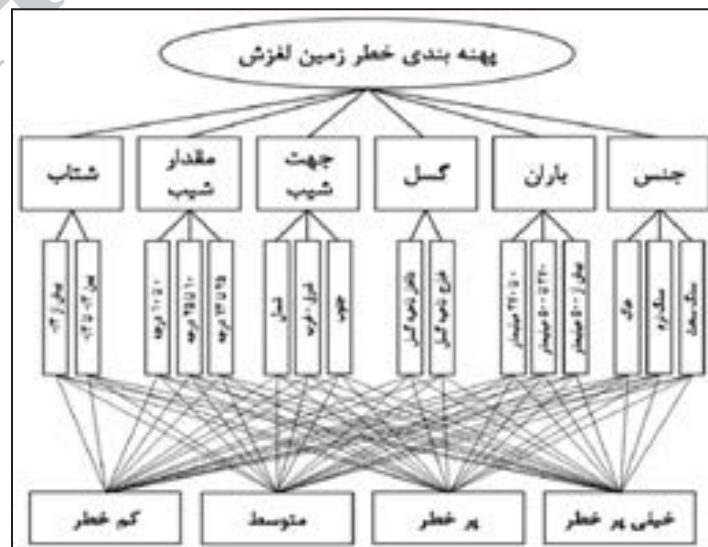


شکل ۱۲- تعیین وزن هر بخش از کل سطح بر پایه درصد تعداد نمونه در آن.

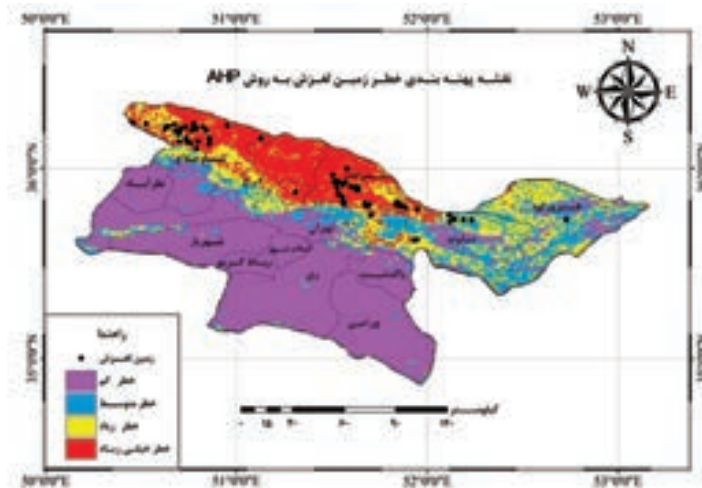
شکل ۱۳- ارتباط عناصر تصمیم‌گیری در یک فرایند تحلیل سلسله مراتبی.



شکل ۱۴- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش داده‌محور.



شکل ۱۵- فرایند تحلیل خطر زمین‌لغزش با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP).



شکل ۱۶- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP).

جدول ۱- رده زمین‌شناسی متناظر با ۷۳ نوع جنس موجود در نقشه زمین‌شناسی استان تهران.

سنگ سخت	سنگ نرم	خاک
دیوریت (Qdi)	کنگلومر، ماسه سنگ و گل سنگ (Plc)	نهشته‌های ماسه‌ای سفت نشده (Q _s d)
گدازه‌های بازالتی (Qbv)	شیل، مارن ژیبس دار و ماسه سنگ (Mursh)	تراس‌ها س کهن (Qft2)
گدازه‌های آندزی بازالتی (Qa.bv)	مارن گچ دار (Murmg)	پهنه رسی (Qcf)
کنگلومرای پلی ژنتیک (PLQc)	مارن گچ دار با میان لایه‌های ماسه سنگ (Murm)	تراس‌های کهن (Qft1)
گرانودیوریت (Plrg-di)	ماسه سنگ‌های زرد تا سرخ، مارن گچ دار، سیلت استون و شیل (Mur)	
گدازه‌های آندزی بازالتی (OMa.bv)	مارن، ماسه سنگ و سنگ آهک (Mm,s,l)	
کنگلومرای ماسه سنگ (Olcs)	سنگ آهک ریفی (OMql)	
گرانودیوریت (Ogr-di)	توف‌های داسیتی (OMdvt)	
گرانیت (Ogr)	ژیبس (Olgy)	
گدازه‌های داسیتی (Odv)	توف سبز و شیل‌های توفی (Ek)	
نیمه آتشفشانی‌های داسیتی (Odsv)	توف داسیتی (Edt)	
دیوریت (Odi)	توف داسیتی آندزیتی (Ed.at)	
گدازه‌های آندزیتی (Oav)	توف و گدازه‌های بازالتی (Ebv)	
گدازه‌های آندزی بازالتی (Ed.av)	توف و گدازه‌های آندزیتی (Eav)	
گابرو (Egb)	ژیبس (Ekg)	
توف و گدازه‌های آندزیتی (Edvt)	توف آندزیتی (Eat)	
داسیت‌های نیمه آتشفشانی (Edvs)	شیل با میان لایه‌های توف (Eksh)	
گدازه‌های بازالتی (Ebv)	شیل آهکی با میان لایه‌های توف (Ek.a)	
نیمه آتشفشانی‌های آندزیتی (Eavs)	ماسه سنگ، مارن و سنگ آهک (E2s)	
گدازه‌های آندزیتی (Eav)	مارن، گچ، سنگ آهک (E1m)	
گدازه‌های آندزی بازالتی (Ea.bv)	سنگ آهک ریفی و مارن ژیبس دار سازند زیارت (PeE2)	
کنگلومرای پلی ژنتیک سرخ و ماسه سنگ (E1c)	سنگ آهک‌های اربیتولین دار (Ktzi)	
کنگلومرای درشت دانه پلی ژنتیک با میان لایه‌های ماسه سنگ (Pgkc)	سنگ‌های کربناتی (Jk)	
سنگ‌های تفکیک نشده (Ku)	سنگ آهک با میان لایه‌های شیل سازند دلچای (Jd)	
کنگلومرای ماسه سنگ (K2c)	سنگ آهک اوولیتی، سنگ آهک شیلی و دولومیت (TRe)	
سنگ‌های کرتاسه (K)	ماسه سنگ، سیلت استون، رس سنگ با میان لایه‌های زغال (TRjs)	
گدازه‌های بازالتی (Kbv)	ماسه سنگ قرمز و شیل همراه با میان لایه‌های سنگ آهک ماسه‌ای (Pd)	
سنگ آهک خاکستری (Jl)	سنگ آهک فسیل دار خاکستری تیره با میان لایه‌های شیل سیاه (Cm)	
کنگلومرای سفید کوارتزی (Juc)	سنگ آهک، شیل و مارن تفکیک نشده (Db.sh)	
سنگ‌های تفکیک نشده پرمین (P)	ماسه سنگ آرکوزی و سیلت استون میکادار (Cl)	
سنگ آهک خاکستری و متوسط لایه (Pr)	سنگ آهک تریلوبیت دار دولومیتی ماسه سنگ و شیل (COm)	
سنگ‌های تفکیک نشده (pC-C)	ماسه سنگ و سیلت استون‌های میکادار (Czl)	
گدازه‌های آندزیتی (Edv)	سیلت استون‌های میکادار و ماسه سنگ درشت دانه سازند زایگون (Cz)	
	واحد‌های دولومیتی و سنگ آهک با میان لایه‌های شیل (pC-Cs)	
	شیل‌های سیلتی با میان لایه‌های ماسه سنگ (pCk)	
	مارن، ماسه سنگ و آهک (E3m)	

جدول ۲- روابط مورد استفاده در محاسبه طول گسیختگی، بزرگای پتانسیل بر پایه طول گسل و عرض گسیختگی.

متغیرها	رابطه
SRL = طول گسیختگی سطحی $L_f =$ طول گسل	$SRL = 0.37 L_f$ (Zare, 1995)
$M_w =$ بزرگای گشتاوری a و b ضرایب ثابت رابطه (به ازای همه داده‌ها $a = 5/0.8$ و $b = 1/16$)	$M_w = a + b * \log(SRL)$ (Wells & Coppersmith, 1994)
RW = عرض گسیختگی a و b ضرایب ثابت رابطه (به ازای همه داده‌ها $a = -1/0.1$ و $b = 0/32$)	$\log(RW) = a + b.M_w$ (Wells & Coppersmith, 1994)

جدول ۳- عرض گسیختگی (حریم گسل) بر پایه طول گسیختگی گسل.

رده	عرض گسیختگی (حریم گسل)
گسل‌های کوچک با طول کمتر از ۱۰ کیلومتر	۶/۷ کیلومتر
گسل‌های متوسط با طول ۱۰-۳۰ کیلومتر	۱۰ کیلومتر
گسل‌های بزرگ با طول بیش از ۳۰ کیلومتر	۱۳/۱ کیلومتر

جدول ۴- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی (Saaty, 1980).

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر
۱	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۸ و ۶ و ۴ و ۲	ترجیحات میان فواصل فوق

جدول ۵- ضرایب عوامل اصلی موثر در زمین‌لغزش.

عامل اصلی	ضریب
عامل اصلی اول	۵
عامل اصلی دوم	۴
عامل اصلی سوم	۳
عامل اصلی چهارم	۲
عامل اصلی پنجم	۱

جدول ۶- وزن عوامل اصلی زمین‌لغزش به روش داده‌محور.

عوامل اصلی زمین لغزش	وزن %
جنس	۳۸/۳
باران	۳۰/۷
گسل	۱۶/۴
جهت شیب	۶/۲
مقدار شیب	۵
شتاب	۳/۴

جدول ۷- وزن زیرلایه‌های عوامل اصلی به روش داده‌محور.

عامل اصلی	زیر لایه	وزن %	عامل اصلی	زیر لایه	وزن %
جنس	خاک	۵/۹	جهت شیب	شمال	۱۵/۳
	سنگ نرم	۷۷/۶		خاور	۳۰/۶
	سنگ سخت	۱۶/۵		پاختر	۲۵/۹
باران	۰ تا ۲۷۰ میلی‌متر در سال	۰	جنوب	۲۸/۲	
	۲۷۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در سال	۴۹/۴	مقدار شیب	۰ تا ۱۰ درجه	۱۲/۹
	بیش از ۵۰۰ میلی‌متر در سال	۵۰/۶		۱۰ تا ۲۵ درجه	۷۰/۶
گسل	درون ناحیه گسیختگی گسل	۹۱/۸	شتاب	۲۵ تا ۷۲ درجه	۱۶/۵
	بیرون ناحیه گسیختگی گسل	۸/۲		بیش از ۰/۳ شتاب گرانش	۸۴/۷
				۰/۲ تا ۰/۳ شتاب گرانش	۱۵/۳

جدول ۸- وزن عوامل اصلی زمین‌لغزش به روش AHP.

عوامل اصلی زمین لغزش	وزن %
مقدار شیب	۳۰/۱۵
گسل	۲۳/۳۵
باران	۱۴/۳۰
جهت شیب	۱۲/۷۲
شتاب	۱۱/۶۵
جنس	۷/۸۴

جدول ۹- وزن زیرلایه‌های عوامل اصلی به روش AHP.

عامل اصلی	زیر لایه	وزن %	عامل اصلی	زیر لایه	وزن %
جنس	خاک	۶۱/۶	جهت شیب	شمال	۳۹/۳
	سنگ نرم	۲۸/۸		خاور- باختر	۱۴/۳
	سنگ سخت	۹/۷		جنوب	۴۶/۴
باران	۰ تا ۲۷۰ میلی‌متر در سال	۹/۵	مقدار شیب	۰ تا ۱۰ درجه	۹/۵
	۲۷۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در سال	۲۴/۹		۱۰ تا ۲۵ درجه	۲۴/۹
	بیش از ۵۰۰ میلی‌متر در سال	۶۵/۶		۲۵ تا ۷۲ درجه	۶۵/۶
گسل	درون ناحیه گسیختگی گسل	۹۱/۸	شتاب	بیش از ۰/۳ شتاب گرانش	۷۵
	بیرون ناحیه گسیختگی گسل	۸/۲		۰/۲ تا ۰/۳ شتاب گرانش	۲۵

 جدول ۱۰- درصد مساحت هر ناحیه به مساحت کل استان تهران %S_i.

ناحیه	روش AHP %	روش داده‌محور %
پهنه کم خطر	۲۱/۳۶	۴۸/۵۰
پهنه خطر متوسط	۲۴/۷۵	۱۴/۳۳
پهنه پرخطر	۳۲/۸۴	۱۶/۱۵
پهنه بسیار پرخطر	۲۱/۰۵	۲۱/۰۲

 جدول ۱۱- درصد زمین لغزش ثبت شده در هر ناحیه %L_i.

ناحیه	روش AHP %	روش داده‌محور %
پهنه کم خطر	۰	۰
پهنه خطر متوسط	۳/۵۳	۷/۰۶
پهنه پرخطر	۲۴/۷۱	۲۷/۰۶
پهنه بسیار پرخطر	۷۱/۷۶	۶۵/۸۸

 جدول ۱۲- نسبت عددی $NR_i = S_i / L_i$ برای هر پهنه برای دو روش داده‌محور و AHP.

ناحیه	روش AHP	روش آماری
پهنه کم خطر	۰	۰
پهنه خطر متوسط	۰/۱۴	۰/۴۹
پهنه پرخطر	۰/۷۵	۱/۶۸
پهنه بسیار پرخطر	۳/۴۱	۳/۱۳
ناحیه خطرناک پهنه بسیار پرخطر و پرخطر	۱/۷۹	۲/۵۰

کتابنگاری

- احدزاد، و.، ۱۳۶۸- نقشه زمین‌شناسی استان تهران، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- اشقلی فراهانی، ع.، ۱۳۸۰- پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، ارزیابی خطرناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۴۲ص.
- افلاکی، ا.، ۱۳۶۸- آزمایشگاه مکانیک خاک، انتشارات علم وصنعت، ۱۵۶ص.
- بای، ن. و حاجی‌میرحیمی، س. م.، ۱۳۸۷- پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش AHP، همایش ژئوماتیک، ۹ص.
- بهشتی‌راد، م.، فیض‌نیا، س.، سلاجقه، ع. و احمدی، ح.، ۱۳۸۸- بررسی کارایی مدل پهنه‌بندی خطر زمین لغزش فاکتور اطمینان (CF) مطالعه موردی حوضه آبخیز معلم کلایه، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دوم، شماره ۵، صص ۱۹ تا ۲۸.
- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور (www.ngdir.ir)
- جوادی، م. ر.، طهرانی‌پور، ه.، غلامی، ش. ع. و فتاحی اردکانی، م. ع.، ۱۳۹۱- مقایسه روش‌های مورا و وارسون و رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز کن، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال سوم، شماره ۵.
- حاتمی‌فرد، ر.، موسوی، س. ح. و علیمرادی، م.، ۱۳۹۱- پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS در شهرستان خرم‌آباد، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، پیاپی، شماره ۳، صص ۴۳ تا ۶۰.
- حسامی، ح.، جمالی، ف. و طبسی، ح.، ۱۳۸۲- نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

- راکعی، ب.، خامه‌چیان، م.، عبدالمملکی، پ. و گیاهیچی، پ.، ۱۳۸۶- کاربرد سیستم شبکه عصبی مصنوعی در به‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: ناحیه سفیدار گله در استان سمنان)، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۳، شماره ۱، صص ۵۷ تا ۶۴.
- سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۹۲- فهرست زمین‌لغزش‌های کشور، گروه مطالعه امور زمین‌لغزش‌ها، دفتر مهندسی و ارزیابی طرح‌ها.
- سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۲- فهرست میزان بارندگی استان تهران در سال ۹۲.
- سپهوند، ع. ر.، ۱۳۸۹- به‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در بخشی از حوضه آبخیز هراز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس.
- سوری، س.، لشکری‌پور، غ.، غفوری، م. و فرهادی‌نژاد، ط.، ۱۳۹۰- به‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه کشوری (نوژیان))، مجله زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت معلم، دوره ۵، شماره ۲.
- شادفر، ص. و یمانی، م.، ۱۳۸۶- به‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز جلیسان با استفاده از مدل LNRF، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۲، صص ۱۱ تا ۲۳.
- شریفی، ر. و دریاباری، س. ج.، ۱۳۸۴- روش نیلسن و بهینه‌سازی آن در به‌بندی خطر زمین‌لغزش، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۱ (پیاپی ۷۶)، صص ۷۸ تا ۸۹.
- فتاحی اردکانی، م. ع.، ۱۳۷۳- مقاله گزارشی پیرامون زمین‌لغزش در استان تهران، اولین سمینار زمین‌لغزه و کاهش خسارات آن، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، صص ۹۲ تا ۱۰۲.
- فرداد، م.، آل‌شیرخ، ع. ا. و وفایی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۰- به‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش با روش‌های منطق فازی (Fuzzy) و شبکه عصبی (Neural Network) در GIS، (مطالعه موردی منطقه مال خلیفه)، پانزدهمین همایش زمین‌شناسی ایران.
- قدسی‌پور س. ح.، ۱۳۹۱- فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ویرایش اول، چاپ دهم، ۲۳۲ ص.
- کمک‌پناه، ع.، منتظرالقائم، س. و چدنی، ا.، ۱۳۷۳- به‌بندی خطر زمین‌لغزش در ایران، زمین‌لغزه و مروری بر زمین‌لغزه‌های ایران (جلد اول)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۶۵ ص.
- معماریان ح.، ۱۳۸۷- زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۹۵۳ ص.
- مقیمی، ا.، باقری سید شکر، ط. و صفرراد، ط.، ۱۳۹۱- به‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاق‌دیس نسا زاکرس شمال باختری)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۹، صص ۷۷ تا ۹۰.
- مهدوی‌فر، م. ر.، ۱۳۸۱- ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه در کشور، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- نصرآزادانی، ا. و شیرانی، ک.، ۱۳۸۸- ارزیابی و مقایسه روش‌های به‌بندی آماری دومتغیره با استفاده از GIS (مطالعه موردی حوضه آبخیز دز علیا)، همایش ژئوماتیک.

References

- Albaryak, E. & Erensal, Y. C., 2004- Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: An application of multiple criteria decision making problem, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15, 491-503.
- Badri, M. A., 2001- A combined AHP-GP model for quality control systems, *International Journal of Production Economics*, No. 72, Pp 27-40.
- Dagdeviren, M., 2008- Decisionmaking in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 397-406.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P., 1999- Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, *Central Italy, Geomorphology*, 31, 181-216.
- IAEG Commission on Landslides, 1990- Suggested nomenclature for landslides *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 41, pp. 13-16.
- Macharis, C., Springael, J., Brucker, K. D. & Verbeke, A., 2004- PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP, *European Journal of Operational Research*, 153, 307-317.
- Pareta, K., Kumar, J. & Pareta, U., 2012- Landslide Hazard Zonation using Quantitative Methods in GIS, *International Journal of Geospatial Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-9.
- Pedram, H., 1991- Earthquakes, Tectonics Activities and Landslides, *Proceeding of the first international conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. I. May 27-29, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) Tehran, Iran.
- Pradhan, B., 2011- An Assessment of the Use of an Advanced Neural Network Model with Five Different Training Strategies for the Preparation of Landslide Susceptibility Maps. *Journal of Data Science*, No. 9, Pp. 65-81.
- Saaty, T. L., 1980- *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill. International.
- Tavakoli, B. & Ghafory-Ashtiany, M., 1999- Seismic Hazard Assessment of Iran, *Annali Di Geofisica*, Vol 42, No. 6, pp. 1013-1021.
- Varnes, D. J., 1984- *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO Press, Paris, P. 176.
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J., 1994- New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, Pp. 974-1002, August 1994.
- Zare, M., 1995- Site Dependent Attenuation of Strong Motion for Iran, *Proc. 5th Int conf on seismic zonation* (pp. 1222-1231), Nice, France: Quest Publication.

Landslide Hazard Zonation in Tehran Province Using Data-Driven and AHP Methods

F. Kamranzad ^{1*}, E. Mohasel Afshar ¹, M. Mojarab ² & H. Memarian ³

¹ M.Sc. Student, Faculty of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Ph.D. Student, Faculty of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Faculty of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2014 January 25

Accepted: 2015 March 01

Abstract

Landslide is one of the natural phenomena which can cause catastrophic losses or damages in life and property each year. Hence, it is very important to recognize landslide-prone areas and apply methods to prevent or reduce slope instabilities and landslide hazard and risk. For this purpose, landslide hazard zonation is one of the indirect and efficient methods. This study aims to apply data-driven and AHP methods to provide a zonation map of landslide hazard potential in the Tehran province of Iran. First, six essential and available factors including slope, slope direction, geologic background, distance from faults, earthquake acceleration and rainfall were selected to be classified in GIS based on engineering judgment. By superposing data layers over landslide distribution map in data-driven method and expert judgment in AHP method, layers and sub-layers were weighted and combined. The landslide-hazard zonation map was then produced for each of the methods in GIS. Results showed that in data-driven method 92.9% of landslides fall into the perilous zone (i.e. hazardous and very hazardous zones) having an area of 7135.15 km², which is 37.2% of total area of Tehran province. For the AHP method, 96.47% of the landslides were in perilous zone with an area of 10344.7 km², which is 53.9% of the total area of the province. Finally, the ratio of percentage of landslides in the perilous zone to the percentage of total area of the zone was calculated. The ratio is 2.5 for the data-driven and 1.79 for the AHP method. The larger ratio in the data-driven method indicates its better consistency than the AHP method, implying more coverage of landslides in a smaller perilous area by the data-driven method. This result represents better accuracy of the data-driven method than the AHP method in landslide hazard zonation.

Keywords: Zonation, Landslide Hazard, Data-Driven, AHP, Tehran Province, GIS.

For Persian Version see pages 101 to 114

*Corresponding author: F. Kamranzad; E-mail: f_kamranzad@ut.ac.ir