

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب و محیط زیست

پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه‌ی آبخیز رودخانه ماربر براساس

تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره

نگارنده: سیدمحمد رضا سجادی

اساتید راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر بهناز بیگدلی

شهریور ۹۹

[در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.]

تقدیم اثر

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

تقدیم به ...

پدر بزرگوار و مادر مهربانم، آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان

خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن

ایستاده‌ام برسم.

همسر عزیزم، او که آفتاب مهرش در وجودم همیشگیست و در تمام سختیها، شکستها و ناامیدیها مایه شادی و آرامش زندگی ام بوده و هست.

تقدیر و تشکر

شایسته است از اساتید گرامی، جناب آقای دکتر احمد احمدی، و سرکار خانم دکتر بهناز بیگدلی
کمال تشکر و قدردانی را به عمل بیاورم؛ چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تامین این پایان نامه
بسیار مشکل می‌نمود.

تعهد نامه

اینجانب سیدمحمد رضا سجادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه ی آب خیز رودخانه براساس تحلیل تصمیم گیری چندمعیاره تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی و دکتر بهناز بیگدلی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

چکیده

زمین لغزش به عنوان یک حادثه‌ی مهیب، موجب آسیب‌رسانی به انسان، فقدان زندگی، زیان اقتصادی، و از بین رفتن میراث فرهنگی و طبیعی می‌شود. امروزه، علیرغم نیاز به روشی برای پیش‌بینی مستقیم محل وقوع زمین لغزش، امکان این کار وجود ندارد؛ لذا پهنه‌بندی خطر زمین لغزش می‌تواند روش غیرمستقیم مناسبی برای پاسخ به این نیاز باشد. هدف از این مطالعه، ادغام اطلاعات چندین تصمیم‌گیری نهایی حاصل از پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده‌ی سمیرم استان اصفهان است. بدین منظور، هشت عامل شیب، جهت شیب، میزان بارش، لیتولوژی، فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا رودخانه، فاصله تا جاده و فاصله تا گسل از میان مهم‌ترین عوامل مؤثر زمین لغزش انتخاب، و در محیط جی‌آی‌اس طبقه‌بندی شدند. با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و غیرفازی، و با قضاوت کارشناسان خبره، لایه‌ها و زیرلایه‌ها وزن‌دهی شدند. هم‌چنین با استفاده از دو روش هم‌پوشانی وزن‌دار و هم‌پوشانی فازی برای هم‌پوشانی دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، چهار نقشه‌ی پهنه‌بندی به‌دست آمدند. سپس چهار نقشه‌ی پهنه‌بندی حاصل، به روش رأی‌گیری وزن‌دار ادغام شدند. بر اساس مقایسه و صحت‌سنجی نتایج با نرخ پیش‌بینی زمین لغزش‌های تاریخی منطقه، روش‌های پهنه‌بندی نتایج مناسبی داشتند که با ادغام اطلاعات نتایج، بهبود بیشتری یافتند. برای صحت‌سنجی تحقیق از مقایسه‌ی نتایج پهنه‌بندی با زمین لغزش‌های تاریخی منطقه استفاده شد. طبق این بررسی، پهنه‌بندی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و هم‌پوشانی وزن‌دار، تحلیل سلسله‌مراتبی و هم‌پوشانی فازی، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و هم‌پوشانی وزن‌دار، و در نهایت تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و هم‌پوشانی فازی، به ترتیب دارای دقت‌های ۸۰٪، ۸۶٪، ۷۵٪، و ۸۸٪ هستند. پس از ادغام نتایج حاصل از این چهار روش، دقت پهنه‌بندی به ۹۰٪ افزایش یافت.

واژگان کلیدی: تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، پهنه‌بندی، خطر زمین لغزش، ادغام اطلاعات، هم‌پوشانی فازی

فهرست مطالب

تقدیم اثر.....	ث
تقدیر و تشکر.....	ج
تعهد نامه.....	ح
چکیده.....	خ
فهرست مطالب.....	د
فهرست شکل ها.....	ر
فهرست جدول ها.....	س
فصل ۱: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تعریف زمین لغزش و انواع آن.....	۲
۳-۱ هدف و انگیزه انجام تحقیق.....	۵
۴-۱ فرضیات تحقیق.....	۷
فصل ۲: مروری بر تحقیقات گذشته.....	۹
۱-۲ مقدمه.....	۱۰
۲-۲ تحقیقات گذشته.....	۱۰
۱-۲-۲ مطالعاتی که در آن ها از روش های تصمیم گیری چندمعیاره استفاده شده است.....	۱۱
۲-۲-۲ مطالعاتی که در آن ها از روش های آماری استفاده شده است.....	۱۶
۳-۲-۲ مطالعاتی که در آن ها از روش های هوش مصنوعی استفاده شده است.....	۲۵
۴-۲-۲ مطالعاتی که در آن ها از روش های سنجش از دور استفاده شده است.....	۲۹
۳-۲ جمع بندی.....	۳۴
فصل ۳: روش پیشنهادی.....	۳۷
۱-۳ مقدمه.....	۳۸
۲-۳ روش پیشنهادی.....	۳۹
۱-۲-۳ داده های ورودی.....	۴۰
۲-۲-۳ لایه های اطلاعاتی.....	۴۰
۳-۲-۳ تحلیل های تصمیم گیری چندمعیاره ی مکانی.....	۴۰
۳-۳ روش تحلیل سلسله مراتبی.....	۴۱

۴-۳	روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی	.....	۴۳
۱-۴-۳	فاز یک: محاسبه‌ی وزن گزینه‌ها و شاخص‌ها	.....	۴۳
۲-۴-۳	فاز دوم: ادغام وزن‌ها	.....	۴۶
۵-۳	روش‌های هم‌پوشانی	.....	۴۷
۶-۳	ادغام تصمیم‌گیری‌ها	.....	۴۷
۷-۳	نتیجه‌گیری	.....	۴۹
فصل ۴:	داده‌های مورد استفاده و نتایج	.....	۵۱
۱-۴	مقدمه	.....	۵۲
۲-۴	منطقه‌ی مطالعاتی	.....	۵۲
۳-۴	نتایج	.....	۵۴
۱-۳-۴	لایه‌های اولیه (اطلاعات)	.....	۵۴
۲-۳-۴	استخراج لایه‌ها و اطلاعات جی‌آی‌اس	.....	۶۱
۳-۳-۴	روش تحلیل سلسله‌مراتبی	.....	۷۱
۴-۳-۴	روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی	.....	۷۳
۵-۳-۴	ادغام نتایج	.....	۷۶
۶-۳-۴	صحت‌سنجی	.....	۷۶
فصل ۵:	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	.....	۷۹
۱-۵	مقدمه	.....	۸۰
۲-۵	نتیجه‌گیری	.....	۸۱
۳-۵	پیشنهادهای	.....	۸۲
مراجع		.....	۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مهم‌ترین نوع زمین‌لغزش‌ها (HIGHLAND, 2004) ۴
- شکل ۲-۱: زمین‌لغزش انتقالی و زمین‌لغزش چرخشی (HIGHLAND, 2004) ۵
- شکل ۱-۳: مراحل فرآیند کلی پردازش اطلاعات در مغز ۳۸
- شکل ۲-۳: فلوچارت روش پیشنهادی ۳۹
- شکل ۳-۳: حالت اول برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ۴۵
- شکل ۴-۳: حالت دوم برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ۴۵
- شکل ۵-۳: حالت سوم برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ۴۵
- شکل ۱-۴: منطقه‌ی مورد مطالعه و زمین‌لغزش‌های تاریخی منطقه ۵۳
- شکل ۲-۴: زمین‌لغزش‌های تاریخی ۵۴
- شکل ۳-۴: مدل رقومی ارتفاعی ۵۵
- شکل ۴-۴: موقعیت گسل‌ها ۵۶
- شکل ۵-۴: موقعیت راه‌ها ۵۷
- شکل ۶-۴: موقعیت آبراهه‌ها ۵۸
- شکل ۷-۴: موقعیت مناطق مسکونی ۵۹
- شکل ۸-۴: لیتولوژی ۶۰
- شکل ۹-۴: میزان بارش منطقه ۶۱
- شکل ۱۰-۴: لایه‌های مؤثر تولیدشده از لایه‌های اطلاعاتی ۶۲
- شکل ۱۱-۴: فاصله تا مناطق مسکونی ۶۳
- شکل ۱۲-۴: پهنه‌بندی فاصله تا آبراهه ۶۴
- شکل ۱۳-۴: موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک ۶۴
- شکل ۱۴-۴: فاصله تا جاده‌ها ۶۵
- شکل ۱۵-۴: لیتولوژی و تقسیم‌بندی مصالح ۶۶
- شکل ۱۶-۴: پهنه‌بندی فاصله تا گسل ۶۹
- شکل ۱۷-۴: پهنه‌بندی شیب ۷۰
- شکل ۱۸-۴: پهنه‌بندی جهت شیب ۷۰
- شکل ۱۹-۴: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی فازی ۷۴
- شکل ۲۰-۴: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی وزنی ۷۴
- شکل ۲۱-۴: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی فازی ۷۵

- شکل ۴-۲۲: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی وزنی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۳: نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حاصل از ادغام نتایج..... ۷۶
- شکل ۴-۲۴: مقایسه‌ی دقت روش‌های پهنه‌بندی..... ۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: طبقه‌بندی انواع زمین‌لغزش - وارنس - ۱۹۷۸ (HIGHLAND, 2004) ۳
- جدول ۱-۳: میزان شدت ارجحیت گزینه‌ها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی ۴۱
- جدول ۲-۳: نسبت ارجحیت گزینه‌ها به یک‌دیگر در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ۴۳
- جدول ۱-۴: کلاس بندی مصالح بر اساس مقاومت فشاری تکم‌حوره ۶۶
- جدول ۲-۴: رأی کارشناس برای روش فازی AHP ۷۱
- جدول ۳-۴: رأی کارشناس برای روش AHP ۷۲
- جدول ۴-۴: وزن‌های حاصل از رأی کارشناس برای تحلیل‌های سلسله‌مراتبی و سلسله‌مراتبی فازی ۷۲
- جدول ۵-۴: صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ۷۷
- جدول ۶-۴: درصد مساحت پهنه‌های مختلف خطر زمین‌لغزش ۷۸

فصل ۱: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

مخاطرات طبیعی^۱ سالانه خسارات جانی و مالی زیادی را بر جای می‌گذارند. در سال ۲۰۱۷، ۳۳۵ مخاطره‌ی طبیعی بیش از ۹۵/۶ میلیون نفر را تحت تأثیر قرارداد، ۹۶۹۷ نفر انسان را کشت، و هزینه‌ی کل ۳۳۵ میلیارد دلاری را تحمیل کرد. همچنین این مخاطرات به‌طور مساوی تقسیم نشده بودند؛ چراکه آسیا با اختصاص ۴۴٪ از همه‌ی حوادث فاجعه‌بار، ۵۸٪ از کل کشته‌ها، و ۷۰٪ از کل افراد آسیب‌دیده به خود، خطرناک‌ترین قاره برای مخاطرات طبیعی به نظر می‌رسید. به‌طور کلی، مخاطرات طبیعی را می‌توان به سیل‌ها، طوفان‌ها، گردبادها، فوران‌های آتش‌فشانی، زلزله، حرکت لایه‌های زمین، سونامی و سایر فرآیندهای زمین‌شناسی تقسیم‌بندی کرد. در گذشته مخاطرات طبیعی به‌عنوان رخ داده‌ای غیرقابل‌پیش‌بینی شناخته می‌شدند؛ اما باگذشت زمان و در سایه‌ی پیشرفت کامپیوترها می‌توان تا حدودی محل رخداد این مخاطرات را پیش‌بینی کرد.

۲-۱ تعریف زمین‌لغزش^۲ و انواع آن

اصطلاح زمین‌لغزش گستره‌ی وسیعی از فرآیندهایی را توصیف می‌کند که منجر به حرکت روبه‌پایین و روبه‌بیرون مصالح شیب‌دار زمین، از جمله سنگ، خاک، پرکننده‌های مصنوعی، و یا ترکیبی از این موارد می‌شود. این مصالح ممکن است با سقوط کردن، سرازیر شدن، لغزش، پخش شدن، و یا جاری شدن حرکت کنند. در جدول ۱-۱ نوعی طبقه‌بندی از انواع زمین‌لغزش بر روی سطح شیب‌دار مشاهده می‌شود که وارنس^۳ در سال ۱۹۷۸ معرفی کرده است. انواع زمین‌لغزش را می‌توان از نظر مصالح دخیل و نوع حرکت لایه‌ها متمایز کرد (Highland, 2004).

¹ Natural disaster

² LandSlide

³ Varnes

جدول ۱-۱: طبقه‌بندی انواع زمین‌لغزش - وارنس - ۱۹۷۸ (Highland, 2004)

نوع حرکت		نوع مصالح		
		مصالح سنگی	خاک‌های مهندسی	
			واریزه درشت‌دانه	خاک ریزدانه
سقوط کردن		ریزش سنگی	ریزش واریزه‌ای	ریزش خاکی
سرازیر شدن		واژگونی سنگی	واژگونی واریزه‌ای	واژگونی قسمتی خاکی
لغزش	چرخشی	چرخشی سنگی	چرخشی واریزه‌ای	چرخشی خاکی
		انتقالی	بلوکی سنگی	لغزش واریزه‌ای	لغزش خاکی
	صفحه‌ای سنگی			
پخش شدن		پخش سنگ	پخش واریزه‌ای	پخش خاکی
جاری شدن		جریان سنگ	جریان واریزه‌ای	جریان خاکی
ترکیب دو نوع حرکت و یا بیشتر) پیچیده				

از انواع زمین‌لغزش‌ها، مهم‌ترین آن‌ها در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود. در این بررسی، منظور از زمین‌لغزش صرفاً زمین‌لغزش چرخشی و زمین‌لغزش انتقالی (شکل ۱-۲) است.

- زمین‌لغزش انتقالی^۱: در لغزش انتقالی، توده‌ای از مواد بر روی یک سطح تقریباً سفت به سمت پایین دامنه می‌لغزند. شرایط زمین‌شناسی و به‌خصوص وجود ناپیوستگی‌های ساختی با جهت مناسب، از جمله عوامل ایجاد یک لغزش انتقالی به شمار می‌آیند.

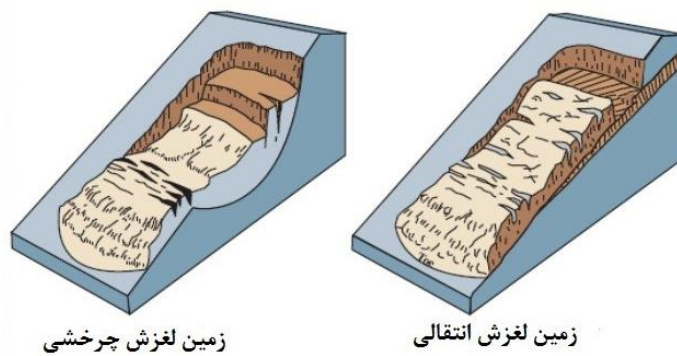
¹ Translational landslide

- زمین لغزش چرخشی^۱: در این حالت گسیختگی در راستای سطوحی منحنی و قاشقی شکلی که حداکثر تنش برشی را تحمل می کنند، صورت می گیرد. برای ایجاد یک لغزش چرخشی، معمولاً نیازی به شرایط زمین شناسی ویژه و گسستگی های ساختی نیست.



شکل ۱-۱: مهم ترین نوع زمین لغزش ها (Highland, 2004)

¹ Rotational landslide



شکل ۱-۲: زمین لغزش انتقالی و زمین لغزش چرخشی (Highland, 2004)

۳-۱ هدف و انگیزه‌ی انجام تحقیق

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، زمین لغزش تلفات جانی و مالی فراوانی را به بشر تحمیل کرده است، پس:

- نیاز به وجود نقشه‌ای که بتواند محل وقوع زمین لغزش را تا حد بالایی پیش‌بینی کند احساس می‌شود.
- وجود نقشه‌ی پیش‌بینی خطر وقوع زمین لغزش^۱ برای استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان‌کشوری موردنیاز است.
- ارائه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی خطر زمین لغزش امری ضروری در راستای فراهم‌سازی بستر مناسب برای سرمایه‌گذاران و مهندسان است تا بتوانند پروژه‌های خود را در محیطی امن اجرا کنند.
- لازم است نقشه‌ای وجود داشته باشد که بتواند با اتکا بر چندین روش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، به پیش‌بینی وقوع زمین لغزش بپردازد؛ زیرا نقشه‌ی حاصل از ادغام چندین روش، می‌تواند باعث کاهش خطاهای احتمالی ناشی از استفاده‌ی یک روش، و نیز سبب

¹ Landslide susceptibility map (LSM)

افزایش دقت پیش‌بینی زمین‌لغزش شود.

حال این پرسش‌ها ایجاد می‌شوند:

- آیا پیش‌بینی محل وقوع زمین‌لغزش امکان‌پذیر است؟

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته، تعیین محل دقیق زمین‌لغزش در حال حاضر امکان‌پذیر نیست و از این رو به بهترین راه موجود، یعنی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پرداخته می‌شود.

- کدام عوامل در وقوع زمین‌لغزش تأثیرگذار هستند؟

عوامل متعددی در وقوع زمین‌لغزش تأثیر دارند که با توجه به مطالعات پیشین، زمین‌شناسی، بارندگی، شیب و جهت شیب عمدتاً از اصلی‌ترین آن‌ها هستند و در تحقیق حاضر نیز به این عوامل توجه شده است.

- هر کدام از این عوامل مؤثر مکانی، چند درصد در وقوع زمین‌لغزش تأثیرگذار هستند؟

برای پاسخ به این پرسش، در این تحقیق از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و نیز شیوه‌ای بر مبنای ادغام نتایج این روش‌ها استفاده شده است.

- آیا استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره¹ برای تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مناسب است؟

در بررسی‌های گذشته، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نتایج مناسبی را در زمینه‌ی وزن‌دهی بر جای گذاشته‌اند. در این تحقیق نیز صحت روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مجدداً سنجیده می‌شود.

- مزایا و معایب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی زمین‌لغزش

¹ Multiple-criteria decision analysis (MCDA)

چیست؟

طبق بررسی‌های پیشین، پیش‌بینی مناسب زمین‌لغزش‌های تاریخی از جمله مزایای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، و کارشناس محور بودن از جمله معایب آن به شمار می‌آیند.

- نقشه‌ی تهیه‌شده با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره چند درصد از

زمین‌لغزش‌های تاریخی را پیش‌بینی می‌کند؟ و آیا ادغام نتایج این روش‌ها نتایج را

بهبود می‌بخشد؟

پاسخ به این سؤال نیاز به پیمودن مراحل از تحقیق دارد. برای رسیدن به جواب دقیق این سؤالات در این تحقیق، به مطالعه‌ی موردی منطقه‌ای در محدوده استان اصفهان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته شده است. هم‌چنین تأثیر ادغام نتایج این روش‌ها با یک‌دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته و از عوامل مؤثر نظیر مقدار بارندگی، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی و ... استفاده شده است. در نهایت، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره صحت‌سنجی شده، و تأثیرات عوامل مؤثر در نتایج آمده است.

۴-۱ فرضیات تحقیق

فرضیه‌سازی در هر پژوهشی با توجه به بررسی‌های اولیه و مرور ادبیات موضوع صورت می‌گیرد، و خطوط اصلی و راهنمای تحقیق را مشخص می‌کند. این فرضیه‌ها با توجه به بررسی‌های اولیه مدون شده‌اند. معمولاً به دلیل پیچیدگی موضوعات و جنبه‌های مختلف آن‌ها، در هر پژوهش بیش از یک فرضیه ارائه می‌گردد و نهایتاً مجموعه‌ای از فرضیه‌ها ساخته می‌شود. فرضیات تحقیق جاری عبارت‌اند از:

- رخداد زمین‌لغزش‌ها تحت شرایط خاص زمین‌شناسی و مورفولوژیکی صورت می‌گیرد.

- شیب و جهت شیب از عوامل مهم در بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای منطقه است.

- منطقه مورد مطالعه، قابل تقسیم به چند پهنه با درجه خطر لغزش متفاوت است.

فصل ۲: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ مقدمه

زمین لغزش‌ها از جمله متداول‌ترین پدیده‌های طبیعی تغییر شکل‌دهنده‌ی سطح زمین هستند که هر ساله خسارات فراوانی را بر انسان‌ها و محیط تحمیل می‌کنند. افزایش سریع جمعیت در دهه‌های اخیر از یک‌سو، و گسترش شهرها به‌طرف مناطق با شیب زیاد و کوهستانی نیز از سوی دیگر دخالت هر چه بیشتر بشر در طبیعت را به همراه داشته‌اند. این دو عامل به‌صورت جدی سبب افزایش وقوع زمین‌لغزش و بالا رفتن میزان خسارت و تلفات این پدیده در سال‌های اخیر شده‌اند.

علی‌رغم افزایش دانش بشری در رابطه با سازوکار وقوع زمین‌لغزش‌ها و عوامل مؤثر در وقوع آن‌ها و نیز تلاش بسیاری از محققان و علاقه‌مندان در کشورهای مختلف، پیش‌بینی می‌شود که وقوع زمین‌لغزش‌ها و خسارات حاصل از آن‌ها در آینده ابعاد وسیع‌تر و گسترده‌تری پیدا کند؛ چراکه تغییرات انسان در طبیعت و استفاده از نواحی کوهستانی و مستعد لغزش هم‌چنان در حال افزایش هستند. ادامه‌ی این روند توجه بسیاری از دانشمندان و دولت‌مردان را در کشورهای مختلف جهان به بررسی ابعاد گوناگون این پدیده و روش‌های پیش‌بینی و کنترل آن معطوف داشته است. در بسیاری از کشورها مانند ایالات متحده‌ی آمریکا و ژاپن، درباره‌ی پدیده‌ی زمین‌لغزش، مطالعات و تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. اغلب این فعالیت‌ها، متمرکز به زیستگاه انسانی و مسیرهای ارتباطی حیاتی بوده‌اند. بعضی کشورها با ایجاد مؤسسات گوناگون، درگیر عمل پهنه‌بندی منطقه زمین‌لغزش شده‌اند و برای شروع مطالعات مشابه برنامه‌ریزی کرده‌اند.

۲-۲ تحقیقات گذشته

فل و همکاران حساسیت زمین‌لغزش را برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و ارتباط آن‌ها با مجموعه‌ی عوامل مؤثر در نظر گرفتند (Fell, et al., 2008). این روش‌های غیرمستقیم شامل مدل‌سازی کمی و کیفی و انواع مختلف تکنیک‌های آنالیز هستند. تولید نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش به‌طور کلی شامل دو دسته روش می‌شود: (۱) روش‌های کیفی که مبتنی بر دانش

متخصصان و توسعه‌ی موجودی زمین‌لغزش‌ها هستند، مانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی که بسیاری از محققان از آن استفاده می‌کنند؛ و (۲) روش‌های کمی از جمله مدل‌سازی‌های دومتغیره و چندمتغیره که برای استفاده آماری از زمین‌لغزش مطرح می‌شوند.

در این تحقیق، مطالعات پیشین به چهار دسته تقسیم شده‌اند: (۱) مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است؛ (۲) مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های آماری استفاده شده است؛ (۳) مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده است؛ و (۴) مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های سنجش از دور استفاده شده است. دسته‌ی شماره‌ی ۱ زیرمجموعه‌ی روش‌های کیفی و دسته‌ی شماره‌ی ۲ تا ۴ زیرمجموعه‌ی روش‌های کمی قرار داده می‌شوند.

۲-۱-۲ مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است.

برا و همکاران در سال ۲۰۱۹ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ای از هیمالیای شرقی و واقع در جنوب سیکیم به نام نامچی کردند. آن‌ها برای پهنه‌بندی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک‌های هم‌پوشانی وزنی استفاده کردند. لایه‌های مؤثر به‌کاررفته در این مطالعه عبارتند از: نقشه‌ی میزان بارش، تراکم خطواره‌ها، پراکندگی زه‌کش، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری زمین، پوشش زمین، و خاک. آن‌ها نتایج پهنه‌بندی را با مطالعه میدانی و تحلیل مبتنی بر فن‌آوری اطلاعات مکانی مورد سنجش قرار دادند. نتایج حاصل نشان دادند که مناطق پرخطر زمین‌لغزش با مناطقی از فرآیندهای فرسایشی فعال (شیب‌های تند/شیب‌های برش‌خورده/خطواره‌ها) مرتبط هستند (Bera, et al., 2019).

شارما و همکاران در سال ۲۰۱۸ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ی تارامشالا در کشور هند کردند. منطقه‌ی تارامشالا دره کانگرا در هند، یکی از شهرهای در حال رشد هیمالیایی است که تقریباً در تمام طول سال در معرض وقوع زمین‌لغزش قرار دارد. با استفاده از مشاهدات

میدانی، فهرستی از زمین لغزش‌ها برای تارامشالا ایجاد شد. بر اساس مطالعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای، هشت عامل معمول از جمله سنگ‌شناسی، خاک، شیب، جنبه، فاصله از گسل، فاصله از زه‌کشی (سیستم فاضلاب)، فاصله از جاده، و پوشش زمین، برای نشان‌دادن مشکلات زمین لغزش منطقه‌ی مورد مطالعه، استفاده شده‌اند. این تحقیق، ارزیابی تطبیقی نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و روش نسبت فراوانی ارائه می‌دهد. نقشه‌های تولیدشده برای بررسی سازگاری در طبقه‌بندی مکانی مناطق حساس، با استفاده از منحنی نرخ پیش‌بینی، چگالی زمین لغزش و روش‌های ماتریس خطا، مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)¹ نشان می‌دهد که حداکثر وزن عامل، از سنگ‌شناسی و خاک، به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۲۵ است. نسبت‌های فراوانی کلاس‌های عامل، نشان‌دهنده‌ی یک هم‌بستگی قوی از گروه سنگ تارامشالا (ارزش ۱/۲۸) با زمین لغزش است که هم‌چنین با نتایج روش AHP که در همان سنگ‌شناسی دارای حداکثر وزن بالارزش ۰/۷۱ است، مطابقت دارد. نقشه‌های منطقه‌بندی حساسیت به زمین لغزش از نسبت فراوانی آماری و روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی ابتکاری، به پنج دسته تقسیم می‌شوند: حساسیت بسیار کم، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت زیاد، و حساسیت بسیار زیاد. توزیع تراکم زمین لغزش در هر کلاس حساسیت، مطابقت با شرایط زمینی را نشان می‌دهد. از منحنی نرخ پیش‌بینی برای ارزیابی کارایی پیش‌بینی زمین لغزش در آینده مربوط به نقشه‌های حساسیت ایجادشده، استفاده شده است. منحنی‌های پیش‌بینی، منتج به مقدار مساحت زیر منحنی شده که ۷۶/۷۷٪ برای فرایند تحلیل سلسله مراتبی و ۷۳/۳۸٪ برای روش نسبت فراوانی است. ارزیابی نهایی نقشه‌های حساسیت، بر مبنای روش ماتریس خطا برای محاسبه منطقه توزیع شده در بین مناطق حساس هر نقشه بود. این تکنیک منجر به ارزیابی تفاوت‌های مکانی و مطابقت بین هر دو نقشه‌ی حساسیت شده است. نتایج ارزیابی، ۷۰٪ شباهت مکانی کلی را بین نقشه‌های حساسیت به

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)

زمین لغزش نشان می‌دهند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که نقشه حساسیت به زمین لغزش (LSM)^۱ که از روش AHP و روش نسبت فراوانی تولید شده، نتایج خوبی را به دست داده است؛ زیرا ۱۰۰٪ داده‌های زمین لغزش در رده‌های حساسیت زیاد و حساسیت خیلی زیاد هر دوی این نقشه‌ها قرار دارند. همچنین، مطابقت مکانی تقریباً ۷۰٪ بین نقشه‌های حاصل از آن، قابلیت اطمینان نتایج را در این مطالعه افزایش می‌دهد؛ بنابراین، LSM تولیدشده از روش AHP با ۷۶/۷۷٪ کارایی پیش‌بینی زمین لغزش، می‌تواند برای برنامه‌ریزی سராچه‌های توسعه‌ای آینده به دولت کمک کند و مفید واقع شود (Sharma & Mahajan, 2018).

بایس احمد در سال ۲۰۱۵ در مناطق تپه‌ای شهرنشین شهرداری کاکس بازار^۲، واقع در بنگلادش اقدام به پهنه‌بندی زمین لغزش کرد. در این بررسی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های سنجش دور، در LSM به کار رفتند و ۱۲ نقشه عامل مربوطه را لحاظ کردند که عبارتند از: شیب، پوشش منطقه‌ای، شاخص گوناگونی نرمالایز شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI)^۳، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، رطوبت خاک، الگوی بارش، فاصله از جاده، زه‌کشی، آبراهه^۴، سازه^۵، و خطواره‌های گسل. به منظور مدل‌سازی، چهار تکنیک شامل فرآیند سلسله‌مراتب مصنوعی (AHP)^۶، ترکیب خطی وزنی (WLC)^۷، و رگرسیون لجستیک (LR)^۸ اجرا شد. نقشه‌ی فهرست زمین لغزش با ۷۴ موقعیت تاریخی زمین لغزش با استفاده از پیمایش میدانی فراهم شد. نتایج مدل‌سازی مورد تأیید قرار می‌گیرند و منطقه زیرین منحنی (AUC)^۹ مشخصات عملکرد نسبی را به کار می‌گیرند. مقادیر

¹ Landslide Susceptibility Mapping (LSM)

² Cox's Bazar Multiplity

³ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

⁴ Stream

⁵ Structure

⁶ Artificial Hierarchy Process (AHP)

⁷ Weighted Linear Combination (WLC)

⁸ Logistic Regression (LR)

⁹ Area Under Curve (AUC)

AUC روش‌های AHP، WLC، LR و MLR به ترتیب ۸۸، ۸۵، ۹۰، ۷۴، ۹۰ و ۹۰/۴ درصد ارزیابی می‌شوند (Ahmed, 2015b).

بایس احمد، در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۵ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ی شهری چیتاگنگ بنگلادش کرد. دلیل اصلی زمین‌لغزش‌ها باران‌های سیل‌آسا در مدت‌زمان کوتاه بوده است. در این تحقیق سه روش متفاوت تجزیه و تحلیل اطلاعات جغرافیایی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه - روند سلسله‌مراتبی مصنوعی (AHP)، ترکیب خطی موزون (WLC)، و میانگین وزن واحد (OWA)^۱ - برای ارزیابی علمی نواحی حساس به زمین‌لغزش در منطقه‌ی چیتاگونگ بنگلادش به کار گرفته شده است. نُه لایه‌ی موضوعی متفاوت، یا همان فاکتورهای مؤثر زمین‌لغزش در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه، هفت حالت حساسیت زمین‌لغزش بر اساس سه تکنیک موزون تولید شده‌اند. سرانجام توانایی روش‌ها با استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم تأیید شد. دقت نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش تولیدشده با استفاده از روش‌های AHP، WLC1، WLC2، WLC3، OWA1، OWA2، OWA3 به ترتیب ۸۹/۸، ۸۳/۹، ۹۱/۱، ۸۸/۵، ۹۰/۴، ۹۵/۱ و ۸۷/۱ سنجیده شده‌اند. نتایج تأییدشده از انطباق رضایت‌بخش بین نقشه‌های حساسیت تولیدشده و داده‌های موجود در ۲۰ مکان زمین‌لغزش تاریخی حکایت دارند (Ahmed, 2015a).

کامران‌زاد و همکاران در سال ۱۳۹۴ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در استان تهران کردند. در این بررسی، آن‌ها از روش‌های تحلیل آماری (داده‌محور) و قضاوت کارشناسی (تحلیل سلسله‌مراتبی) برای تعیین میزان خطر و تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی استفاده کردند. برای این منظور، ابتدا از میان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش، شش عامل مقدار شیب، جهت شیب، جنس مصالح زمین‌شناسی، فاصله از گسل، شتاب زمین‌لرزه، و میزان بارندگی که تهیه‌ی داده‌هایشان برای همه‌ی

¹ Ordered Weighted Average (OWA)

استان تهران امکان پذیر بود، بر پایه‌ی قضاوت مهندسی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۱ کلاسه‌بندی شدند. در روش داده‌محور، با قطع لایه‌های اطلاعاتی با نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش‌ها و در روش AHP، بر پایه‌ی قضاوت کارشناس خبره، لایه‌ها و زیرلایه‌های اطلاعاتی، وزن‌دهی و با هم تلفیق شدند، و سپس برای هر روش، نقشه‌ی 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 محدوده‌ی خطرناک (مجموع پهنه‌های پرخطر و بسیار پرخطر نقشه) با مساحت ۷۱۳۵/۱۵ کیلومترمربع (۳۷/۲٪ از مساحت کل استان تهران) و در روش AHP، ۹۶/۵٪ از زمین لغزش‌ها در محدوده‌ی خطرناک با مساحت ۱۰۳۴۴/۷ کیلومترمربع (۵۳/۹٪ از مساحت کل استان تهران) قرار گرفته‌اند. در پایان با تقسیم درصد تعداد زمین لغزش در پهنه خطرناک به درصد مساحت پهنه‌ی خطرناک در کل مساحت استان تهران، نسبت عددی ۲/۵ برای روش داده‌محور و نسبت عددی ۱/۷۹ برای روش AHP محاسبه شد. مقایسه‌ی مقادیر نسبت عددی دو روش فوق نشان داد که روش داده‌محور با نسبت عددی بزرگتر، جواب بهتری داشته است؛ زیرا نشان می‌دهد که در مقایسه با روش AHP، درصد بالایی از زمین لغزش‌ها را در مساحت کوچک‌تری به‌عنوان پهنه خطرناک پوشش داده است. بنابراین در تعیین پهنه‌ی خطرناک نسبت به روش AHP دقت بالاتری دارد (فرنز کامران زاد و همکاران، ۱۳۹۴).

باسفی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اقدام به پهنه‌بندی زمین لغزش در منطقه‌ی پنوروگو^۲ واقع در شرق جاوا کشور اندونزی کردند. آن‌ها هدف این تحقیق را شناسایی حساسیت به زمین لغزش در هر روستا در منطقه پنوروگو اعلام کردند و برای این منظور، از منطق فازی در مقایسه با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده کردند. روش منطق فازی، از پنج متغیر برای شناسایی حساس‌ترین مناطق استفاده می‌کند. متغیرها شیب زمین، نوع خاک، کاربری زمین، بارش باران، و ارتفاع زمین

^۱ Geographic Information System (GIS)

^۲ Ponorogo

هستند. از این متغیرها برای تعیین سطح آسیب‌پذیری ناحیه در برابر زمین‌لغزش، در سطوح بسیار کم، کم، متوسط، یا زیاد استفاده می‌شود. اعتبارسنجی نتایج مقایسه بین دو روش با استفاده از محاسبات مربع کای^۱ انجام می‌گیرد. مربع کای، سطح رابط‌های آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لغزش‌ها را با نقاط زمین‌لغزش‌های سال گذشته آزمایش می‌کند. در نتیجه‌ی این محاسبات مشخص می‌شود که مقدار مجموع منطق‌فازی برابر ۹۲/۵۷۶، و برای AHP-طبقه‌بندی شکست طبیعی^۲ برابر ۱۸۴/۹۱۷ است. با توجه به دو مقدار اعتبارسنجی هرکدام از این روش‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رابط‌های بین طبقه‌بندی حساسیت در برابر زمین‌لغزش، با خود زمین‌لغزش‌ها بسیار قابل توجه است. اگرچه هر دو بسیار قابل توجه هستند، اما مقادیر بزرگتر مربع کای AHP-طبقه‌بندی شکست طبیعی، نتیجه‌ی اعتبارسنجی بهتری را به دست می‌دهند (Basofi, et al., 2016).

۲-۲-۲ مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های آماری استفاده شده است.

میترا و همکاران در سال ۲۰۱۸ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در ناحیه‌ی دارجلینگ در شمال‌غربی بنگال کردند. این ناحیه مهم‌ترین ایستگاه تپه‌ای برای بخش گردشگری و موقعیت مهم استراتژیک مرزی است. به‌منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش و متعاقب آن، منطقه‌بندی ریسک زمین‌لغزش در ناحیه‌ی دارجلینگ، عواملی مانند شیب، تراکم زه‌کشی، عمق گل در بارش باران، کاربری زمین/پوشش زمین، و زمین‌شناسی مورد توجه قرار گرفته است. عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و وابستگی متقابل آن‌ها به‌طور دقیقی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، مدل شبکه‌ی بیزی که یک مدل گرافیکی آماری احتمالی است و مجموعه‌ای از متغیرها و وابستگی‌های شرطی آن‌ها را نشان می‌دهد، به‌کار گرفته شده است. شبکه‌ی بیزی، برای ارزیابی تأثیرات عوامل استفاده و بدین ترتیب، وزن‌دهی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش محاسبه شده است. در نهایت، با

^۱ Chi-square

^۲ AHP-natural break classification

استفاده از سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDSS)^۱ در محیط GIS، منطقه‌بندی ریسک زمین‌لغزش ناحیه‌ی دارجلینگ تهیه شده است. اعتبارسنجی با توجه به ۲۵ مکان تاریخی زمین‌لغزش انجام شده و دقتی بیش از ۹۲٪ به دست آمده است. رنگی‌رنگلیوت^۲ منطقه‌ای با بیشترین میزان حساسیت به زمین‌لغزش در دارجلینگ است (Mitra, et al., 2018).

جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در استان یونان چین کردند. هدف از این مطالعه، بررسی دقت و قابلیت اطمینان روش‌های چندرگرسیونی برای ارزیابی حساسیت به بلایای زمین‌شناسی است؛ از جمله رگرسیون لجستیک (LR)، خودهمبستگی مکانی (SAR)^۳، رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)^۴، و رگرسیون بردار پشتیبانی (SVR)^۵. در این مطالعه، استان یونان چین را به عنوان سایت تحقیقاتی انتخاب کردند و داده‌های مربوط به بلایای زمین‌شناسی معمول و خطرات مرتبط با آن‌ها را در منطقه‌ی مورد مطالعه، برای ایجاد یک سیستم شاخص مربوطه جهت ارزیابی بلایای زمین‌شناسی جمع‌آوری کردند. چهار روش برای مدل‌سازی و ارزیابی حساسیت به بلایای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت. توانایی پیش‌بینی روش‌ها، با استفاده از منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم (ROC)^۶ و منحنی نرخ موفقیت، مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت، اعتبارسنجی دقت مکانی برای بهبود نتایج حاصل از ارزیابی معرفی، و توسط منحنی مکانی مشخصه‌ی عملکرد سیستم (SROC)^۷ و منحنی مکانی نرخ موفقیت (SSR)^۸ نشان داده شد. نتایج نشان می‌دهند که: (۱) همه‌ی این روش‌ها با توجه به منحنی SROC و SSR معتبر هستند و روش اعتبارسنجی دقت مکانی، نتایج و دقت مدل‌سازی آن‌ها را بهبود می‌بخشد، به‌طوری‌که سطح زیر

¹ Multiple-criteria Decision Support System (MCDSS)

² Rangli Rangliot

³ Spatial Autoregression (SAR)

⁴ Geographical Weighted Regression (GWR)

⁵ Support Vector Regression

⁶ Receiver Operating Characteristic (ROC)

⁷ Spatial ROC (SROC)

⁸ Spatial Success Rare (SSR)

منحنی (AUC) مقادیر منحنی‌های ROC حدود ۰/۳-۰/۱۳ و سطح زیر منحنی مقدار منحنی نرخ موفقیت ۰/۱۵-۰/۲۰ افزایش یافته است؛ ۲) صحت ارزیابی‌های LR، SAR، GWR و SVR برابر با ۰/۸۳۲۵، ۰/۸۳۹۳، ۰/۸۳۷ و ۰/۸۳۹۵ بوده است که نشان می‌دهد چهار روش رگرسیون آماری، هر کدام قابلیت ارزیابی خوبی برای ارزیابی حساسیت به بلایای زمین‌شناسی دارند و نتایج ارزیابی SVR نسبت به روش‌های دیگر، منطقی‌تر است؛ ۳) بر اساس نتایج ارزیابی SVR، مناطق مرکزی-جنوبی استان یونان، بالاترین حساسیت را دارند و کمترین حساسیت، عمدتاً در بخش مرکزی و شمالی منطقه مطالعه قرار دارد (Jiang, et al., 2017).

هنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه ییهوانگ^۱ چین کردند. بدین منظور آن‌ها از دو مدل جدید تحت عناوین رگرسیون دو کلاسه لجستیک کرنل (KLR)^۲ و درخت تصمیم‌گیری متناوب (ADT)^۳ برای نگاشت حساسیت زمین‌لغزش استفاده کردند. تاکنون روش ADT برای مدل‌کردن حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار نگرفته است و این مقاله تلاش دارد تا کاربردی نوین از این روش را ارائه دهد. به‌منظور مقایسه، روش معمول دستگاه‌های بردار حمایتی (SVM)^۴ که به‌طور گسترده در مقالات استفاده می‌شود نیز بررسی شده است و نتایج مورد ارزیابی واقع شده‌اند. در ابتدا یک لیست نقشه با ۱۸۷ محل برای مطالعه از منابع مختلف ایجاد شد. سپس محل‌های زمین‌لغزش به‌منظور ساخت مدل‌های زمین‌لغزش و اعتبارسنجی مدل، به‌ترتیب، به نسبت ۷۰ به ۳۰ تقسیم شدند. سپس یک دیتابیس فضایی با مجموعاً ۱۴ فاکتور مؤثر بر زمین‌لغزش آماده‌سازی شد که شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی (TVI)^۵، شاخص

¹ Yihuang

² Two-class Kernel Logistic Regression (KLR)

³ Alternating Decision Tree (ADT)

⁴ Support Vector Machines (SVM)

⁵ Topographic wetness index

قدرت جریان (SPI)^۱، شاخص جابجایی رسوب (STI)^۲، انحناى زمین، کاربری زمین، شاخص گوناگونی نرمالایز شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI)، سنگ‌شناسی^۳، فاصله تا گسل‌ها، فاصله تا رودخانه‌ها، فاصله تا جاده‌ها، و بارش باران را شامل می‌شود. با استفاده از روش‌های SVM، KLR و ADT و نیز داده‌های آموزشی، سه مدل حساسیت زمین‌لغزش ساخته شد. سه مدل حاصل با استفاده از مشخصه‌ی عملکردی سیستم (ROC)، شاخص کاپا^۴، و پنج معیار ارزیابی آماری دیگر مورد اعتبارسنجی و مقایسه قرار گرفتند. به‌علاوه، مقایسه‌ی دوبه‌دوی مساحت زیر منحنی ROC به‌منظور ارزیابی وجود تفاوت قابل‌توجه در عملکرد کلی سه مدل انجام گرفت. میزان مطلوبیت تطابق‌ها ۹۲/۵٪ برای مدل KLR، ۸۸/۸٪ برای مدل SVM، و ۹۵/۷٪ برای مدل ADT است. توانایی‌های پیش‌بینی برای سه مدل SVM، KLR و ADT به‌ترتیب برابر ۸۱/۱٪، ۸۴/۲٪، و ۹۳/۳٪ است. نتیجه نشان می‌دهد که مدل ADT عملکرد کلی بهتری دارد و نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل‌های KLR و SVM ارائه می‌کند. مدل KLR از نظر مقادیر پیش‌بینی مثبت، تا حدودی عملکرد بهتری نسبت به SVM نشان می‌دهد. ADT و KLR دو روش داده‌کاوی امیدوارکننده هستند که می‌توان برای نگاشت حساسیت زمین‌لغزش لحاظ کرد (Hong, et al., 2015).

یوسف و پورقاسمی در سال ۲۰۲۰ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبی وادی تیا، منطقه‌ی اسیر عربستان سعودی کردند. بدین منظور چهار تکنیک مدل‌سازی شامل جنگل تصادفی (RF)^۵، درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT)^۶، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)^۷، و مدل

¹ Stream power index

² Sediment transport index

³ Lithology

⁴ Kappa index

⁵ Random Forest (RF)

⁶ Boosted Regression Tree (BRT)

⁷ Classification and Regression Tree (CART)

خطی عمومی (GLM)^۱ را اعمال، و نتایج آن‌ها را برای تهیه‌ی نقشه‌های پتانسیل زمین‌لغزش استفاده کردند. هم‌چنین به‌منظور شناسایی موقعیت وقوع زمین‌لغزش و تهیه‌ی نقشه‌های مربوطه، به تفسیر داده‌های گوناگونی هم‌چون تصاویر ماهواره‌ای باکیفیت، نقشه‌های توپوگرافیک، اسناد تاریخی، و مطالعات پیمایشی-میدانی گسترده پرداخته شد. در مجموع ۱۲۵ مکان وقوع زمین‌لغزش به‌کمک ArcGIS2 نقشه‌برداری، و به دو دسته داده‌های آموزشی (۷۰٪) و صحت‌سنجی (۳۰٪) تقسیم شده‌اند. عوامل تأثیرگذار بر شکل‌گیری زمین‌لغزش در ۱۱ لایه تعریف و تقسیم‌بندی شده‌اند که عبارتند از: نسبت جهت شیب، ارتفاع، فاصله از گسل‌ها، لیتولوژی، انحنا، انحنای پلان، انحنای پروفایل، میزان بارندگی، فاصله از جریان‌های آبی، فاصله از جاده‌ها، زاویه شیب، و کاربری اراضی. روابط حاکمه بین عوامل تأثیرگذار بر زمین‌لغزش و مجموعه‌ی نقشه‌های زمین‌لغزش با بهره‌گیری از ۳۲ مدل معرفی شده (RF، BRT، CART، و مدل افزایشی تعمیم‌یافته GAM) محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل با مکان‌هایی از وقوع لغزش مقایسه شده‌اند که در خلال آموزش مدل مورد استفاده نبوده‌اند. منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم (ROC)، مساحت زیر منحنی (AUC) برای سنجش دقت مدل‌ها به‌کار گرفته شده است. منحنی‌های نرخ موفقیت (داده‌های آموزشی) و پیش‌بینی (داده‌های صحت‌سنجی) مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. بنا بر نتایج می‌توان مشاهده کرد که AUC نرخ موفقیت برای RF، BRT، CART، و GLM به ترتیب برابر با ۷۸/۳٪، ۹۵/۸٪، ۸۱/۶٪، و ۸۲/۱٪ است. نرخ‌های پیش‌بینی متناظر با این مدل‌ها (به همان ترتیب قبلی) نیز برابرند با ۸۱/۲٪، ۸۵/۶٪، ۸۶/۲٪، و ۷۶/۹٪. بنابراین با توجه به این داده‌ها، نقشه‌های پتانسیل زمین‌لغزش به چهار دسته‌ی پتانسیل وقوع کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد تقسیم‌بندی گردیده‌اند. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که مدل‌های RF، BRT، CART، و GLM دقت قابل‌ملاحظه‌ای را برای تدوین نقشه‌های پتانسیل زمین‌لغزش در پی داشته‌اند (Youssef & Pourghasemi, 2020).

¹ General Linear Model (GLM)

اشلاير و همکاران در سال ۲۰۱۴ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه سه دره کشور چین کردند. یک نقشه‌ی دقیق حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک با مجموعه‌داده‌هایی که برای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ایجاد شده بود، تولید شد. بخش ژانگژیان-شیژو^۱ در منطقه‌ی مخزن سد سه‌گرژ^۲ که به‌عنوان یکی از رانش‌خیزترین مناطق در چین شناخته می‌شود، به‌عنوان مورد مناسب برای ارزیابی فرکانس و توزیع زمین‌لغزش‌ها انتخاب شده است. منطقه‌ی موردنظر یک ناحیه‌ی ۲۶۰/۹ کیلومترمربعی را با ناحیه رانش ۵/۳ کیلومترمربع تحت پوشش قرار داده است. چهار دامنه داده برای این پژوهش استفاده شده است که عبارتند از: حسگرهای ازراه‌دور، نقشه‌های موضوعی، نقشه‌های زمین‌شناختی و نقشه‌های توپوگرافیکی، همگی با پیکسل‌ها یا سلول‌های ۲۵×۲۵ مترمربعی. روابط آماری برای حساسیت رانشی زمین با استفاده از دیتابیس‌های زمین‌لغزش و عوامل مسبب رانش زمین ایجاد شده‌اند. آن‌ها کاربرد رویکردهای رگرسیون لجستیک را برای استفاده‌ی تمام متغیرهای پیوسته همان‌گونه که هستند، گسترش دادند و از چگالی رانش زمین برای تبدیل این متغیرهای نامی به متغیر عددی استفاده کردند. با توجه به نقشه، ۲/۸٪ منطقه‌ی مورد مطالعه به‌عنوان ناحیه‌ای با حساسیت خیلی بالا شناخته می‌شود؛ درحالی‌که ناحیه‌های با حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، و زیاد به‌ترتیب ۱۸/۲٪، ۳۶/۲٪، ۲۶/۷٪، و ۱۶/۱٪ مساحت منطقه را پوشانده‌اند. کیفیت نگاهش حساسیت اعتبارسنجی شد و مقادیر درصد دسته‌بندی صحیح^۳ و خطای ریشه‌ی میانگین مجذورات (RMSE)^۴ برای اعتبارسنجی داده‌ها به ترتیب ۸۱/۴٪ و ۰/۳۹۲ بود (Schleier, et al., 2014).

دوکوتا و همکاران در سال ۲۰۱۳ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در جاده موگلینگ-

¹ Zhongxian-Shizhu

² Three Gorges reservoir

³ Correct classification percentage

⁴ Root mean square error

نارایانگات^۱ و منطقه پیرامون آن در حوضه‌ی نپال هیمالیا کردند. آن‌ها ارزیابی احتمال وقوع زمین‌لغزش را با استفاده از مدل‌های دومتغیره (عامل اطمینان و شاخص آنترופی) و مدل چندمتغیره (رگرسیون لگاریتمی) انجام دادند. ابتدا نقشه‌ی فهرست زمین‌لغزش‌ها با استفاده از گزارش‌ها و تصاویر هوایی قبلی و همچنین با نقشه‌برداری از منطقه آماده شده است. در نتیجه ۳۲۱ زمین‌لغزش نقشه‌برداری شده‌اند که از آن‌ها به‌طور تصادفی، ۲۴۱ عدد (۷۵٪) برای ساخت مدل‌های احتمالاتی زمین‌لغزش استفاده شده است. درحالی‌که ۸۰ مورد (۲۵٪) باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. تأثیر ارزیابی احتمالات زمین‌لغزش‌ها با استفاده از GIS و آمار، وابسته به انتخاب مناسب عواملی است که نقش اصلی در پایداری شیب (شیروانی) دارند. در این تحقیق، عوامل وابسته به شرایط در زمین‌لغزش‌ها، ارزیابی شده‌اند که از جمله‌ی آنان می‌توان به گرادیان شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای نقشه، سنگ‌شناسی، استفاده از زمین، فاصله از گسل‌ها، رودخانه و جاده‌ها، شاخص رطوبت توپوگرافی، و شاخص انتقال رسوبات اشاره کرد. این عوامل از نقشه‌ی توپوگرافی، نقشه‌ی زه‌کش‌ها، نقشه‌ی جاده، و نقشه‌ی جغرافیایی به‌دست آمده‌اند. در نهایت تصدیق نقشه‌ی احتمالات زمین‌لغزش با استفاده از منحنی ROC انجام شده است. نتایج تخمین نقشه ROC نشان داد که نقشه‌ی احتمالات با استفاده از شاخص مدل آنترופی با مقدار مساحت زیر نمودار ۰/۹۰۱۶ بیشترین دقت پیش‌بینی را با مقدار ۰/۹۰۱۶٪ داراست. به‌طور مشابه، نقشه‌های احتمالاتی تولیدشده با استفاده از مدل رگرسیون منطقی و مدل عامل اطمینان، دقت پیش‌بینی ۰/۸۶/۲۹٪ و ۰/۸۳/۵۷٪ را دارند. علاوه بر این، نمودار ROC نشان داد که نرخ موفقیت هر سه مدل بیش از ۸۰٪ است (مثلاً ۰/۸۹/۱۵٪ برای مدل IOE^۲، ۰/۸۹/۱٪ برای مدل LR، و ۰/۸۷/۲۱٪ برای مدل CF^۳)؛ بنابراین، نتیجه این شده است که تمامی مدل‌های به‌کاررفته در این تحقیق، دقت معقول و مناسبی در پیش‌بینی احتمال وقوع زمین‌لغزش بخش جاده موگلینگ-نارایانگات نشان داده‌اند (Devkota, et al., 2013).

^۱ Mugling-Narayanghat

^۲ Index of Entropy (IOE)

^۳ Certainty Factor (CF)

پورقاسمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه‌ی صفارود ایران کردند. بدین منظور، آن‌ها از دو مدل آماری نظیر شاخص آنتروپی و احتمال شرطی استفاده کردند. در گام نخست، موقعیت‌های زمین‌لغزش در منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از تفسیر تصاویر هوایی و بررسی‌های میدانی، شناسایی شدند. از ۱۵۳ زمین‌لغزش شناسایی‌شده، ۱۰۵ محل (۷۰٪) برای نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفتند؛ درحالی‌که ۴۸ مورد باقی‌مانده (۳۰٪) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. فاکتورهای تعیین‌کننده‌ی زمین‌لغزش مانند میزان شیب، نسبت شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، فاصله تا گسل‌ها، فاصله تا رودخانه‌ها، فاصله تا جاده‌ها، شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI)^۱، شاخص توان جریان (SPI)^۲، طول شیب (LS)^۳، کاربری زمین، و انحنای زمین با استفاده از بانک داده‌ی فضایی استخراج‌شده‌اند. با استفاده از این فاکتورها، حساسیت زمین‌لغزش و وزن هر فاکتور به‌وسیله‌ی مدل‌های شاخص آنتروپی و احتمال شرطی تحلیل شدند. در نهایت، منحنی‌های ROC برای نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش رسم شدند و سطوح زیر منحنی (AUC) نیز مورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج اعتبارسنجی نشان داده‌اند که مدل شاخص آنتروپی ($AUC = ۰.۸۶/۰.۰۶$) اندکی بهتر از مدل احتمال شرطی ($AUC = ۰.۸۲/۰.۷۵$) عمل کرده است (Pourghasemi, et al., 2012).

متیو و همکاران در سال ۲۰۰۹ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ی گاوهال لسر هیمالیا واقع در هندوستان کردند. در این تحقیق، آن‌ها از روش آماری چندمتغیره به‌نام تحلیل رگرسیون لجستیک باینری (BLR)^۴ به‌منظور نقشه‌برداری LSZ^۵ در منطقه‌ی گاوهال لسر هیمالیا

^۱ Topographic Wetness Index (TWI)

^۲ Stream Power Index (SPI)

^۳ Slope Length and Steepness (LS)

^۴ Binary Logistic Regression (BLR)

^۵ Landside Susceptibility Zonation (LSZ)

که در هندوستان و نزدیک به محدوده‌ی اصلی محاصره (MBT)^۱ قرار گرفته است، استفاده کردند. این روش به تمامی متغیرهای پیش‌بینی طبقه‌ای و مداوم در تحلیل رگرسیون آزادی عمل می‌دهد. سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی برای آماده‌سازی پایگاه‌داده‌های عوامل سببی بی‌ثباتی شیب و مکان‌های زمین‌لغزش، و نیز برای انجام مدل‌سازی فضایی حساسیت زمین‌لغزش به کار رفته‌اند. تحلیل قدم‌به‌قدم و پیش‌رونده‌ی رگرسیون لجستیک، از روش برآورد حداکثر احتمال به کاررفته در رگرسیون استفاده می‌کند. مقدار ثابت و ضرایب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده که با استفاده از مدل رگرسیون به دست آمده‌اند، برای محاسبه‌ی احتمال شکست شیب برای تاپرهای برقی منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده می‌شوند. مدل رگرسیون لجستیک پیش‌بینی‌کننده با تحلیل منحنی مشخصه‌ی کارکرد، مورد تأیید قرار می‌گیرد و دقت ۹۱/۷٪ برای مدل پیشرفته BLR دارد (Mathew, et al., 2009).

ابیا و همکاران در سال ۲۰۰۷ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کوبا کردند. آن‌ها در این بررسی پهنه‌بندی را در سطح ملی و از طریق مدل نیمه‌کمی با ده نقشه‌ی شاخص و اندازه‌ی سلول ۹۰×۹۰ میلی‌مترمربع انجام می‌دهند. مدلی که طراحی شد و به اجرا درآمد، تکنیک‌های ارزیابی چندمعیاره‌ی فضایی را در یک سامانه GIS به کار می‌برد. هر شاخص با توجه به تأثیری که در خطر و آسیب‌پذیری داشت، مورد پردازش و تحلیل قرار گرفت و استاندارد شد. در وزن‌دهی شاخص‌ها، مقایسه‌ی مستقیم، دوسویه، و روش‌های رتبه‌بندی وزن‌دهی به کار برده شد و وزن‌ها با هم ترکیب شدند تا نقشه‌ی نهایی شاخص خطر زمین‌لغزش ایجاد شود. نتایج در هر منطقه‌ی فیزیوگرافی و در واحدهای اجرایی سطح استان و شهرداری تحلیل شدند. طبق نتایج، بالاترین مقدار شاخص خطر زمین‌لغزش متعلق به رشته‌کوه‌های سیرا ماسترا^۲ است؛ درحالی که رشته‌کوه‌های نایپ-کریستال-باراکوآ^۳ گرچه پراکنده‌ترند، بالاترین مقدار مطلق را دارند (Abella & Van Westen, 2007).

¹ Main Boundary Thrust

² Sierra Maestra mountain system

³ Nipe-Cristal-Baracoa system

۲-۳ مطالعاتی که در آنها از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده است.

حسین‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۶، به منظور بهبود پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش، اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شهر تنکابن استان گیلان کردند. به همین منظور، شواهد نظریه‌ی دمپستر-شافر به همراه تحلیل‌ها و تکنیک‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به اجرا درآمدند. هم‌چنین پارامترهای شیب، ارتفاع، شرایط مورفولوژیکی، انحناى زمین، و فاصله تا رودخانه و نزدیکی به گسل‌ها عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. با استفاده از نظریه‌ی دمپستر-شافر، باور، عدم باور، و ارزش‌های نامعلوم در زیرمجموعه‌های هر پارامتر، به‌طور جداگانه و متناوب در نظر گرفته می‌شوند و با کمک سامانه‌ی اطلاعات فضایی، نقشه‌های خطرزای وقوع زمین‌لغزش برای هر یک از این ارزش‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه آماده می‌شوند. در آخر، آن‌ها برای ارزیابی نتایج، مکان‌های وقوع زمین‌لغزش در منطقه‌ی مورد مطالعه و نقشه‌ی خطر باور را با یکدیگر مقایسه می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که ۶۵٪ زمین‌لغزش‌ها در سطح خیلی بالایی از خطر، اتفاق می‌افتند. هم‌چنین با ارزیابی نتایج، ارزش $AUC = 0.74$ برای منطقه‌ی زیرین پیش‌بینی میزان انحناى نقشه‌ی باور به دست آمد.

بوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌هایی در ویتنام کردند. هدف اصلی این مطالعه، کشف برخی از جدیدترین فناوری‌های مدرن تکنیک‌های یادگیری ماشین و معرفی یک چارچوب برای آموزش و اعتبارسنجی مدل‌های حساسیت به زمین‌لغزش کم‌عمق، با استفاده از آخرین روش‌های آماری است. ابتدا یک نقشه فهرست زمین‌لغزش با استفاده از مکان‌های تاریخی زمین‌لغزش، از دو پروژه‌ی ملی در ویتنام ایجاد شد. در مجموع، ۱۲ عامل مؤثر زمین‌لغزش از منابع مختلف داده تهیه شده‌اند. مکان‌های زمین‌لغزش به صورت تصادفی به نسبت ۷۰ به ۳۰ برای آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها تقسیم شدند. برای انتخاب بهترین زیرمجموعه از عوامل مؤثر، توانایی پیش‌بینی عوامل با استفاده از رویکرد به‌دست‌آوردن اطلاعات با تکنیک اعتبارسنجی

مقاطع با ۱۰ زیرمجموعه ارزیابی شد. عوامل با توانایی پیش‌بینی بی‌ارزش، به‌منظور بهینه‌سازی مدل‌ها حذف شدند. متعاقب آن، پنج مدل زمین‌لغزش با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبانی (SVM)، شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (شبکه‌های عصبی MLP)^۱، شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی (شبکه‌های عصبی RBF)^۲، رگرسیون لجستیک هسته (KLR)، و درخت‌های مدل لجستیک (LMT)^۳ ایجاد شدند. مدل‌های به‌دست‌آمده اعتبارسنجی شده و با استفاده از مشخصه‌ی عملکرد سیستم (ROC)، شاخص کاپا، و چند سنجش آماری مقایسه شدند. علاوه بر این، آزمون‌های فریدمن و ویلکاکسون، برای تأیید تفاوت‌های معنی‌دار آماری بین پنج مدل یادگیری ماشین مورد استفاده در این مطالعه اعمال شد. به‌طور کلی، مدل شبکه عصبی MLP دارای بالاترین قابلیت پیش‌بینی (۹۰/۲٪) است و پس از آن، مدل SVM (۸۸/۷٪)، مدل KLR (۸۷/۹٪)، مدل شبکه عصبی RBF (۸۷/۱٪)، و مدل LMT (۸۶/۱٪) قرار دارند. نتایج نشان می‌دهند که هر دو مدل KLR و LMT روش‌های امیدوارکننده‌ای را برای نقشه‌برداری حساسیت به زمین‌لغزش کم‌عمق ارائه می‌کنند. نتیجه‌ی این مطالعه، مزایای انتخاب تکنیک‌های بهینه‌ی یادگیری ماشین را با روش انتخاب مؤثر مناسب در نقشه‌برداری حساسیت به زمین‌لغزش کم‌عمق نشان می‌دهد (Bui, et al., 2016).

پرادهان و کیم در سال ۲۰۱۶ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در دو کجوک-ری کریک واقع در بخش شمال شرقی کره کردند. بدین منظور آن‌ها یک مدل ترکیبی متشکل از دو مدل ارزیابی چندمنظوره‌ی فضایی و قطعی را به کار بردند. این مطالعه، توانایی پیش‌بینی دو مدل مختلف را مقایسه می‌نماید؛ مدل ارزیابی چندمنظوره‌ی فضایی (SMCE)^۴ که یک مدل نیمه-کمی است، و مدل پایداری زمین‌لغزش کم‌عمق (SHALSTAB)^۵ که یک مدل قطعی برای تولید نقشه‌های

¹ Multilayer Perceptron (MLP)

² Radial Basis Function (RBF)

³ Logistic Model Tree (LMT)

⁴ Spatial Multi-criteria Evaluation (SMCE)

⁵ SHAllow Landslide STABility (SHALSTAB)

حساسیت زمین لغزش کم عمق است. برای مدل SMCE، به منظور مقایسه‌ی دوبه‌دو با هدف دستیابی به حساسیت وزنی، لایه‌های ورودی فاکتورهایی که موجب زمین لغزش می‌شوند آماده‌سازی شدند (برای مثال فاکتورهای توپوگرافیکی، هیدرولوژیکی، خاک، جنگل، و زمین‌شناختی). برای SHALSTAB، یک مدل ارتفاع دیجیتالی^۱ برای محاسبه‌ی شاخص‌های شیب و رطوبت مورد استفاده قرار گرفت. لیستی از زمین لغزش‌ها، برای اعتبارسنجی و ترکیب دو مدل استفاده شده است. مقایسه نقشه‌ی حساسیت به دست آمده از روش SMCE با نتایج حاصل از روش SHALSTAB مشخص می‌کند که کل ناحیه‌ی نامطابق بین دو نقشه برای همه‌ی سه کلاس حساسیت تقریباً ۵۳٪ است. لذا نتایج به منظور افزایش اطمینان‌پذیری نقشه‌ی حساسیت با هم ترکیب شده‌اند. عملکرد نقشه‌ی ترکیبی، با استفاده از ROC تعیین شده است. ناحیه‌ی AUC موفقیت دستیابی با دقت ۷۹/۵۶٪ و پیش‌بینی با دقت ۸۳/۶٪ را نشان داده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل ترکیبی برای تعیین نواحی مشخص در معرض زمین لغزش در دامنه‌های مرطوب خاکی گرانیته‌ی، از هر کدام از مدل‌ها به تنهایی، دقیق‌تر است (Pradhan & Kim, 2016).

نورانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه‌ی دشت زنوز واقع در شمال غربی ایران کردند. برای این منظور، با استفاده از بررسی میدانی، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر هوایی، و همچنین مطالعه‌ی زمین لغزش‌های پیشین ثبت شده، نقشه‌ی فهرست زمین لغزش‌ها تولید شد. سپس هفت عامل زمین لغزش از جمله سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، پوشش زمین، فاصله تا رودخانه، و فاصله تا جاده برای تولید نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش‌ها با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیکی، نسبت فرکانس، رگرسیون لجستیک، و شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شدند. برای اعتبارسنجی، نتایج بررسی حساسیت زمین لغزش با نقشه‌ی فهرست زمین لغزش‌ها که شامل ۱۹۰ منطقه فعال زمین لغزش بود تأیید شد. فرآیند اعتبارسنجی

¹ Digital elevation

نشان داد که دقت پیش‌بینی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش تولیدشده با روش‌های نسبت فرکانس، رگرسیون لجستیک، شبکه عصبی مصنوعی، و برنامه‌نویسی ژنتیک به ترتیب $87/57\%$ ، $89/42\%$ ، $92/37\%$ و $93/27\%$ بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک برای تولید نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش پیش‌بینی دقیق‌تری را در مقایسه با روش‌های نسبت فرکانس، رگرسیون لجستیک، و شبکه‌ی عصبی مصنوعی فراهم می‌کند. علاوه بر این، روش برنامه‌نویسی ژنتیک بهتر از روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی است؛ زیرا می‌تواند یک فرمولاسیون دقیق را به‌جای وزن‌ها و ماتریس‌ها ارائه دهد (Nourani, et al., 2014).

کاتانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی رود آرنو واقع در مرکز ایتالیا کردند. آن‌ها در این بررسی، این آزمایش را با تمرکز بر تأثیر انتخاب هماهنگ مدل در نتیجه‌ی نهایی و نه با مقایسه‌ی روش‌ها انجام دادند. برای این منظور، به‌کارگیری ساده‌ای از جنگل تصادفی (RF) و یک روش یادگیری ماشین را اتخاذ کردند تا مجموعه‌ای از نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش را برای مجموعه‌ای از تنظیمات مدل‌های مختلف، انواع داده‌ها، و مقیاس‌های ورودی ایجاد کنند. جنگل تصادفی، ترکیبی از درختان بیزی است که مجموعه‌ای از پیشگوها (متغیرهای مستقل) را به وقوع واقعی زمین‌لغزش مرتبط می‌کند. به‌عنوان یک مدل غیر پارامتری، می‌توان یک طیف از لایه‌های داده‌ای عددی و یا طبقه‌بندی را در نظر گرفت و نیازی به انتخاب داده‌های آموزشی تک‌نمایی مانند آنالیز افتراقی خطی وجود ندارد. بسیاری از فاکتورهای شناخته‌شده‌ی مستعدکننده‌ی زمین‌لغزش که اساساً با سنگ‌شناسی، کاربری زمین، ژئومورفولوژی، و محدودیت‌های ساختاری و انسانی مرتبط هستند مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، برای هر عامل در مجموعه‌ی پیشگوها، یک اندازه‌ی انحراف معیار (برای متغیرهای عددی) یا تنوع (برای متغیرهای طبقه‌بندی) بر روی واحد نقشه تعیین می‌شود. همانند سایر سیستم‌ها، استفاده از RF امکان می‌دهد که اهمیت نسبی پارامترهای ورودی تکی تخمین زده شود، و پیکربندی بهینه‌ی مدل طبقه‌بندی انتخاب گردد. مدل در ابتدا با استفاده از مجموعه‌ی کامل متغیرهای ورودی به‌کار گرفته

می‌شود؛ سپس یک فرآیند تکراری اجرا می‌شود و زیرمجموعه‌های کوچک‌تر فضای پارامتر، به‌طور تدریجی مورد بررسی قرار می‌گیرند. تأثیر مقیاس و دقت متغیرهای ورودی و هم‌چنین اثر مؤلفه‌ی تصادفی مدل RF بر نتایج حساسیت نیز بررسی شده است. این مدل در حوضه‌ی رود آرنو (مرکز ایتالیا) مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که ابعاد فضای پارامتر، واحد نقشه‌برداری (مقیاس)، و فرآیند آموزش، به‌شدت بر دقت طبقه‌بندی و فرآیند پیش‌بینی تأثیرگذار هستند. این موضوع به‌نوبه‌ی خود نشان می‌دهد که قبل از تولید نقشه‌های حساسیت در تمام سطوح و مقیاس‌ها، همیشه باید یک تحلیل حساسیت دقیق با استفاده از ابزارهای سنتی و جدید انجام گیرد (Catani, et al., 2013).

ایلماز در سال ۲۰۰۹ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در کوی ول حصار واقع در سیواس-ترکیه کرد. او در این بررسی موردی از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)^۱، به‌منظور نقشه‌برداری حساس به زمین‌لغزش استفاده کرد. ابتدا، مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۲ برای استفاده از نرم‌افزار ArcGIS ساخته شد. نقشه‌های مؤلفه‌ی مربوطه ایجاد شدند که شامل زمین‌شناسی، گسل‌ها، سامانه زه‌کشی، ارتفاع توپوگرافی، زاویه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، شاخص تنوع گیاه‌شناسی نرمال‌شده، و فاصله از جاده‌ها بودند. در آخر، نقشه‌ی حساس به زمین‌لغزش، با شبکه‌های عصبی ایجاد شد و به مشکلات این روش پرداخته شد. با انجام روش‌های اعتبارسنجی، کیفیت نقشه‌ی ایجادشده تأیید شد و نشان داد که به‌کارگیری ANN می‌تواند برای طراحان و مهندسان در ارزیابی اولیه‌ی حساسیت زمین‌لغزش کارساز باشد (Yilmaz, 2009).

۲-۴ مطالعاتی که در آن‌ها از روش‌های سنجش از دور استفاده شده است.

الکادیری و همکاران در سال ۲۰۱۴ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در شهر جیزان، واقع در

^۱ Artificial Neural Network (ANN)

^۲ Digital Elevation Model (DEM)

تپه‌های دریای سرخ عربستان کردند. در این بررسی آن‌ها با استفاده از داده‌های سنجش از راه دور دقت روش‌های متفاوت را مورد بررسی قرار می‌دهند. دستورالعمل پنج‌گانه‌ای که الکادیری و همکاران تعریف می‌کنند به این شرح است: ۱) سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) با یک رابط وب برای میزبانی و تحلیل داده‌های سنجش از دور مربوط و هسته‌ای، و همچنین تولیدات به دست آمده ایجاد شد؛ ۲) فهرستی برای جریان‌های واریزه که از طریق مجموعه داده‌های ماهواره‌ای مشخص شده بودند، گردآوری شد (مثلاً GeoEye، و Orbview) - زیرمجموعه‌ای که با کمک آن، میدان تأیید شد؛ ۳) تحلیل‌های فضایی در یک فضای GIS انجام شد و ۱۰ عامل مستعد مشخص شدند؛ ۴) یک مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و یک مدل رگرسیون لجستیک (LR) ساخته، بهینه‌سازی، و تأیید شد؛ و ۵) مدل‌های ساخته شده برای تولید نقشه‌های حساس به جریان واریزه به کار برده شدند. همچنین بیان آن‌ها از نتایج بدین شرح است: ۱) اجرای پیش‌بینی عالی برای هر دو مدل (ANN: ۹۶/۱٪، LR: ۹۶/۳٪)؛ ۲) تطبیق بالا بین خروجی‌های مدل (۹۱/۵٪ از پیش‌بینی‌ها معمول بودند)، صحت نتایج حساسیت جریان واریزه را تأیید می‌کند؛ ۳) متغیرهای با قدرت پیش‌بینی بسیار بالا شامل شاخص موقعیت مکان‌نگاری، شیب، فاصله یا خط زه‌کشی (DTDL)^۱، و شاخص نرمال شده‌ی تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) می‌شدند؛ و ۴) روش‌شناسی‌های اتخاذ شده، قابل اعتماد و مقرون به صرفه هستند و می‌توانند به طور بالقوه در بسیاری از زمین‌های کوهستانی، به خصوص مناطق اطراف تپه‌های دریای سرخ که با کمبود داده مواجه هستند، به کار روند (Elkadiri, et al., 2014).

عثمان و همکاران در سال ۲۰۱۳ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را در منطقه‌ی کردستان واقع در شمال شرقی عراق انجام دادند. نتایج به دست آمده جهت ارزیابی توزیع زمین‌لغزش‌ها به وسیله‌ی تکنیک‌های سنجش از راه دور برای محیط‌های خشک (نیمه خشک)، فاقد پوشش گیاهی، و کوهستانی مفید واقع شد. ناحیه‌ی مورد مطالعه در منطقه‌ی کردستان (شمال شرقی عراق) و در محدوده‌ی

¹ Distance to Drainage Line (DTDL)

کمر بند اوروژنیک زاگرس واقع شده است و خود به سه زیر ناحیه‌ی زون با چین‌خوردگی بالا (HFZ)^۱، زون همپوشان یا فلسی، و زون زمین درزه زاگرسی (ZSZ)^۲ تقسیم می‌شود. مجموعه داده‌های مرجع در دسترس شامل ۳۱۹۰ مورد زمین‌لغزش بوده که از روی ۶۰ تصویر تهیه شده به وسیله‌ی ماهواره‌ی نقشه‌برداری کوئیک‌برد^۳ به دست آمده است. انواع مختلف از زمین‌لغزش‌ها شامل سقوط صخره، لغزش‌های انتقالی، و فرونشست‌ها موجود هستند که در واحدهای لیتولوژیک مختلف به وقوع پیوسته‌اند. تعداد ۲۹۰ مورد از این زمین‌لغزش‌ها از نوع زمین درزه زاگرسی (ZSZ) هستند که در مجموع مساحت تقریبی ۳۲ کیلومترمربع را شامل می‌شوند. ناحیه با چین‌خوردگی بالا (HFZ) مجموعاً ۲۹۰۰ زمین‌لغزش را به خود اختصاص داده است که مساحت جمععی اراضی تحت این نوع لغزش به ۲۶ کیلومترمربع می‌رسد. در مرحله‌ی نخست آن‌ها تعداد کلی زمین‌لغزش‌ها-توزیع‌های اندازه را به کمک نقشه‌های مرجع مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و سپس الگوریتم بسیار ساده و کارآمدی را برای استخراج (تشخیص) خودکار زمین‌لغزش مبتنی بر نسبت‌های باند انتخابی از امضاهای طیفی سطوح بدون پوشش گیاهی، و نیز شیب جانبی (عقبی) و آستانه‌های شاخص اختلاف نرمالیزه‌شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) پیشنهاد دادند. این شاخص بر مبنای تفاوت موجود بین زمین‌لغزش‌ها و نقشه‌های پس‌زمینه‌ای تعریف شده است؛ به گونه‌ای که زمین‌لغزش‌ها از انعکاس بیشتری در باندهای سبز و قرمز برخوردار می‌باشند. سپس با اعمال نگاشت آستانه‌ی شیب، نواحی با شیب کم حذف می‌شوند که انعکاس آن‌ها در باندهای سبز و قرمز در سطح بالایی قرار گرفته است. الگوریتم پیشنهادی در تشخیص ۹۶٪ از جدیدترین لغزش‌های استخراجی از نقشه‌های مرجع قابل تعریف برای سایت آزمایشگاهی، به موفقیت نایل شده است. تعداد کلی زمین‌لغزش‌ها-توزیع اندازه‌ی لغزش‌های استخراج شده به شکل خودکار، از شباهت زیادی با مقادیر استخراجی بر مبنای نگاشت/نقشه‌برداری بصری برخوردار است. بنابراین استخراج خودکار برای

¹ High Folded Zone (HFZ)

² Zagros Suture Zone (ZSZ)

³ Quickbird

تحلیل کمی (عددی) زمین لغزش‌ها انتخاب شده است؛ پس می‌توان از آن برای ارزیابی سوانح به‌وقوع‌پیوسته در نواحی مشابه نیز استفاده نمود (Othman & Gloaguen, 2013).

پرادهان و لی در سال ۲۰۱۰ اقدام به پهنه‌بندی زمین لغزش در اطراف ارتفاعات کمرون مالزی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک سنجش از راه دور کردند. محل زمین لغزش‌ها با تفسیر تصاویر هوایی و نقشه‌برداری زمینی در منطقه‌ی مورد مطالعه شناسایی می‌شوند. داده‌های جغرافیایی و توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای جمع‌آوری شدند و بعد از پردازش با استفاده از پردازش تصویر و GIS تبدیل به پایگاه داده‌ی فضایی شده‌اند. آن‌ها عوامل وقوع زمین لغزش را به این شرح انتخاب کردند: شیب توپوگرافی، جنبه توپوگرافی، انحنای توپوگرافی و فاصله از زه‌کش، سنگ‌شناسی و فاصله از طرح، نوع خاک، بارندگی، پوشش زمین از تصاویر ماهواره‌ی SPOT5، و مقدار شاخص پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ی SPOT5. این عوامل با استفاده از مدل شبکه‌ی عصبی پیشرفته به‌منظور ایجاد نقشه‌ی احتمالی وقوع زمین لغزش‌ها آنالیز شده است. وزن هر عامل توسط روش آموزشی پس‌انتشار^۱ تعیین شده است. سپس شاخص‌های احتمال وقوع زمین لغزش با استفاده از وزن‌های پس‌انتشار محاسبه، و در نهایت نقشه‌ی احتمالات زمین لغزش با استفاده از ابزار GIS تولید می‌شود. نتایج مدل شبکه‌ی عصبی نشان می‌دهد که تأثیر شیب توپوگرافی بیشترین مقدار وزنی (۰/۲۰۵) را داراست که حدود دو برابر وزن پارامترهای مؤثر بعدی مانند فاصله از زه‌کش (۰/۱۴۱) و سنگ‌شناسی (۰/۱۱۷) هست. محل زمین لغزش‌ها برای صحت‌سنجی نتایج نقشه‌ی احتمال وقوع زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت، و نتایج صحت‌سنجی دقت ۸۳٪ را نشان داد. نتایج صحت‌سنجی، نشانگر تطابق کافی بین نقشه‌ی احتمالات محاسبه‌شده و داده‌های حاضر از محل زمین لغزش‌ها بود (Pradhan & Lee, 2010).

لی و پرادهان در سال ۲۰۰۷ اقدام به پهنه‌بندی زمین لغزش در ایالت سلانگور مالزی کردند.

¹ Back-propagation training method

آن‌ها این بررسی را با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور انجام دادند. مکان‌های زمین‌لغزش منطقه‌ی مورد مطالعه، از طریق تفسیر عکس هوایی و پیمایش میدانی مشخص شد. نقشه‌های مکان‌نگار، داده‌های زمین‌شناسی، و تصاویر ماهواره‌ای گردآوری، پردازش، و به پایگاه داده‌های فضایی سکوی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی هدایت شدند. عوامل انتخابی مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش عبارتند از: شیب، جهت، انحنا، فاصله تا زه‌کشی، سنگ‌شناسی، فاصله تا خطوط زمین، پوشش زمین، شاخص پوشش گیاهی، و توزیع بارندگی. مناطق خطرزای زمین‌لغزش مورد تحلیل قرار گرفتند و با توجه به عوامل وقوع زمین‌لغزش از آنان نقشه‌برداری شد که با استفاده از نسبت بسامد و مدل‌های رگرسیون لجستیک صورت گرفت. نتایج تحلیل با کمک داده‌های مکانی زمین‌لغزش تأیید شد و با مدل احتمالی مقایسه گردید. طبق نتایج مقایسه، مدل نسبت بسامد (با دقت ۹۳/۰۴٪) در پیش‌بینی بهتر از مدل رگرسیون لجستیک (با دقت ۹۰/۳۴٪) است (Lee & Pradhan, 2007).

رموندو و همکاران در سال ۲۰۰۵ اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در دره دوا، واقع در شمال اسپانیا کردند. زمین‌لغزش‌ها در ۵۰ سال گذشته رخ دادند و ویرانی‌های بعدی مورد تحلیل قرار گرفتند. مدل‌های حساسیت زمین‌لغزش از طریق تکنیک‌های تحلیل داده‌های فضایی^۱ به‌دست آمدند و به‌طور جداگانه، مورد تأیید قرار گرفتند. توالی رخدادها بر اساس بسامد و بزرگی زمین‌لغزش گذشته معین شدند و برای تبدیل حساسیت به مدل‌های کمی خطرزا تبدیل شدند. برای ارزیابی آسیب‌پذیری، فهرست دقیقی از سازه‌های^۲ موجود (زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها، و منابع زمینی) تهیه شد. مقادیر آسیب‌پذیری (۱-۰)، از مقایسه‌ی ویرانی‌های ایجادشده در گذشته با هر یک نوع سازه، به میزان واقعی خود مقایسه شد. مدل‌های خطرزای کمی، در مفهوم مقدار، برای هر سازه ایجاد شدند تا به مدل‌های خطرزای زمین‌لغزش و آسیب‌پذیری نظام بخشند. مدل‌های خطرزای زمین‌لغزش که

^۱ Spatial Data Analysis

^۲ Elements

خبر از خسارات قابل انتظار ۵۰ سال آینده می‌دهند، به منظور توالی رخداد‌های مختلف ایجاد شدند. مقادیر خطر به دست آمده پیش‌بینی‌های دقیقی از خسارات آینده نیستند، اما به عنوان ابزاری برای تشخیص مناطقی با احتمال ویرانی بیشتر به شمار می‌روند؛ لذا اقدامات کمکی باید در اولویت قرار گیرند (Remondo, et al., 2005).

۲-۳ جمع‌بندی

در تحقیقات گذشته از روش‌های وزن‌دهی متفاوتی برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر وقوع زمین‌لغزش استفاده شده است. این روش‌ها شامل روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندشاخصه، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، روش‌های آماری، و روش‌هایی بر پایه‌ی سنجش‌ازدور هستند؛ اما همان‌طور که در تحقیقات پیشین مشاهده شد، به روش‌های کیفی و به‌خصوص روش‌هایی بر مبنای منطق فازی کمتر توجه شده است. جهت بررسی دقت عملکرد روش‌های مبتنی بر منطق فازی، در این تحقیق از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نیز استفاده شده است.

در تحقیقات پیشین، اغلب نقشه‌های تولیدشده حاصل از یکی از روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به صورت مستقل هستند. در این تحقیق به عنوان ابتکار، از نتایج چهار روش پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به منظور تولید نقشه‌ای با دقت بالاتر استفاده شده است. تصمیم‌گیری‌ها، یا در حالت کلی ادغام یا تلفیق داده، تصمیم‌گیری‌های مختلف حاصل از روش‌ها یا داده‌های متفاوت را باهم ترکیب یا تلفیق می‌کنند تا در نهایت یک تصمیم‌گیری حاصل شود که علاوه بر داشتن دقت بالاتر، اعتماد به آن بسیار بیشتر از نتیجه‌ی یک تصمیم‌گیری انفرادی است. به طور کلی هر روش پهنه‌بندی دارای خصوصیات مثبتی است و با استفاده از ادغام نتایج، می‌توان نقشه‌ای با قابلیت پیش‌بینی دقیق‌تر زمین‌لغزش را بدست آورد. در این تحقیق پس از پهنه‌بندی به چهار روش متفاوت و بررسی دقت هر روش، از دقت این روش‌ها به عنوان وزن در ادغام نتایج استفاده شده است.

هم‌چنین در پیشینه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مناطق زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در ۶۰ کیلومتری جنوب سمیرم و در حد فاصل سمیرم و شهر یاسوج پرداخته شده که در تحقیقات زمین‌لغزش گذشته مورد توجه قرار نگرفته است.

فصل ۳: روش پیشنهادی

۳-۱ مقدمه

دنیای اطراف ما دنیای مشارکت و رقابت است. پیچیدگی این منطق مشارکت و رقابت انسان‌ها را هر لحظه به تصمیم‌گیری مطابق با قضاوت خود از محیط اطراف وادار می‌کند. این ادعا ما موجودی منطقی هستیم شاید اغراق باشد؛ زیرا قضاوت‌ها و تصمیم‌گیری‌های ما به ادراکاتمان وابسته است. درک ما از دنیای اطراف به میزان تکرار و یادآوری و میزان درگیری در فعالیت‌ها وابسته است.

گاهی تصمیم‌گیری را معادل علم مدیریت می‌دانند و گفته می‌شود که آنچه را که ما به عنوان تصمیم‌گیری در نظر می‌گیریم، انتخاب یا اولویت‌بندی با دسته‌بندی چندگزینه‌ی رقیب برحسب یک یا چند شاخص خواهد بود؛ بدین معنا که هرگاه چند گزینه رقیب هم باشند و تصمیم‌گیرنده بخواهد یکی یا سبدی از آن‌ها را برگزیند، یا آن‌ها را به ترتیب اولویت مرتب یا دسته‌بندی کند، یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری تک‌شاخصه یا چندشاخصه خواهیم داشت.

به‌طور کلی، فرآیند تصمیم‌گیری بر مبنای فرآیند کلی پردازش اطلاعات در مغز عمل می‌کند.

این فرآیند طبق شکل ۳-۱ شش مرحله دارد:



شکل ۳-۱: مراحل فرآیند کلی پردازش اطلاعات در مغز

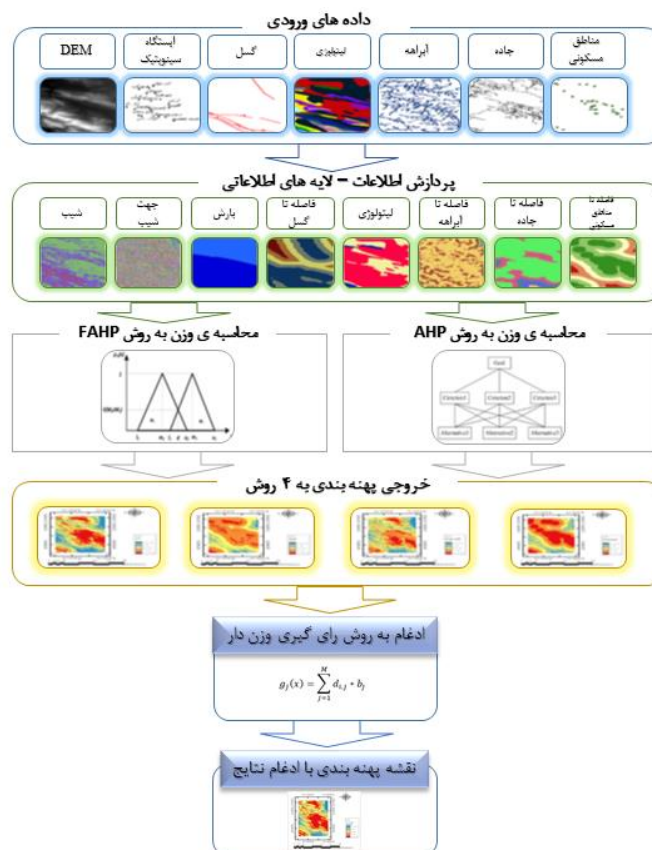
- **بازیابی اطلاعات:** به دلیل محدودیت ظرفیت ذهن، تنها اطلاعات مهم بازیابی می‌شوند تا بتوان آن‌ها را پردازش کرد.
- **شناخت:** محتوای اطلاعات بالا شناسایی می‌شود.
- **تفکر:** اطلاعات شناسایی شده با دانش و مهارت‌های موجود شخص در ذهن او ترکیب می‌شود و اندیشه درباره‌ی حل مسئله آغاز می‌شود.
- **قضاوت:** درباره‌ی اطلاعات ترکیبی قضاوت می‌شود و گزینه‌ها و شاخص‌هایی برای تصمیم-

گیری ارائه می گردد.

- /ارزیابی: گزینه ها دوبه دو یا به صورت جمعی برحسب یک یا چند شاخص مقایسه می شوند.
- تصمیم: رضایت بخش ترین گزینه با انتخاب یا اولویت بندی یا دسته بندی گزینه ها حاصل می شود.

۲-۳ روش پیشنهادی

در این مطالعه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی، و با قضاوت کارشناسان خبره، لایه ها و زیرلایه ها وزن دهی شدند و پهنه بندی با دو روش مختلف هم پوشانی صورت گرفت. در انتها با استفاده از چهار نقشه ی تولید شده و ادغام نتایج با روش رأی گیری وزن دار، نقشه ی پهنه بندی خطر زمین لغزش نهایی تولید شد. جزییات روش پیشنهادی در شکل ۲-۳ آمده است.



شکل ۲-۳: فلوچارت روش پیشنهادی

۳-۲-۱ داده‌های ورودی

با توجه به تحقیقات پیشین، مشخص شد لایه‌هایی نظیر مدل رقومی ارتفاعی، لیتولوژی، بارش، و گسل از لایه‌های ضروری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش هستند. در این تحقیق نیز با توجه به تحقیقات پیشین و همچنین اطلاعات موجود در رابطه با منطقه‌ی مطالعاتی از هفت لایه به‌عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است. این لایه‌ها شامل مدل رقومی ارتفاعی، ایستگاه سینوپتیک، گسل، لیتولوژی، آبراهه، جاده، و مناطق مسکونی است.

۳-۲-۲ لایه‌های اطلاعاتی

بعد از ورود اطلاعات به محیط جی‌آی‌اس و پردازش اطلاعات شامل استفاده از ابزار اقلیدسی، درون‌یابی و کلاس‌بندی مجدد، لایه‌های اطلاعاتی حاصل می‌شوند. بدین ترتیب لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، لایه‌ی بارش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، لایه‌های فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، و فاصله از مناطق مسکونی به‌ترتیب از لایه‌های خطوط گسل، جاده، آبراهه، و مناطق مسکونی حاصل می‌شوند. همچنین لایه‌ی لیتولوژی (سنگ سخت، سنگ نرم، و خاک) از لایه‌ی لیتولوژی (طبقه‌بندی خاک‌های منطقه) در داده‌های ورودی حاصل می‌شود.

۳-۲-۳ تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی مکانی

هنگامی که تصمیم‌گیرنده اطلاعات کافی درباره‌ی عملکرد گزینه‌ها در شاخص‌ها نداشته باشد، یکی از زمینه‌های جمع‌آوری اطلاعات درباره‌ی ارزش گزینه‌ها به ازای شاخص‌ها استفاده از ماتریس مقایسات زوجی شاخص‌ها نسبت به هم و نیز مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به هم برحسب شاخص‌ها است. در این تحقیق دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی از دسته روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی مکانی بررسی می‌شود.

۳-۳ روش تحلیل سلسله‌مراتبی

تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی یا AHP را پروفیسور ساعتی در سال ۱۹۷۷ پیشنهاد کرد. در این روش ابتدا مسائل پیچیده تجزیه و به مسائل ساده تقسیم می‌شوند؛ 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، محاسبه‌ی وزن و ضرایب اهمیت از ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی: برای تشکیل ماتریس مقایسه‌ی زوجی از جدول ۱-۳ که نشان‌دهنده‌ی ارجحیت سطر به ستون است استفاده می‌شود.
- فاز دوم، محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری و اصلاح ماتریس‌های ناسازگار: برای محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری باید گام‌های زیر طی شود. در گام اول، طبق رابطه‌ی (۱-۳) هر یک از ماتریس‌های تصمیم، در بردار وزن یا ضرایب آن ماتریس که در فاز اول محاسبه شد ضرب می‌شود. بردار به‌دست‌آمده که ستونی است، بردار مجموع موزون (WSV)^۱ نامیده می‌شود.

جدول ۱-۳: میزان شدت ارجحیت گزینه‌ها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

ارزش	ارجحیت
۱	ارجحیت یکسان گزینه A_1 بر گزینه A_h
۲	ارجحیت خیلی کم گزینه A_1 بر گزینه A_h
۳	ارجحیت کم گزینه A_1 بر گزینه A_h
۴	ارجحیت نسبتاً کم گزینه A_1 بر گزینه A_h
۵	ارجحیت متوسط گزینه A_1 بر گزینه A_h
۶	ارجحیت نسبتاً زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h

^۱ Weighted Sum Vector (WSV)

۷	ارجحیت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h
۸	ارجحیت خیلی زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h
۹	ارجحیت بی‌نهایت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h

$$WSV = A \times W(A_i) \quad (1-3)$$

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، طبق رابطه‌ی (۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$ICV = \frac{WSV}{W(A_i)} \quad (2-3)$$

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

$$ICI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (3-3)$$

در گام پنجم نرخ ناسازگاری از رابطه‌ی (۴-۳) استخراج می‌شود.

$$ICR = \frac{ICI}{RI} \quad (4-3)$$

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 است با هم 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: در گام اول وزن هر شاخص در ضرایب اهمیت گزینه‌ها با ازای آن شاخص ضرب می‌شود تا ارزش موزون هر گزینه در هر شاخص مشخص شود. در گام دوم ارزش موزون هر گزینه در تمام شاخص‌ها با یک‌دیگر جمع می‌شود تا ارزش و امتیاز نهایی گزینه‌ها (U_i) استخراج شود و در گام نهایی، گزینه‌ها به ترتیب از صعودی به نزولی رتبه‌بندی می‌شود.

۳-۴ روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

تکنیک AHP فازی با رویکردهای مختلفی ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین این رویکردها را چانگ (۱۹۹۶) پیشنهاد کرد که آن را تحلیل گسترش یا EA نامید. در این تکنیک از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود. ورودی‌های این تکنیک عبارتند از: ماتریس مقایسات زوجی فازی برای ارزیابی شاخص‌ها، و تعداد n ماتریس مقایسات زوجی فازی برای ارزیابی گزینه‌ها. تمامی ماتریس‌های مقایسات زوجی شامل اعداد فازی مثلثی و به شرح طیف حاضر در جدول ۳-۲ هستند. درایه‌های روی قطر اصلی، ارزش برابر با $(1, 1, 1)$ می‌گیرند. تکنیک AHP فازی در دو فاز اجرایی می‌شود؛ در فاز اول محاسبه‌ی وزن گزینه‌ها صورت می‌گیرد، و در فاز دوم ادغام وزن‌ها انجام می‌شود.

جدول ۳-۲: نسبت ارجحیت گزینه‌ها به یک‌دیگر در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

ارزش	ارجحیت
$(\frac{1}{3}, 1, 2)$	ارجحیت یکسان گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(1, 2, 3)$	ارجحیت خیلی کم گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(2, 3, 4)$	ارجحیت کم گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(3, 4, 5)$	ارجحیت متوسط گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(5, 6, 7)$	ارجحیت نسبتاً زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(6, 7, 8)$	ارجحیت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(7, 8, 9)$	ارجحیت خیلی زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h
$(8, 9, 9)$	ارجحیت بی‌نهایت زیاد گزینه A_1 بر گزینه A_h

۳-۴-۱ فاز یک: محاسبه‌ی وزن گزینه‌ها و شاخص‌ها

در این مرحله چهار گام به شرح زیر طی می‌شوند:

- گام اول: از هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی فازي و به ازای هر گزینه یا شاخص یک عدد فازي S استخراج می‌شود. درواقع، مقادیر S با تقسیم کردن مجموع سطری ماتریس مقایسات زوجی فازي بر مجموع کل آن ماتریس به دست می‌آید.

$$\tilde{S}_1 = \left(\frac{\sum_{h=1}^n a_{1,h}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1, h \neq l}^n c_{1,h}}, \frac{\sum_{h=1}^n b_{1,h}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1, h \neq l}^n b_{1,h}}, \frac{\sum_{h=1}^n c_{1,h}}{\sum_{l=1}^n \sum_{h=1, h \neq l}^n a_{1,h}} \right) \quad (5-3)$$

- گام دوم: زوج گزینه‌ها تشکیل داده می‌شوند. مقادیر S_1 اعداد فازي مثلثی هستند؛ بنابراین در بررسی شدت برتری A_1 بر A_h در زوج گزینه (A_1, A_h) که با استفاده از مقادیر S_1 و S_h انجام داده و با نماد $V_{1,h}$ نمایش داده می‌شوند، ممکن است سه حالت پدید آید.

○ حالت اول: حد وسط A_1 بزرگتر یا مساوی حد وسط A_h است؛ یعنی $b_1 \geq b_h$. در این حالت S_1 بر S_h برتری کامل دارد و $V_{1,h} = 1$ است. این حالت در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

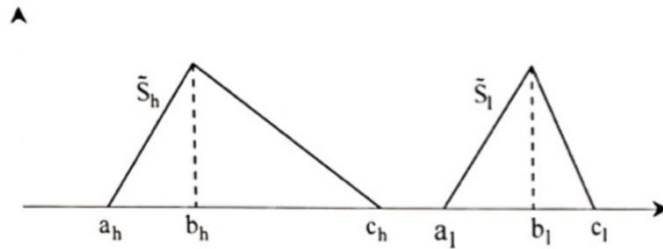
○ حالت دوم: حد بالای S_1 کوچکتر یا مساوی حد پایین S_h است؛ یعنی $c_1 \leq a_h$. در این حالت S_1 هیچ‌گونه برتری بر S_h ندارد؛ بنابراین $V_{1,h} = 1$ است. زمانی که حد بالای S_1 کوچکتر از حد پایین S_h باشد، واضح است که S_1 هیچ‌گونه برتری بر S_h ندارد. این حالت در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

○ حالت سوم: در حالات دیگر، برتری جزئی وجود دارد و $V_{1,h}$ از رابطه‌ی (۶-۳) به دست می‌آید. این حالت نیز در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.

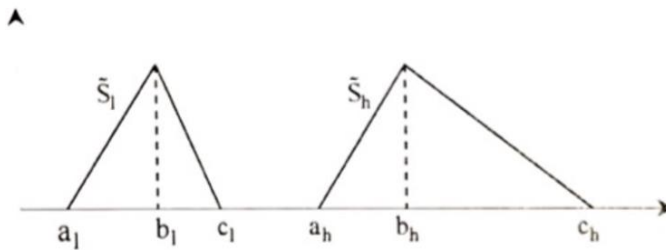
$$V_{1,h} = \frac{a_h - c_1}{(b_1 - c_1) - (b_h - a_h)} \quad (6-3)$$

این سه حالت را می‌توان در رابطه‌ی (۷-۳) خلاصه کرد.

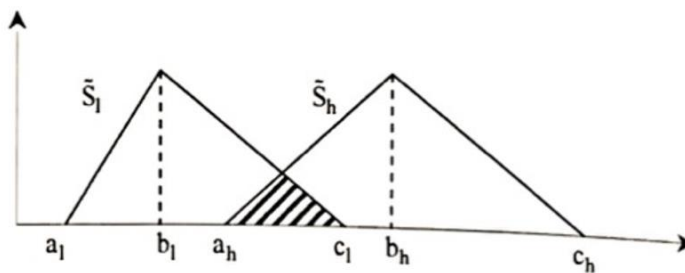
$$V_{1,h} = \begin{cases} 1 & b_1 \geq b_h \\ 0 & c_1 \leq a_h \\ \frac{a_h - c_1}{(b_1 - c_1) - (b_h - a_h)} & o.w. \end{cases} \quad (7-3)$$



شکل ۳-۳: حالت اول برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی



شکل ۳-۴: حالت دوم برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی



شکل ۳-۵: حالت سوم برتری گزینه‌ها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

درباره حالت‌های اول و سوم نباید این‌چنین تصور کرد که اگر S_1 بر S_h برتری

کامل داشته باشد، S_h بر S_1 هیچ‌گونه برتری ندارد. به عبارت دیگر، ممکن است S_h بر

برتری کامل داشته باشد (حالت اول) و S_h نیز بر S_1 برتری اندکی داشته باشد (حالت

سوم). این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که $S_1 \cap S_h \neq \emptyset$ است؛ یعنی مجموعه‌های S_1 و S_h اشتراک دارند.

- گام سوم: در هر ماتریس مقایسات زوجی، کمترین شدت برتری یک گزینه بر گزینه‌های دیگر، وزن اولیه‌ی آن گزینه در آن ماتریس را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، حداقل سطری هر یک از ماتریس‌های مربوط به V برابر با وزن اولیه‌ی شاخص‌ها یا گزینه‌هاست که عددی قطعی است. همچنین مجموع وزن‌های اولیه‌ی به دست آمده از هر ماتریس برابر با یک نیست. وزن‌های اولیه را با y_i نمایش می‌دهند.

- گام چهارم: وزن‌های اولیه بر مجموعشان تقسیم می‌شوند تا وزن‌های نسبی (w_1) به دست آید.

گام‌های اول تا چهارم برای ماتریس مقایسات زوجی شاخص‌ها نیز انجام می‌شوند. در پایان این مرحله، وزن نسبی گزینه‌ها در شاخص‌ها و وزن شاخص‌ها موجود خواهند بود.

۳-۴-۲ فاز دوم: ادغام وزن‌ها

برخلاف تکنیک AHP قطعی، در AHP فازی به بررسی نرخ ناسازگاری نیازی نیست؛ اما می‌توان ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی را فازی‌زدایی، و ناسازگاری آن‌ها را محاسبه کرد. فاز دوم تکنیک AHP فازی کاملاً مشابه AHP قطعی است و به ادغام وزن شاخص‌ها و گزینه‌ها و استخراج وزن‌های نهایی می‌پردازد.

- گام اول: وزن هر شاخص در وزن‌های به دست آمده از ماتریس مقایسه گزینه‌ها در آن شاخص ضرب می‌شود تا ارزش موزون هر گزینه در هر شاخص مشخص شود.

- گام دوم: ارزش (وزن، امتیاز) نهایی هر گزینه برابر است با مجموع ارزش موزون شده‌ی آن گزینه در تمام شاخص‌ها. گزینه‌ها نیز به ترتیب نزولی این ارزش رتبه‌بندی می‌شوند.

۳-۵ روش‌های هم‌پوشانی

برای تعیین ارزش هر پیکسل از روش‌های مختلفی کمک گرفته می‌شود. این روش‌ها که ارزش نهایی پیکسل را به وسیله‌ی لایه‌های مؤثر تعیین می‌کنند، روش‌های هم‌پوشانی نام دارند. در این تحقیق از دو روش هم‌پوشانی موسوم به هم‌پوشانی وزنی و هم‌پوشانی فازی استفاده شده است.

- روش هم‌پوشانی وزنی: ابزار هم‌پوشانی وزنی یکی از روش‌های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل‌های هم‌پوشانی برای پاسخ به سؤالات چندمعیاری مانند انتخاب محل و مدل مناسب است. این ابزار گام‌های زیر را در بر دارد:

○ گام اول: مقادیر موجود در رسترهای ورودی را به یک مقیاس ارزیابی مشترک از نظر مناسب بودن یا اولویت، ریسک و یا مقیاس مناسب یکسان سازی می‌کند.

○ گام دوم: مقادیر سلول هریک از ردیف ورودی را با توجه به اهمیت رسترها افزایش می‌دهد.

○ گام سوم: مقادیر حاصل سلول را باهم ترکیب می‌کند تا رستر خروجی تولید کند.

- روش هم‌پوشانی فازی: ابزار هم‌پوشانی فازی امکان تجزیه و تحلیل احتمال وقوع پدیده متعلق به چندین مجموعه را در تحلیل هم‌پوشانی چندمعیاره 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.

۳-۶ ادغام تصمیم‌گیری‌ها

ادغام تصمیم‌گیری‌ها، یا در حالت کلی ادغام یا تلفیق داده، تصمیم‌گیری‌های مختلف حاصل از روش‌ها یا داده‌های متفاوت را باهم ترکیب یا تلفیق می‌کند تا در نهایت یک تصمیم‌گیری را حاصل کند که علاوه بر داشتن دقت بالاتر، اعتماد به آن بسیار بیشتر از نتیجه یک تصمیم‌گیری انفرادی است. یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد در ادغام تصمیم‌گیری‌ها، روشی بر پایه‌ی مفهوم رأی‌گیری

است (Kuncheva & Whitaker, 2003). در این روش با نتیجه‌ی هر روش تصمیم‌گیری به‌صورت یک رأی برخورد می‌شود. ساده‌ترین حالت این روش با نام حداکثر رأی شناخته می‌شود (رابطه‌ی (۸-۳)). در این روش اگر تمام روش‌های تصمیم‌گیری دارای وزن و دقت یکسانی باشند، تصمیم تمام طبقه‌بندی‌کننده‌ها برای یک نمونه‌ی ورودی، با وزن یکسان در نظر گرفته می‌شود و تصمیم با بیشترین رأی به‌عنوان کلاس برنده برای نمونه‌ی ورودی معرفی می‌شود. با این فرض که $D_i, i=1, \dots, M$ مجموعه‌ی روش‌های تصمیم‌گیری به تعداد M و $W_j, j=1, \dots, c$ 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 یک یا صفر را بگیرد؛ به این ترتیب که اگر روش تصمیم‌گیری نمونه‌ی ورودی را متعلق به کلاس خاص موردنظر بدانیم، به آن مقدار یک، و اگر متعلق ندانیم مقدار صفر داده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در حالت رأی‌گیری ساده که وزن تمام طبقه‌بندی‌کننده‌ها برابر است، کلاس با حداکثر رأی برنده خواهد بود (Ruta & Gabrys, 2000).

$$\sum_{I=1}^L d_{I,k} = \max_{j=1}^L I \quad (۸-۳)$$

هنگامی که روش‌های تصمیم‌گیری دارای دقت‌های مختلف هستند، حالت خاصی از این روش به نام حداکثر رأی وزن‌دار به‌کاربرده می‌شود. به این ترتیب نقش روش‌هایی که دقت بیشتری دارند در رأی‌گیری بیشتر می‌شود و وزن بیشتری به آن‌ها تعلق می‌گیرد درحالی که روش‌های پهنه‌بندی با دقت کمتر وزن کمتری را در ادغام دریافت می‌کنند.

$$g_j(x) = \sum_{j=1}^M d_{ij} * b_j \quad (۹-۳)$$

نماد b_j در رابطه‌ی (۹-۳) وزن هر روش پهنه‌بندی است. در روش پیشنهادی این تحقیق از دقت تخمین زمین‌لغزش‌های تاریخی در هر روش پهنه‌بندی به‌عنوان وزن آن روش استفاده خواهد شد (Fauvel, et al., 2006).

۷-۳ نتیجه‌گیری

در تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، اغلب روش‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی نتایج مناسبی را بر جای گذاشته‌اند. در این تحقیق نیز انتظار می‌رود روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، به دلیل نداشتن قطعیت در مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها، نتیجه‌ی مناسبی را در اختیار بگذارد. علاوه بر این برخلاف روش‌های بررسی شده در فصل ۲، که همگی بر اجرا و پیاده‌سازی یک یا چند روش پهنه‌بندی و مقایسه‌ی نتایج آن‌ها استوار بودند، در این تحقیق سعی می‌شود نتایج مربوط به چندین روش پهنه‌بندی به وسیله‌ی مفهوم ادغام تصمیم‌گیری‌ها با هم ادغام شوند.

فصل ۴: داده‌های مورد استفاده و نتایج

۴-۱ مقدمه

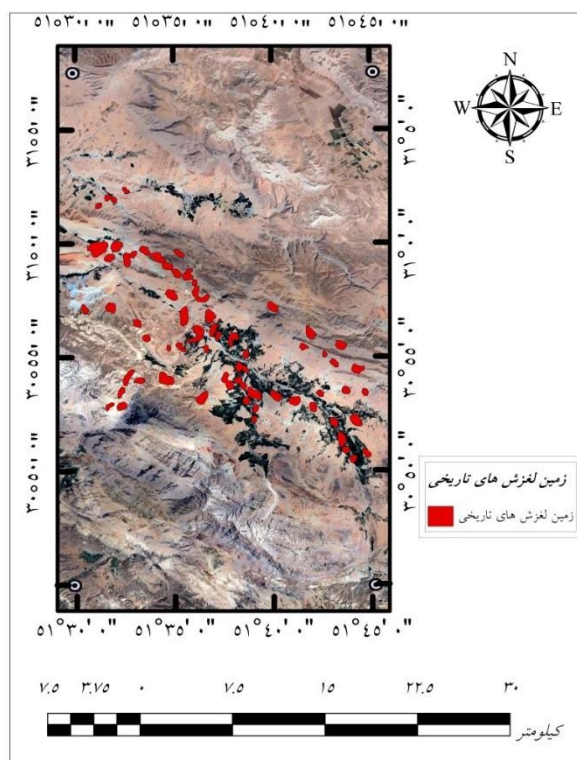
در این فصل به ارائه‌ی نتایج پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی رودخانه‌ی ماربر با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و غیرفازی، و نیز با دو رویکرد هم‌پوشانی فازی و هم‌پوشانی وزن‌دار و روش ادغام نتایج پرداخته می‌شود. آنچه در ادامه‌ی فصل بررسی می‌شود عبارت است از: بررسی منطقه‌ی مورد مطالعه، لایه‌های اطلاعاتی، استخراج لایه‌های مؤثر، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و غیرفازی، روش‌های هم‌پوشانی، ادغام نتایج، و در نهایت، جمع‌بندی فصل جاری.

۴-۲ منطقه‌ی مطالعاتی

منطقه‌ی مورد مطالعه در حد فاصل $30^{\circ} 44' 59''$ تا $31^{\circ} 07' 30''$ عرض شمالی و $29^{\circ} 52'$ تا $51^{\circ} 45' 10''$ طول شرقی و در ۶۰ کیلومتری جنوب سمیرم و در حد فاصل سمیرم و شهر یاسوج قرار دارد. این ناحیه شامل پستی و بلندی‌هایی شامل ارتفاع‌های ۱۷۸۰ متر تا ۴۲۲۰ متر است. هم‌چنین ناحیه‌ی موردنظر جزئی از رشته‌کوه‌های زاگرس به‌شمار می‌آید، و کوه دنا نیز در این ناحیه واقع شده است. در این منطقه حوضه‌ی رودخانه‌ی ماربر نیز قرار گرفته است، این رودخانه از ارتفاعات کوه دنا سرچشمه می‌گیرد، سپس همراه با چشمه‌سارهای مال خلیفه و سندگان (رودخانه شیلونه) و با پیوستن به رودخانه‌ی بشار، رودخانه‌ی خرسان را به‌وجود می‌آورند. رودخانه‌ی ماربر نقش مهمی در بخش کشاورزی شهرستان سمیرم دارد و حدود ۴۰ هزار هکتار از اراضی شهرستان سمیرم، آب موردنیاز خود را از این رودخانه تأمین می‌کنند. شکل ۴-۱ محدوده منطقه مطالعاتی را نمایش می‌دهد. زمین لغزش‌های تاریخی منطقه نیز در شکل ۴-۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱: منطقه‌ی مورد مطالعه و زمین لغزش‌های تاریخی منطقه



شکل ۴-۲: زمین لغزش‌های تاریخی

۴-۳ نتایج

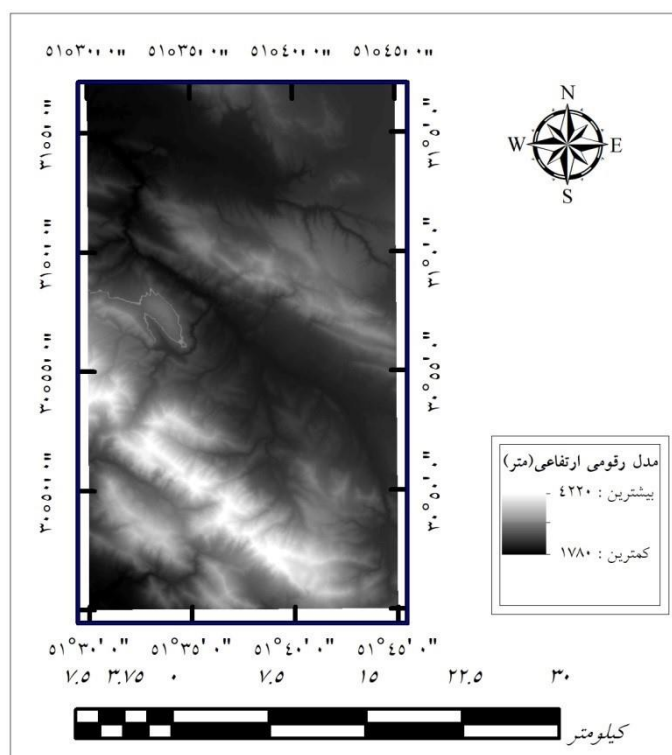
۴-۳-۱ لایه‌های اولیه (اطلاعات)

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 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. جهت تولید لایه‌های مؤثر، از هفت لایه‌ی اطلاعاتی استفاده شد که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱-۱ مدل رقومی ارتفاعی

مدل رقومی ارتفاعی یک فایل دیجیتالی است که شامل ارتفاعات زمین برای موقعیت‌های زمین

در فواصل منظم افقی است (Highland, et al., 2008). مدل رقومی ارتفاعی منطقه با اندازه‌ی پیکسل ۳۰ متر تهیه شده است (شکل ۳-۴). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و در فضای GIS، نقشه‌های شیب و جهت شیب منطقه تولید شد. به‌طور کلی شیب‌های منطقه از صفر تا ۸۴ درجه تغییر می‌کنند. در نهایت، لایه‌ی شیب و جهت شیب در پنچ گروه کلاس‌بندی شدند.

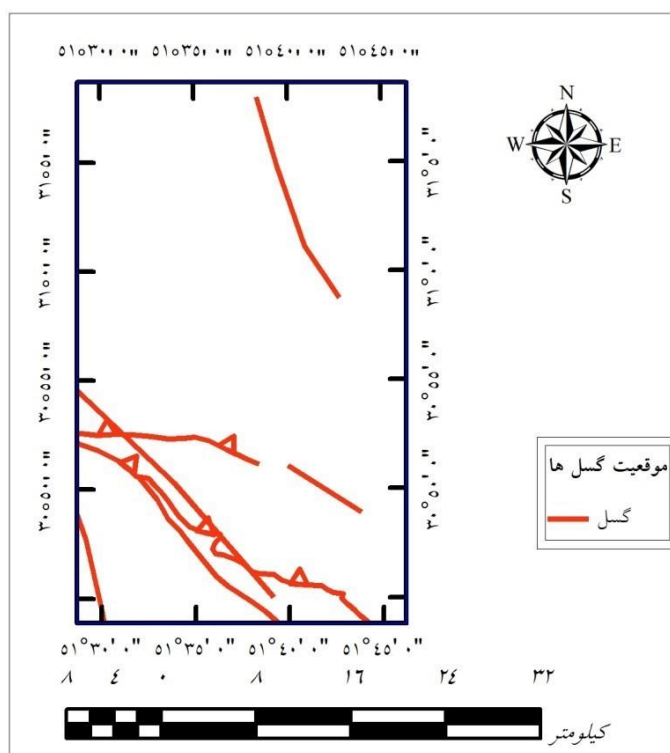


شکل ۳-۴: مدل رقومی ارتفاعی

۲-۱-۳-۴ گسل

به‌طور کلی مشاهده شده است که احتمال وقوع زمین‌لغزش در مناطق نزدیک به گسل افزایش می‌یابد که نه‌تنها بر ساختارهای مواد سطحی تأثیر می‌گذارد، بلکه موجب نفوذپذیری در سطح زمین می‌شود که بی‌ثباتی در شیب را در پی دارد (Kanungo, et al., 2006). نقشه‌ی گسل‌های منطقه از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است (شکل ۴-۴). سپس در محیط جی‌آی‌اس و به‌کمک ابزار فاصله‌ی اقلیدسی، لایه‌ی فاصله تا گسل ایجاد شده و با توجه به

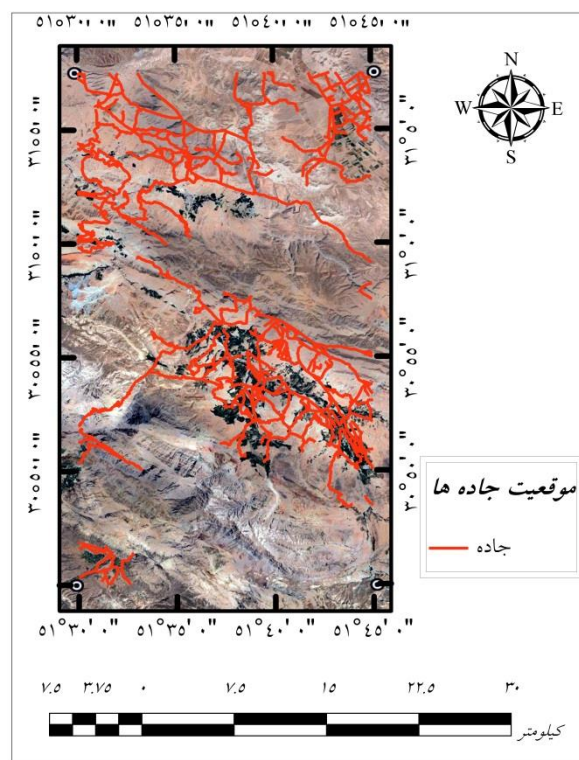
میزان فاصله‌ی هر نقطه تا گسل‌ها، لایه‌ی نهایی فاصله تا گسل در پنج گروه کلاس‌بندی شده است.



شکل ۴-۴: موقعیت گسل‌ها

۳-۱-۳-۴ راه

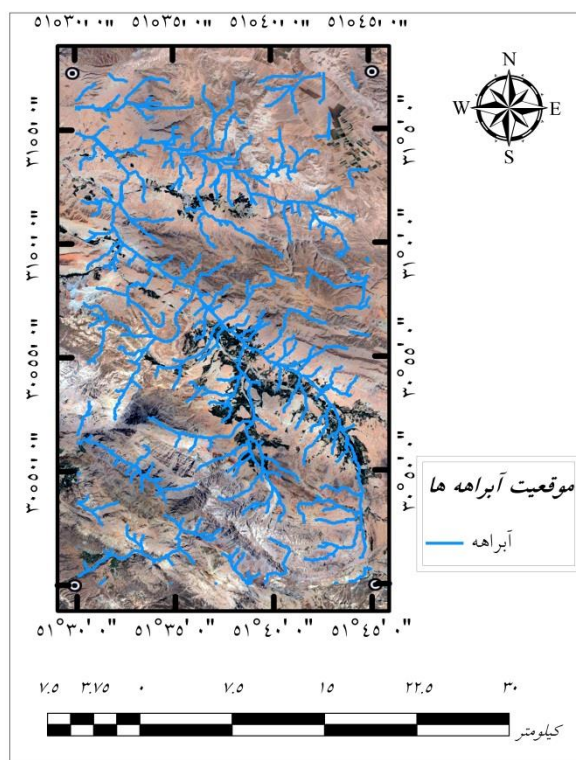
در نواحی کوهستانی، خاک‌برداری بر روی شیب جهت احداث جاده یک روش رایج است که تا حد زیادی پایداری شیب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Sharma & Mahajan, 2018). نقشه‌ی راه‌های منطقه از نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه‌ی مورد مطالعه تهیه شده‌اند (شکل ۴-۵). برای مطالعه‌ی تأثیرات راه‌های محدوده‌ی مورد مطالعه در ایجاد زمین‌لغزش، نیاز به تولید نقشه‌ی فاصله تا راه‌ها وجود داشت که این نقشه با استفاده از نقشه‌ی راه تولید شد و فاصله‌ی هر نقطه تا راه‌ها در پنج گروه مشخص گردید.



شکل ۴-۵: موقعیت راه‌ها

۴-۱-۳-۴ زه‌کش

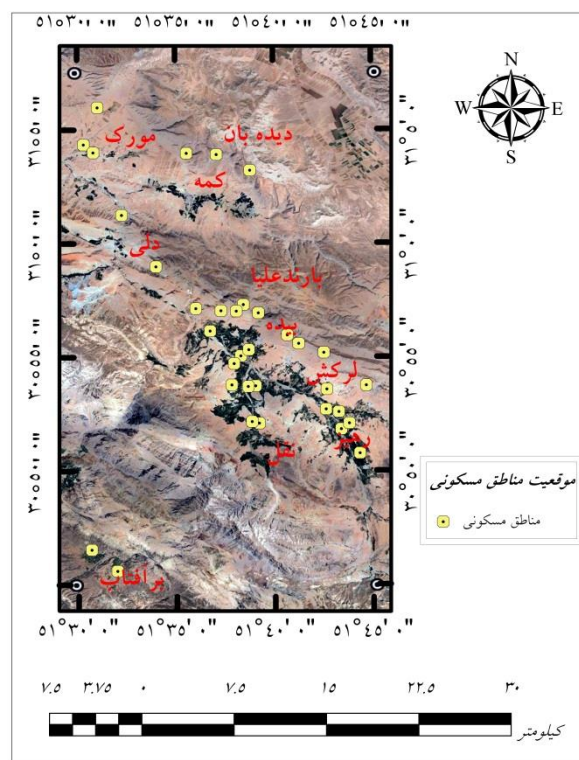
تجزیه و تحلیل شبکه‌های زه‌کشی یک ابزار قدرتمند به منظور بررسی زمین لغزش‌های بزرگ است (Kuncheva & Whitaker, 2003). برای تهیه نقشه‌ی زه‌کش منطقه از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای ناحیه‌ی مورد تحقیق استفاده شد (شکل ۴-۶). جهت استفاده از لایه‌ی زه‌کش به عنوان یک لایه‌ی مؤثر، لایه‌ی فاصله تا زه‌کش به کمک محیط GIS و ابزار فاصله‌ی اقلیدسی تولید شد. در نهایت کلاس بندی لایه‌ی فاصله تا زه‌کش در پنج گروه صورت گرفت.



شکل ۴-۶: موقعیت آبراهه‌ها

۵-۱-۳-۴ مناطق مسکونی

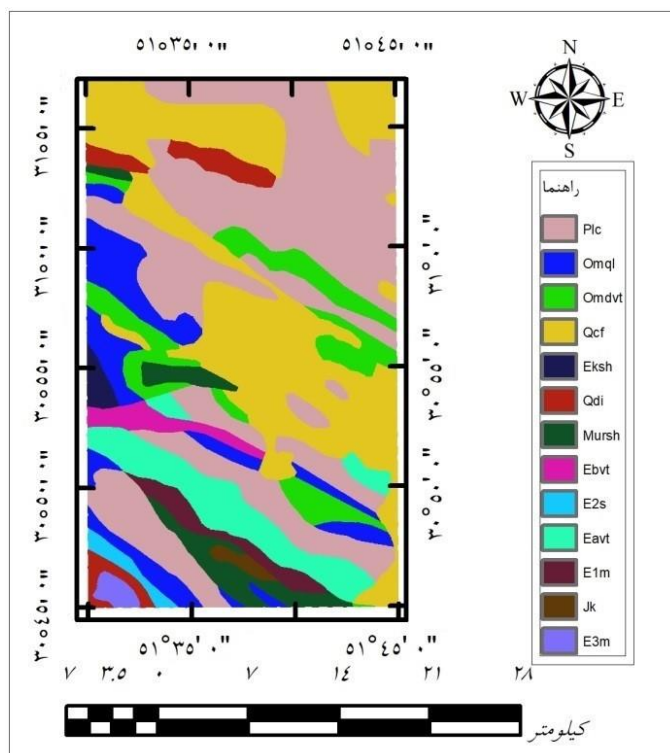
بررسی تأثیر مناطق مسکونی بر ایجاد زمین لغزش، به دلیل نشست‌های زمین ناشی از برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی، حائز اهمیت است. جهت بررسی مناطق مسکونی در پدیده‌ی زمین لغزش از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۴-۷). برای مشاهده‌ی تأثیر لایه‌ی مناطق مسکونی در وقوع زمین لغزش نیاز به تولید پهنه‌بندی فاصله تا مناطق مسکونی وجود داشت که این لایه در محیط GIS تولید شد. سپس لایه‌ی نزدیکی به مناطق مسکونی در پنج گروه کلاس‌بندی گردید.



شکل ۴-۷: موقعیت مناطق مسکونی

۴-۳-۱-۶ لیتولوژی

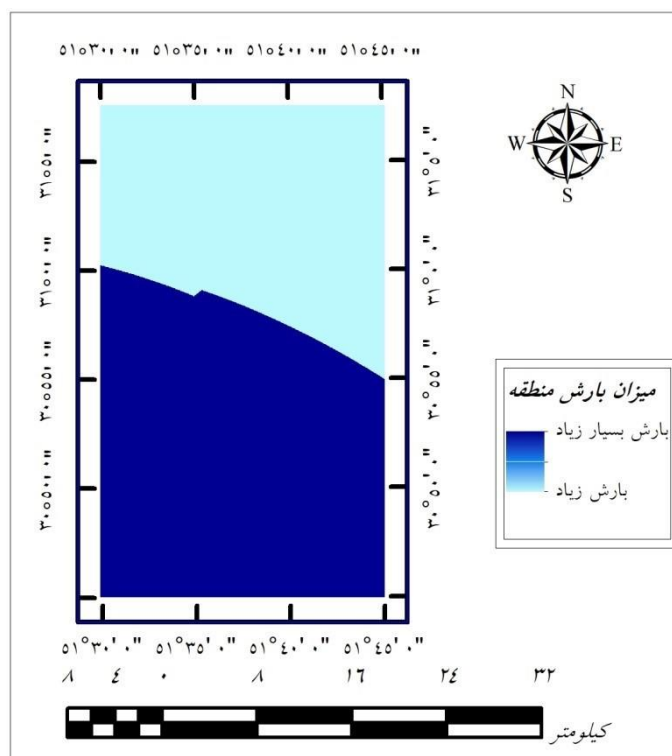
به‌طور گسترده‌ای مشخص شده است که پارامترهای زمین‌شناسی به‌شدت بر وقوع زمین‌لغزش‌ها تأثیر می‌گذارند؛ زیرا تغییرات سنگ‌شناسی و ساختاری اغلب منجر به تفاوت استحکام و نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود (Pradhan & Lee, 2010). برای بررسی تأثیر لیتولوژی در این منطقه از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شده است (شکل ۴-۸). برای تقسیم‌بندی و تعیین حد بین خاک و سنگ از مرز مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی یک مگاپاسکال استفاده شد. بدین منظور، کانی‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی کمتر از یک مگاپاسکال به‌عنوان خاک، و کانی‌های با مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی بیشتر از یک مگاپاسکال به‌عنوان سنگ انتخاب شدند. هم‌چنین گروه سنگ با توجه به جداول کانی‌شناسی، به دو گروه سنگ نرم و سنگ سخت تقسیم‌بندی شد.



شکل ۴-۸: لیتولوژی

۷-۱-۳-۴ بارش

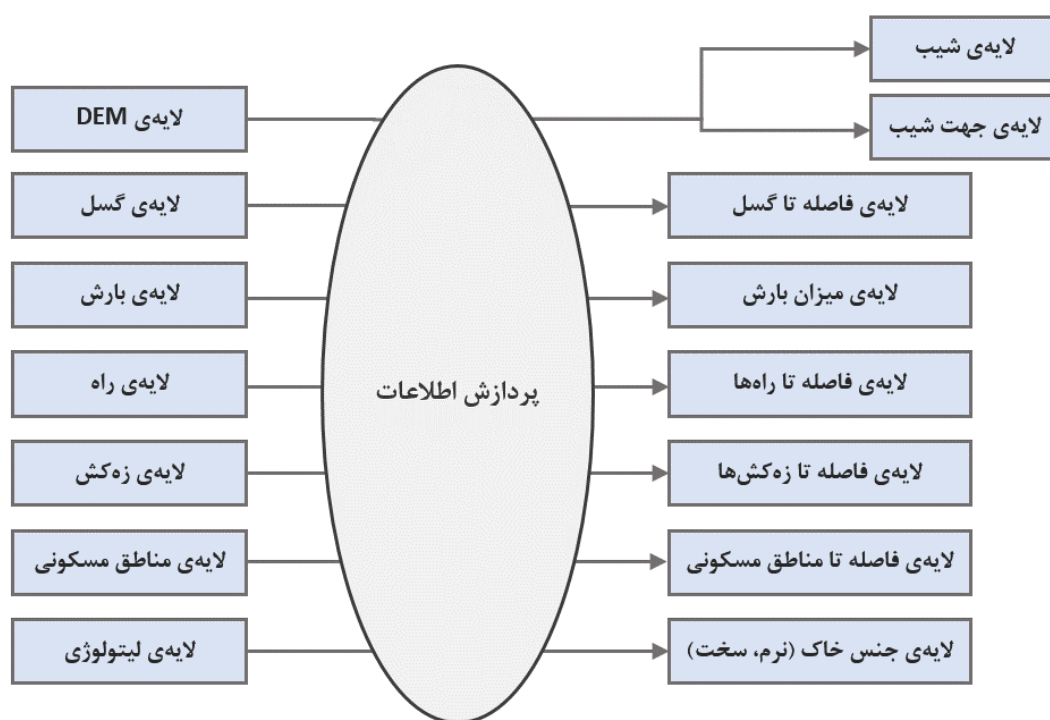
اشباع شیب توسط آب یکی از علل اصلی زمین لغزش است. اشباع می‌تواند در قالب میزان بارش شدید، ذوب برف و تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی اتفاق بیفتد (Highland, et al., 2008). برای تهیه نقشه‌ی میزان بارش محدودی مورد مطالعه از میانگین اطلاعات بارش سازمان هواشناسی کشور در ۱۰ سال اخیر در ۱۹ ایستگاه اطراف ناحیه‌ی مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۴-۹). سپس با توجه به میزان بارش، فاصله‌ی میان ۱۹ ایستگاه هواشناسی به پنج گروه تقسیم‌بندی شد. منطقه‌ی مورد مطالعه در قسمت بارندگی زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است.



شکل ۴-۹: میزان بارش منطقه

۴-۳-۲/ استخراج لایه‌ها و اطلاعات جی‌آی‌اس

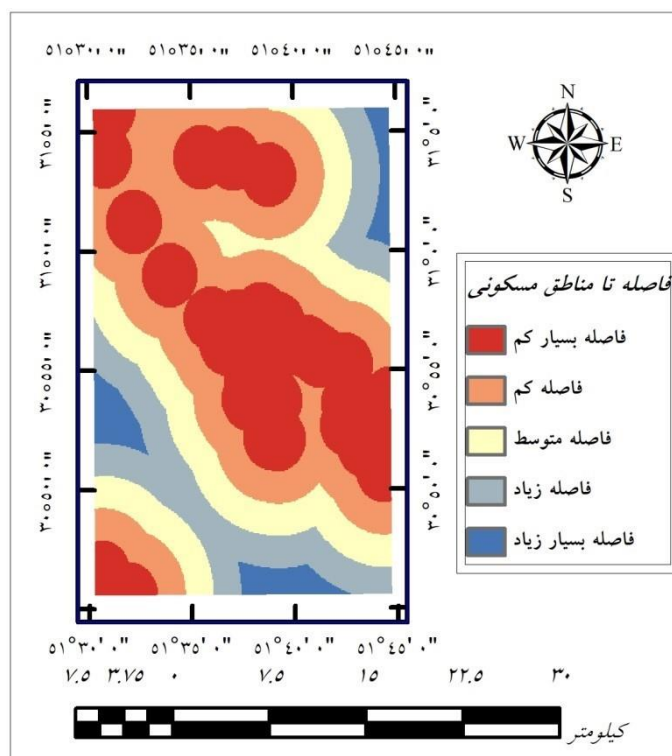
با استفاده از آنالیز لایه‌های اطلاعاتی و بهره‌گیری از محیط جی‌آی‌اس لایه‌های ثانویه (مؤثر) تولید شدند. آنالیز لایه‌های اطلاعاتی شامل استفاده از ابزار فاصله‌ی اقلیدسی، درون‌یابی با روش کریجینگ، شیب، جهت شیب، و نیز کلاس‌بندی مجدد لایه‌های اطلاعاتی است. لایه‌های مؤثر شامل فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا جاده، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله تا آبراهه، میزان بارش منطقه، و فاصله تا گسل هستند که در شکل ۴-۱۰ لایه‌ی اطلاعاتی مربوط به هر لایه‌ی مؤثر مشخص شده‌اند.



شکل ۴-۱۰: لایه‌های مؤثر تولیدشده از لایه‌های اطلاعاتی

۱-۲-۳-۴ فاصله تا مناطق مسکونی

در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۳۴ روستا حضور دارند. با بررسی مناطق مسکونی در منطقه‌ی مورد مطالعه درمی‌یابیم تعداد زیادی از زمین‌لغزش‌های تاریخی در مناطقی که با فاصله‌ی کم از مناطق مسکونی مشخص شده‌اند رخ داده‌اند، و از این جهت این لایه از تأثیر بسزایی در پهنه‌بندی خطر برخوردار خواهد بود (شکل ۴-۱۱).



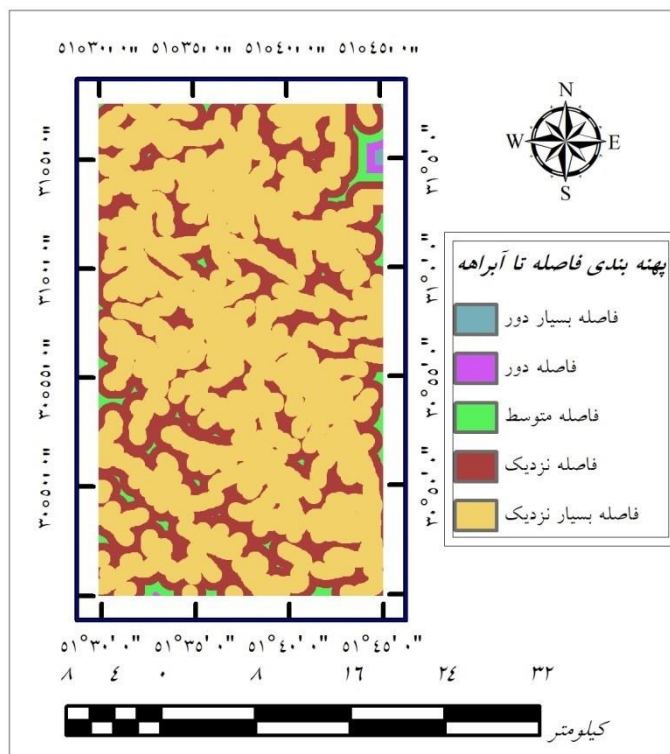
شکل ۴-۱۱: فاصله تا مناطق مسکونی

۲-۲-۳-۴ فاصله تا آبراهه

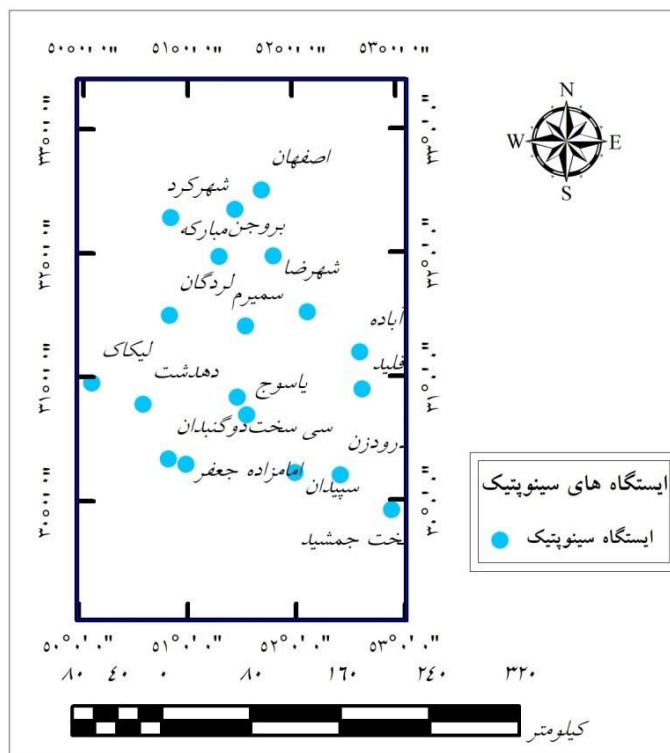
یکی از علل اصلی تراکم مناطق مسکونی در منطقه‌ی مورد مطالعه، وجود رودخانه‌ی ماربر است. شکل ۴-۱۲ پهنه‌بندی فاصله تا آبراهه را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳-۴ میزان بارش

با توجه به ارزیابی انجام‌شده بر روی ایستگاه‌های سینوپتیک در اطراف منطقه‌ی مورد مطالعه، و پهنه‌بندی میزان بارش به کمک درون‌یابی با روش کریجینگ، مشخص شد. منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر بارندگی در دسته‌ی مناطق با بارش زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. میزان بارندگی مناطق در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



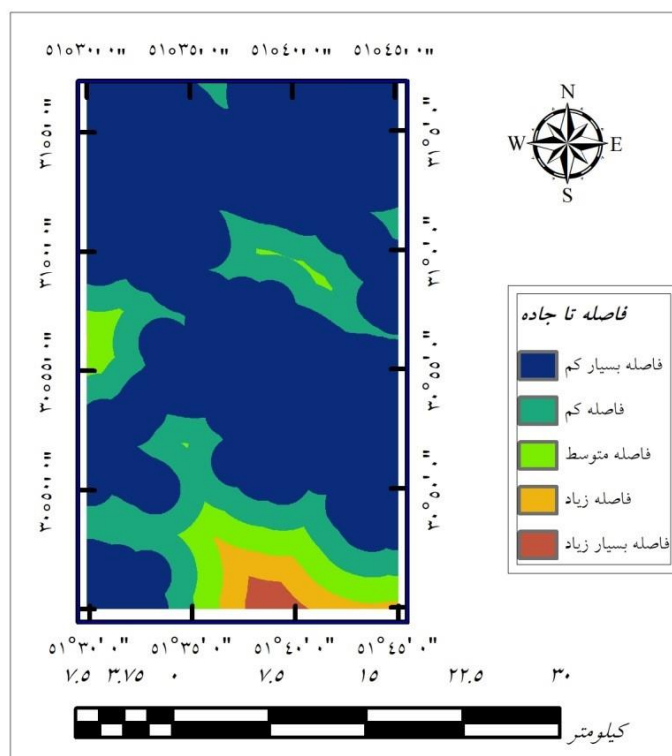
شکل ۴-۱۲: پهنه‌بندی فاصله تا آبراهه



شکل ۴-۱۳: موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک

۴-۲-۳-۴ فاصله تا جاده

ساخت راه، حمل‌ونقل و عبور وسایل نقلیه یکی از علل وقوع زمین‌لغزش است. به همین دلیل، بررسی فاصله‌ی نقاط مختلف از راه‌ها و جاده‌ها ضرورت دارد. فاصله تا جاده‌ها در شکل ۱۴-۴ مشخص شده است.

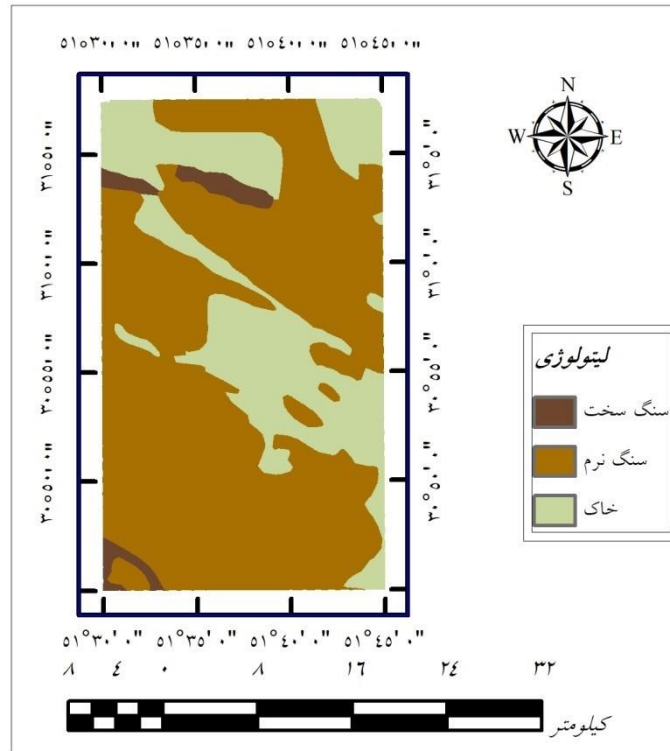


شکل ۱۴-۴: فاصله تا جاده‌ها

۵-۲-۳-۴ لیتولوژی

یکی از عوامل مؤثر در پیش‌بینی وقوع یا عدم‌وقوع زمین‌لغزش، عامل لیتولوژی است. جهت استفاده از این عامل در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، نیاز به کلاس‌بندی مجدد لیتولوژی به بازه‌ی محدودتری وجود دارد. برای کلاس‌بندی مجدد از جدول ۴-۱ استفاده شده است. در این جدول مقاومت فشاری تک‌محوره برای تعیین مرز بین خاک و سنگ به کار رفته است؛ بنابراین مصالح با مقاومت فشاری کمتر از یک مگاپاسکال خاک، و مصالح با مقاومت فشاری بیشتر از یک مگاپاسکال

سنگ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین سنگ‌ها با توجه به جداول سختی و مقاومت، به دو نوع سخت و نرم تقسیم‌بندی شده‌اند. در نهایت مصالح موجود در منطقه به سه دسته‌ی سنگ سخت، سنگ نرم، و خاک تقسیم شده‌اند (شکل ۴-۱۵).



شکل ۴-۱۵: لیتولوژی و تقسیم‌بندی مصالح

جدول ۴-۱: کلاس بندی مصالح بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوره

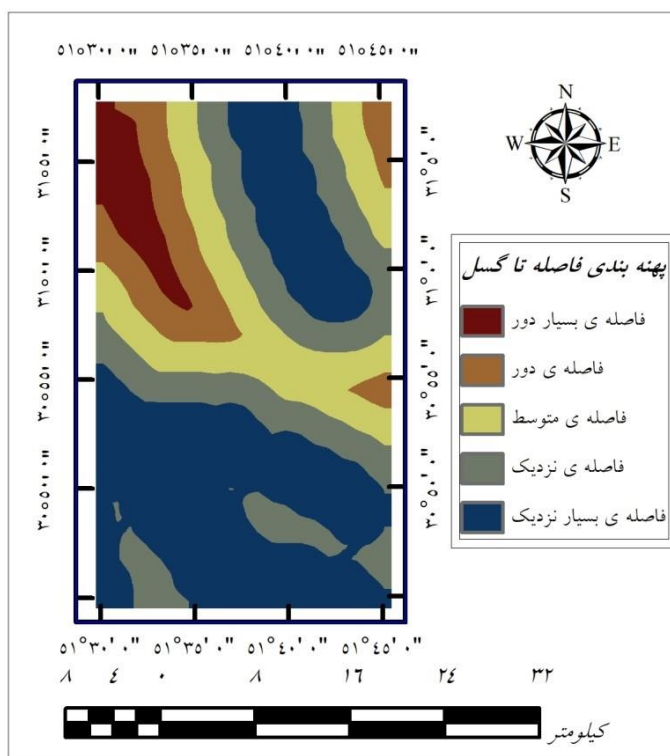
خاک	سنگ نرم	سنگ سخت
نهشته‌های ماسه‌ای سفت نشده (Qd)	کنگلومرا، ماسه سنگ و گل سنگ (Ple) شیل، مارن ژئوپس‌دار و ماسه سنگ (Mursh) مارن گچ‌دار (Murmg)	دیوریت (Qdi) گدازه‌های بازالتی (Qbv) گدازه‌های آندزی بازالتی (bv .Qa)
تراس‌های کهن (Qft2)	مارن گچ‌دار با میان لایه‌های ماسه سنگ (Murm) ماسه سنگ‌های زرد تا سرخ، مارن گچ‌دار، سیلت استون و شیل (Mur)	کنگلومرای پلی ژنتیک (PLQc)
پهنه‌ی	مارن، ماسه سنگ و سنگ آهک (Mm,s,l) سنگ آهک ریفی (OMql)	گرانودیوریت (Plrg-di) گدازه‌های آندزی بازالتی

رسی (Qof) تراس‌های کهن (Qft1)	توف‌های داسیتی (OMdvt) ژیپس (Olgy) توف سبز و شیل‌های توفی (Ek) توف داسیتی (Edt) توف داسیتی آندزیتی (Ed.at) توف و گدازه‌های بازالتی (Ebv) توف و گدازه‌های آندزیتی (Eavt) ژیپس (Ekg) توف آندزیتی (Eat) شیل با میان لایه‌های توف (Eksh) شیل آهکی با میان لایه‌های توف (Ek.a) ماسه سنگ، مارن و سنگ آهک (E25) مارن، گچ، سنگ آهک (Elm) سنگ آهک ریفی و مارن ژئوس‌دار سازند زیارت (PeE2) سنگ آهک‌های آربیتولین‌دار (Kizl) سنگ‌های کربناتی (Jk) سنگ آهک با میان لایه‌های شیل سازند دلیچای (Jd) سنگ آهک اوولیتی، سنگ آهک شیلی و دولومیت (TRE) ماسه سنگ، سیلت استون، رس سنگ با میان لایه‌های زغال (TRjs) ماسه سنگ قرمز و شیل همراه با میان لایه‌های سنگ آهک ماسه‌ای (Pd) سنگ آهک فسیل‌دار خاکستری تیره با میان لایه‌های شیل سیاه (Cm) سنگ آهک، شیل و مارن تفکیک‌نشده (Db-sh) ماسه سنگ آرکوزی و سیلت استون میکادار (Cl) سنگ آهک تریلوبیت‌دار دولومیتی ماسه سنگ و شیل (COM) ماسه سنگ و سیلت استون‌های میکادار (Czl) سیلت استون‌های میکادار و ماسه سنگ درشت دانه سازند زایگون (Cz) واحدهای دولومیتی و سنگ آهک با میان لایه‌های شیل (pC-Cs)	(Oma.bv) کنگلومرای ماسه سنگ (Oles) گرانودیوریت) (Ogr-di گرانیت (Ogr) گدازه‌های داسیتی (Odv) نیمه‌آتشفشانی‌های داسیتی (Ods) دیوریت (Odi) گدازه‌های آندزیتی (Oav) گدازه‌های آندزی بازالتی (Ed.av) گابرو (Egb) توف و گدازه‌های آندزیتی (Edvt) داسیت‌های نیمه‌آتشفشانی (Edvs) گدازه‌های بازالتی (Ebv) نیمه‌آتشفشانی‌های آندزیتی (Eavs) گدازه‌های آندزیتی (Eav) گدازه‌های آندزی بازالتی (Ea.bv) کنگلومرای پلی ژنتیک سرخ و ماسه سنگ (E1c) کنگلومرای درشت‌دانه پلی ژنتیک با میان لایه‌های ماسه سنگ (Pgkc)
---	---	---

	شیل‌های سیلتی با میان لایه‌های ماسه سنگ (pCk) مارن، ماسه سنگ و آهک (E3m)	سنگ‌های تفکیک نشده (Ku) کنگلوмера و ماسه سنگ (K2c) سنگ‌های کرتاسه (K) گدازه‌های بازالتی (Kbv) سنگ آهک خاکستری (J1) کنگلومرای سفید کوارتزی (Juc) سنگ‌های تفکیک نشده پر مین (P) سنگ آهک خاکستری و متوسط لایه (Pr) سنگ‌های تفکیک نشده (pC-C) گدازه‌های آندزیتی (Edv)
--	---	--

۴-۳-۲-۶ فاصله تا گسل

با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی گسل منطقه (شکل ۴-۱۶) مشاهده می‌شود که در نیمه‌ی جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه، تمامی نقاط در فاصله‌ی نزدیک و بسیار نزدیک نسبت به گسل‌ها قرار دارند. گسل موجود در این ناحیه، قسمتی از گسل زاگرس است که از قسمت شمالی تا مریوان و از قسمت جنوبی تا شمال بندرعباس ادامه دارد. این گسل از نوع راندگی یا تراست است و به دلیل جهت شمال شرقی بودن آن، زمین لغزش‌های چشم‌گیری در دیواره‌ی شمال شرق زاگرس مشاهده نشده است.



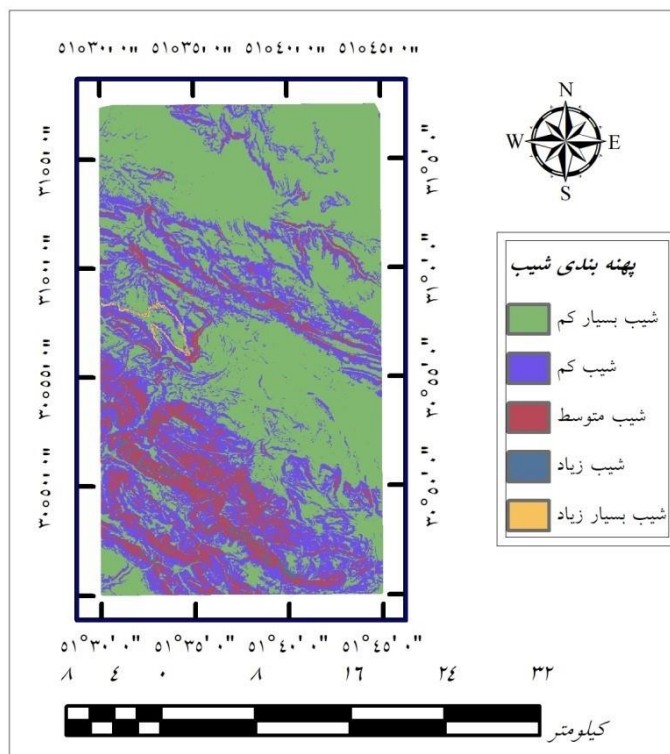
شکل ۴-۱۶: پهنه‌بندی فاصله تا گسل

۷-۲-۳-۴ میزان شیب

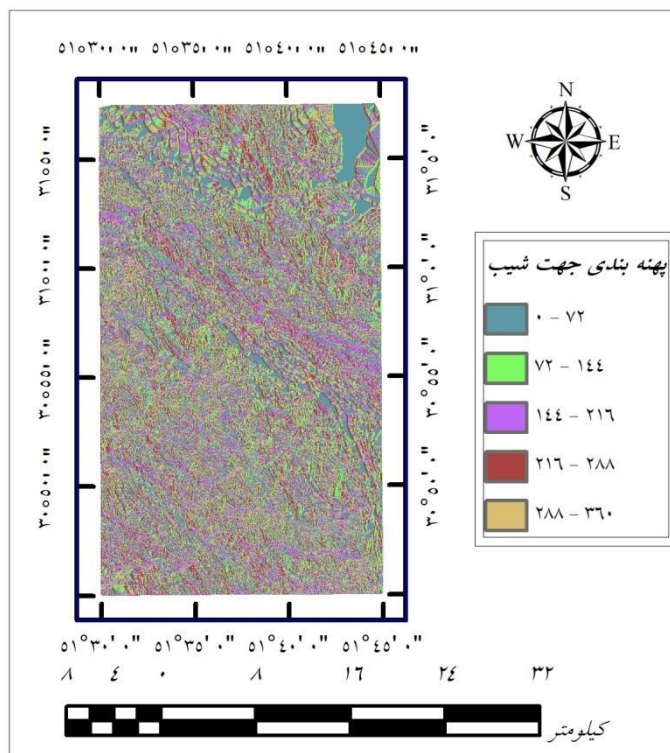
به‌طور کلی قسمت‌های غربی، جنوبی، و جنوب‌غربی منطقه‌ی مطالعاتی شیب‌های زیادی را شامل می‌شود. دلیل اصلی وجود این شیب‌ها حضور قسمتی از رشته‌کوه زاگرس به‌نام کوه دینار در این محدوده، و منتهی‌شدن این کوه به دشتی وسیع در قسمت شمال‌شرق خود است. پهنه‌بندی شیب در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود.

۸-۲-۳-۴ جهت شیب

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌ی جهت شیب به منظور اعمال تأثیر نور خورشید بر رطوبت خاک منطقه تولید شد (شکل ۴-۱۸) و در پنج گروه طبقه‌بندی گردید.



شکل ۴-۱۷: پهنه‌بندی شیب



شکل ۴-۱۸: پهنه‌بندی جهت شیب

۳-۳-۴ روش تحلیل سلسله‌مراتبی

پس از تولید لایه‌های مؤثر و اعمال وزن‌های حاصل از رأی کارشناس، هر لایه با استفاده از دو روش هم‌پوشانی فازی (شکل ۴-۱۹) و هم‌پوشانی وزنی (شکل ۴-۲۰) نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی تولید شد. هم‌چنین احتمال وقوع زمین‌لغزش در نقشه‌های تولیدشده به پنج گروه خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد، و خطر بسیار زیاد تقسیم‌بندی گردید. در جدول ۴-۴ وزن‌های حاصل از رأی کارشناس برای دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ذکر شده است. رأی کارشناس برای روش فازی AHP و روش AHP به‌ترتیب در جدول ۴-۲ و جدول ۴-۳ آورده شده‌اند.

جدول ۴-۲: رأی کارشناس برای روش فازی AHP

	میزان شیب	جهت شیب	فاصله تا مناطق مسکونی	فاصله تا گسل
میزان شیب	(۱/۲, ۱, ۲)	(۷, ۸, ۹)	(۱/۴, ۱/۳, ۱/۲)	(۱, ۲, ۳)
جهت شیب	(۱/۹, ۱/۸, ۱/۷)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۱/۹, ۱/۹, ۱/۸)	(۱/۸, ۱/۷, ۱/۶)
فاصله تا مناطق مسکونی	(۲, ۳, ۴)	(۸, ۹, ۹)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۳, ۴, ۵)
فاصله تا گسل	(۱/۳, ۱/۲, ۱)	(۶, ۷, ۸)	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)	(۱/۲, ۱, ۲)
فاصله تا زه‌کش	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)	(۳, ۴, ۵)	(۱/۸, ۱/۷, ۱/۶)	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)
لیتولوژی	(۲, ۳, ۴)	(۸, ۹, ۹)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۳, ۴, ۵)
میزان بارش	(۱/۸, ۱/۷, ۱/۶)	(۱, ۲, ۳)	(۱/۹, ۱/۸, ۱/۷)	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)
فاصله تا جاده	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)	(۵, ۶, ۷)	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)	(۱/۳, ۱/۲, ۱)
(ادامه‌ی ردیف)	فاصله تا زه‌کش	لیتولوژی	میزان بارش	فاصله تا جاده
میزان شیب	(۵, ۶, ۷)	(۱/۴, ۱/۳, ۱/۲)	(۶, ۷, ۸)	(۳, ۴, ۵)
جهت شیب	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)	(۱/۹, ۱/۹, ۱/۸)	(۱/۳, ۱/۲, ۱)	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)
فاصله تا مناطق مسکونی	(۶, ۷, ۸)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۷, ۸, ۹)	(۵, ۶, ۷)
فاصله تا گسل	(۳, ۴, ۵)	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)	(۵, ۶, ۷)	(۱, ۲, ۳)
فاصله تا زه‌کش	(۱/۲, ۱, ۲)	(۱/۸, ۱/۷, ۱/۶)	(۱, ۲, ۳)	(۱/۳, ۱/۲, ۱)
لیتولوژی	(۶, ۷, ۸)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۷, ۸, ۹)	(۵, ۶, ۷)
میزان بارش	(۱/۳, ۱/۲, ۱)	(۱/۹, ۱/۸, ۱/۷)	(۱/۲, ۱, ۲)	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)
فاصله تا جاده	(۱, ۲, ۳)	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)	(۳, ۴, ۵)	(۱/۲, ۱, ۲)

جدول ۴-۳: رأی کارشناس برای روش AHP

	میزان شیب	جهت شیب	فاصله تا مناطق مسکونی	فاصله تا گسل	فاصله تا زه‌کش	لیتولوژی	میزان بارش	فاصله تا جاده
میزان شیب	۱	۶	۱/۳	۲	۴	۱/۳	۵	۳
جهت شیب	۱/۶	۱	۱/۹	۱/۵	۱/۳	۱/۹	۱/۲	۱/۵
فاصله تا مناطق مسکونی	۳	۹	۱	۴	۶	۱	۷	۵
فاصله تا گسل	۱/۲	۵	۱/۴	۱	۳	۱/۴	۴	۲
فاصله تا زه‌کش	۱/۴	۳	۱/۶	۱/۳	۱	۱/۶	۲	۱/۲
لیتولوژی	۳	۹	۱	۴	۶	۱	۷	۵
میزان بارش	۱/۵	۲	۱/۷	۱/۴	۱/۲	۱/۷	۱	۱/۳
فاصله تا جاده	۱/۳	۴	۱/۵	۱/۲	۲	۱/۵	۳	۱

جدول ۴-۴: وزن‌های حاصل از رأی کارشناس برای تحلیل‌های سلسله‌مراتبی و سلسله‌مراتبی فازی

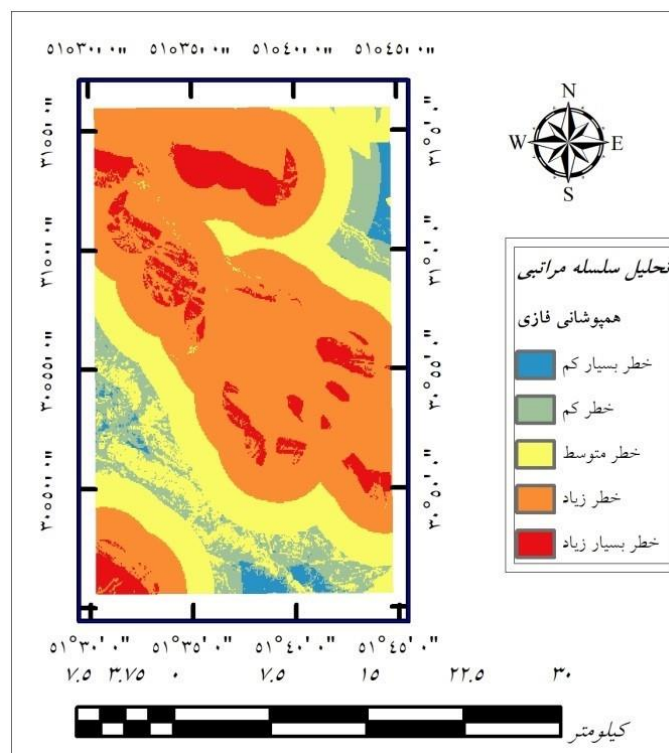
نام لایه‌ی مؤثر	روش تحلیل سلسله‌مراتبی	روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی
فاصله تا مناطق مسکونی	۰/۲۹۹۷۵	۰/۲۲۷۰
لیتولوژی	۰/۲۹۹۷۵	۰/۲۲۷۰
میزان شیب	۰/۱۶۲۲۴	۰/۱۹۸۵
فاصله تا گسل	۰/۰۹۸۰۹	۰/۱۳۷۰
فاصله تا جاده	۰/۰۵۶۶۰	۰/۱۰۱۰
فاصله تا زه‌کش	۰/۰۳۹۹۵	۰/۰۶۵۰
میزان بارش	۰/۰۲۴۳۳	۰/۰۳۲۸
جهت شیب	۰/۰۱۹۱۳	۰/۰۱۱۷

با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی مشاهده می‌شود نقشه‌ی حاصل از هم‌پوشانی وزنی مساحت زیادی را تحت عنوان خطر زیاد و بسیار زیاد پیش‌بینی کرده است که این مورد باعث کاهش دقت نقشه‌ی مذکور می‌شود. هم‌چنین نقشه‌ی

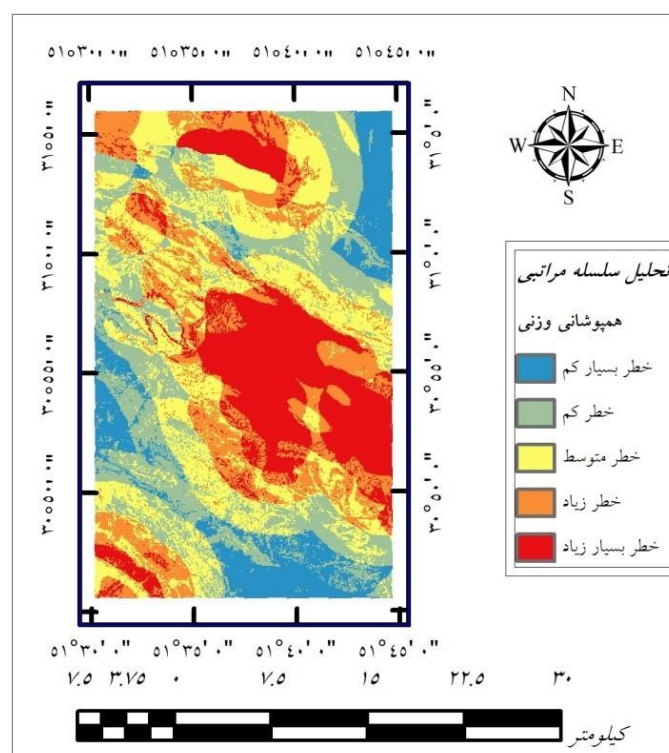
تولیدشده به روش هم‌پوشانی فازی قسمت‌های مرکزی منطقه‌ی مورد مطالعه را به‌عنوان نقاط با خطر زیاد پیش‌بینی کرده است. این قسمت‌ها ناحیه‌ی متمرکز از نظر تراکم جمعیتی هستند و ۲۳ منطقه‌ی مسکونی در این محدوده حضور دارند. در منطقه‌ی مورد مطالعه تعداد ۶۸ زمین‌لغزش به وقوع پیوسته است. با مقایسه‌ی زمین‌لغزش‌های تاریخی با نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تولیدشده مشاهده شد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی وزنی ۸۰٪ زمین‌لغزش‌ها را در محدوده‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار می‌دهد. هم‌چنین نقشه‌ی حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی فازی ۸۶٪ زمین‌لغزش‌ها را در محدوده‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد پیش‌بینی کرده است.

۴-۳-۴ روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

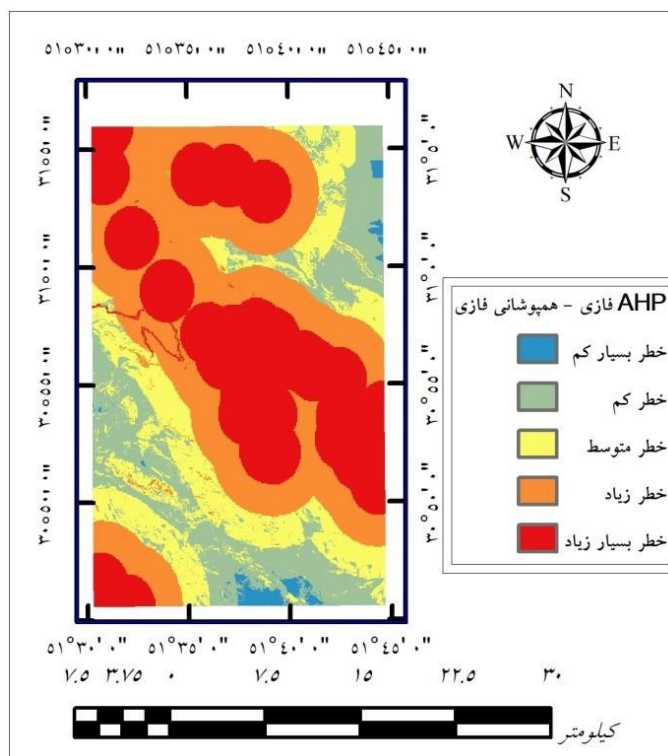
جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی از وزن‌دهی به روش فازی (شکل ۴-۲۱) و وزنی (شکل ۴-۲۲) استفاده شد. هم‌چنین احتمال وقوع زمین‌لغزش در نقشه‌های تولید شده به پنج گروه خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد، و خطر بسیار زیاد تقسیم‌بندی شد. با بررسی نقشه‌های تولیدشده از این روش مشخص گردید که نقشه‌ی حاصل با استفاده از هم‌پوشانی فازی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نیز مناطق زیادی را تحت عنوان خطر زیاد و بسیار زیاد تعیین کرده است. هم‌چنین هر دو نقشه‌ی حاصل قسمت مرکزی و شرقی منطقه‌ی مورد مطالعه را در دسته‌ی مناطق با احتمال وقوع زمین‌لغزش زیاد و بسیار زیاد قرار داده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، این مناطق از تراکم جمعیت زیادی نسبت به سایر قسمت‌های منطقه‌ی مورد مطالعه برخوردار هستند. با بررسی زمین‌لغزش‌های تاریخی منطقه‌ی مورد مطالعه و جایگذاری این نقاط در نقشه‌های حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، مشخص شد که نقشه‌ی تولیدشده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی وزنی ۷۵٪ زمین‌لغزش‌ها و نقشه‌ی تولیدشده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی فازی ۸۸٪ از زمین‌لغزش‌های تاریخی را در مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد پیش‌بینی کرده است.



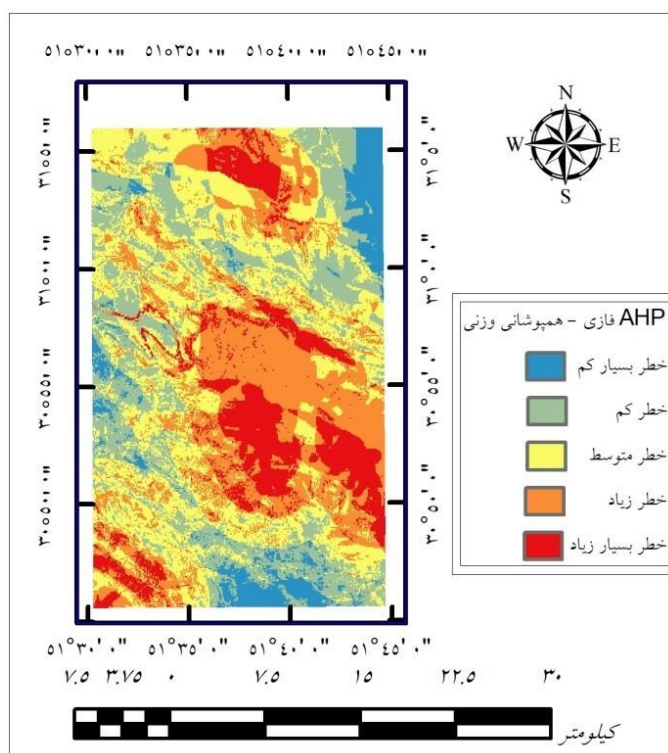
شکل ۴-۱۹: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی فازي



شکل ۴-۲۰: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی وزنی



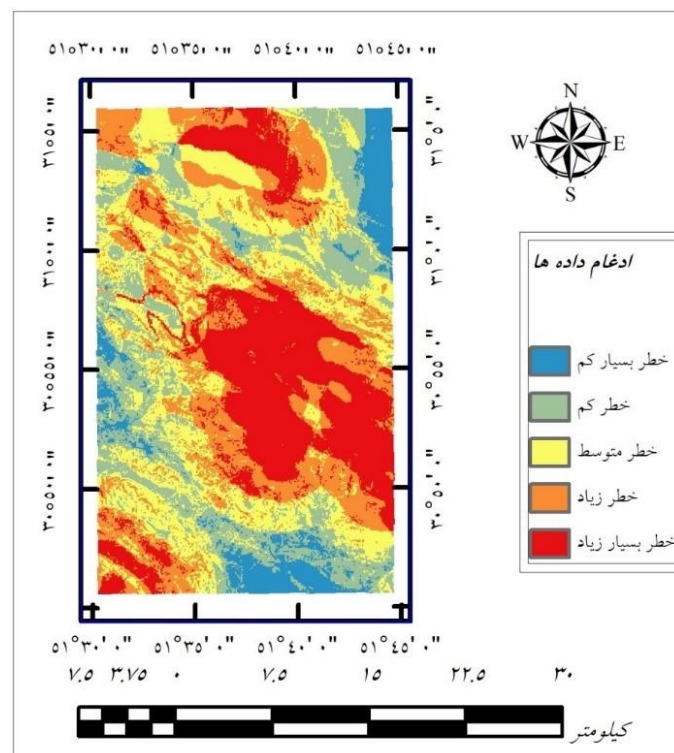
شکل ۴-۲۱: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فاز با هم‌پوشانی فاز



شکل ۴-۲۲: پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فاز با هم‌پوشانی وزنی

۴-۳-۵ / ادغام نتایج

جهت ادغام نتایج با استفاده از روش حداکثر رأی وزن دار از دقت چهار روش پهنه‌بندی به عنوان وزن آن‌ها در رابطه‌ی اصلی استفاده شده است. سپس احتمال وقوع زمین‌لغزش در هر یک از پیکسل‌ها مشخص شد و در نهایت، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در پنج گروه خطر وقوع زمین‌لغزش بسیار کم تا بسیار زیاد کلاس‌بندی شد (شکل ۴-۲۳).



شکل ۴-۲۳: نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حاصل از ادغام نتایج

۴-۳-۶ / صحت‌سنجی

جهت بررسی دقت نقشه‌های حاصل از پنج روش از درصد پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های تاریخی برای هر روش استفاده شد. دقت پیش‌بین هر روش درصد تعداد زمین‌لغزش‌های تاریخی موجود در قسمت‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد در هر نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شد.

جدول ۴-۵: صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

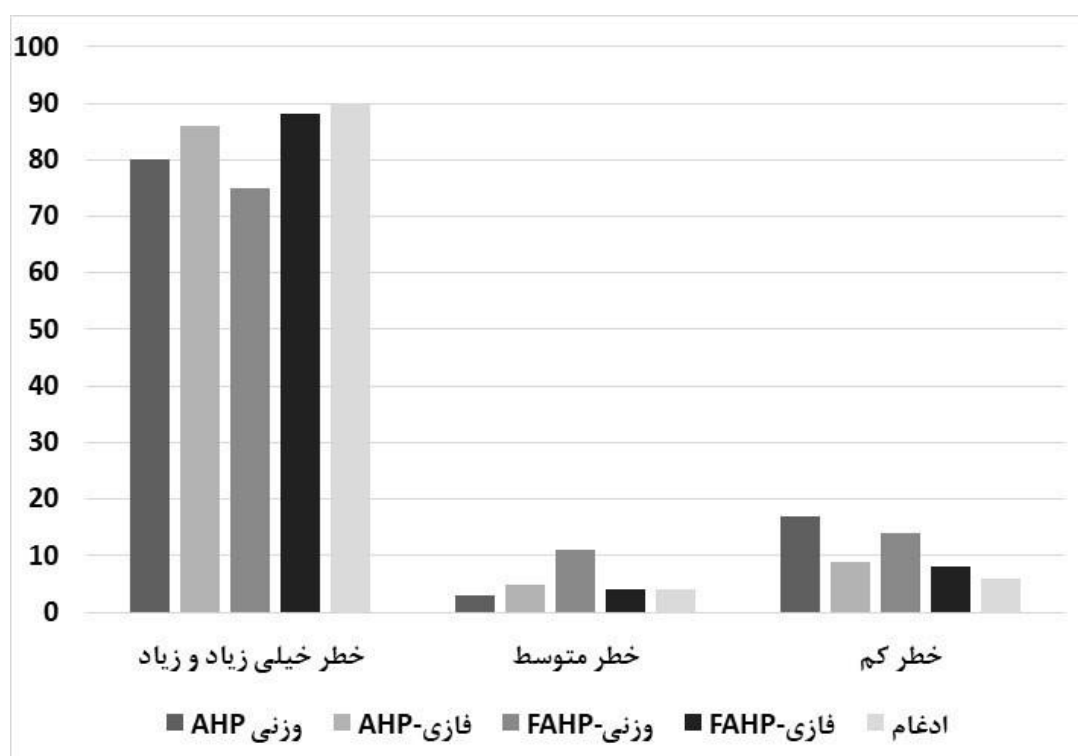
درصد زمین‌لغزش‌های موجود در محدوده به تفکیک روش (تعداد مجموع زمین‌لغزش‌ها: ۶۸)					محدوده‌ی خطر
ادغام نتایج	-FAHP هم‌پوشانی فازی	-FAHP هم‌پوشانی وزنی	-AHP هم‌پوشانی فازی	-AHP هم‌پوشانی وزنی	
٪۹۰	٪۸۸	٪۷۵	٪۸۶	٪۸۰	زیاد و بسیار زیاد
٪۴	٪۴	٪۱۱	٪۵	٪۳	متوسط
٪۶	٪۸	٪۱۴	٪۹	٪۱۷	کم و بسیار کم

با بررسی نتایج حاصل از صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی، طبق جدول ۴-۵، مشاهده شد که نقشه‌های حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی وزنی و فازی به ترتیب ٪۸۰ و ٪۸۶ دقت در پیش‌بینی دارند. هم‌چنین نقشه‌های حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی وزنی و فازی به ترتیب ٪۷۵ و ٪۸۸ دقت در پیش‌بینی دارند. با بررسی نتایج مشخص شد که روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی فازی با دقت به ترتیب ٪۸۸ و ٪۸۶ دارای بهترین نرخ پیش‌بینی هستند، اما با توجه بالابودن نسبت مساحت قسمت‌های خطر زیاد و خطر بسیار زیاد نسبت به کل منطقه‌ی مورد مطالعه در این نقشه‌ها، از دقت آن‌ها کاسته می‌شود (جدول ۴-۶).

با ادغام نتایج حاصل از چهار نقشه و بررسی نقشه‌ی مذکور، مشاهده شد که دقت پیش‌بینی زمین‌لغزش به ٪۹۰ درصد افزایش یافت. هم‌چنین مساحت قسمت خطر زیاد و بسیار زیاد در این نقشه بسیار کمتر از نقشه‌های حاصل از روش‌های هم‌پوشانی فازی با دقت ٪۸۸ و ٪۸۶ است. مقایسه‌ی این دقت‌ها در شکل ۴-۲۴ به تصویر درآمده است.

جدول ۴-۶: درصد مساحت پهنه‌های مختلف خطر زمین لغزش

ادغام نتایج	-FAHP هم پوشانی فازی	-FAHP هم پوشانی وزنی	-AHP هم پوشانی فازی	-AHP هم پوشانی وزنی	روش پهنه‌بندی میزان خطر
۴۶/۷۹۲۸۷۲۴۷	۳۹/۸۲۰۱۱	۵۷/۹۱۴۶۸۶	۳۸/۸۳۵۰۷۹	۶۰/۴۳۹۸۲	خطر زیاد و بسیار زیاد
۲۶/۰۳۵۶۷۰۳۲	۳۰/۸۱۵۶۴	۱۸/۵۸۰۰۷۷	۲۶/۶۴۹۱۶۷	۲۷/۰۲۲۶	خطر متوسط
۲۷/۱۷۱۴۵۷۲۱	۲۹/۳۶۴۲۵	۲۳/۵۰۵۲۳۷	۳۴/۵۱۵۷۵۳	۱۲/۵۳۷۳۲	خطر کم و بسیار کم



شکل ۴-۲۴: مقایسه‌ی دقت روش‌های پهنه‌بندی

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این تحقیق توانایی روش‌های کیفی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و هم‌چنین تأثیر ادغام نتایج حاصل از این روش‌ها بر دقت پیش‌بینی زمین‌لغزش، در حوضه‌ی رودخانه‌ی ماربر مورد مطالعه قرار گرفت.

بدین ترتیب، ابتدا خصوصیتی که پیش‌بینی می‌شد در رخداد زمین‌لغزش موثر هستند انتخاب شدند. این ویژگی‌ها عبارتند از: شیب، جهت شیب، فاصله تا گسل، فاصله تا آبراهه، فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا جاده، میزان بارش، و لیتولوژی.

سپس برای تولید این لایه‌ها از لایه‌های اولیه شامل مدل رقومی ارتفاعی، خطوط گسل، موقعیت آبراهه، موقعیت مناطق مسکونی، موقعیت جاده‌ها، ایستگاه‌های سینوپتیک، و جنس خاک استفاده شد. در نهایت پرسش‌نامه‌ی مربوط به روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در اختیار کارشناسان قرار گرفت، و آن‌ها نظر خود را در قالب یک رأی اعلام کردند. بعد از اعمال رأی کارشناسان در مدل‌های روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، وزن لایه‌ها در دو روش مشخص شد.

سپس با دراختیارداشتن وزن‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شامل روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی هم‌پوشانی وزنی و فازی، و روش تحلیل سلسله‌مراتبی هم‌پوشانی وزنی و فازی حاصل شد. در نهایت چهار نقشه‌ی پهنه‌بندی با روش حداکثر رأی وزن‌دار ادغام شدند.

پس از اخذ نتایج در فصل قبل، در این فصل نتایج حاصل در قسمت‌های مختلف، با توجه به اهداف و فرضیه‌های موردنظر، مورد بحث و بررسی شده‌اند و در ادامه‌ی آن، پیشنهادهایی برای کمک به پژوهش‌های آینده ارائه گردیده‌اند.

۵-۲ نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، روشی مرسوم جهت پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های آینده و کاهش خسارات جانی و مالی می‌باشد. این تحقیق با استفاده از ادغام نتایج حاصل از چند روش کیفی مختلف با روش حداکثر رأی وزن‌دار به دقت بالاتری در پیش‌بینی زمین‌لغزش دست یافت.

به این ترتیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی وزن‌دار ۸۰٪ زمین‌لغزش‌ها را در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد پیش‌بینی کرد. مساحت پهنه‌ی زیاد و بسیار زیاد در این روش شامل ۳۸/۸۳٪ از کل منطقه است. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هم‌پوشانی فازی درصد پیش‌بینی زمین‌لغزش به ۸۶٪ افزایش می‌یابد، اما این روش ۶۰/۴۳٪ از منطقه را در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار می‌دهد که باعث کاهش چشم‌گیر دقت نقشه می‌شود.

هم‌چنین در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با هم‌پوشانی وزن‌دار، نقشه‌ی حاصل ۷۵٪ زمین‌لغزش‌ها را در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار داد. مساحت قسمت پهنه‌ی زیاد و بسیار زیاد در این روش شامل ۳۹/۸۲٪ از کل منطقه‌ی مورد مطالعه است. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی که با روش هم‌پوشانی فازی حاصل شد، ۸۸٪ زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفتند که افزایش قابل توجهی می‌باشد؛ اما این نقشه نیز مانند هم‌پوشانی فازی که در روش تحلیل سلسله‌مراتبی مشاهده شد، قسمت زیادی از منطقه‌ی مورد مطالعه را که شامل ۵۷/۹۱٪ از منطقه است، در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار داده است.

از این رو نقشه‌های حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی که با استفاده از هم‌پوشانی فازی تهیه شده‌اند، به دلیل قراردادن قسمت زیادی از نقشه در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد، به تنهایی قابل اعتماد نیستند.

در ادامه، از نقشه‌ی حاصل از چهار روش پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای تهیه‌ی نقشه‌ای که

علاوه بر توانایی مناسب در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش، قسمت محدودی از نقشه را نیز در قسمت پهنه‌ی زیاد و بسیار زیاد قرار دهد، استفاده شد.

نتیجه‌ی صحت‌سنجی نقشه‌ی حاصل از ادغام نتایج نشان داد، این روش ۹۰٪ زمین‌لغزش‌های تاریخی را در پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد قرار داد که افزایش قابل ملاحظه‌ای است. در عین حال مساحت پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد در این روش ۴۶/۷۹٪ از کل نقشه را شامل می‌شود. این روش توانست علاوه بر افزایش دقت پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش، مساحت بسیار کمتری را به پهنه‌ی خطر زیاد و بسیار زیاد اختصاص دهد.

۳-۵ پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، پیشنهادات زیر جهت بهبود دقت پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش ارائه شده‌اند:

- پیشنهاد می‌شود از سایر لایه‌های اطلاعاتی مانند لایه‌ی کاربری اراضی، رطوبت خاک، و ارتفاع ذوب برف نیز استفاده شود.
- از سایر روش‌های کیفی نیز جهت محاسبه‌ی وزن لایه‌ها می‌توان بهره جست.
- می‌توان تأثیر سایر روش‌های ادغام نتایج را بر دقت پیش‌بینی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مورد مطالعه قرار داد.
- پیشنهاد می‌شود از روش پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ادغام نتایج حاصل در مناطق دیگر نیز استفاده شود.

مراجع

Abella, E. C. & Van Westen, C., 2007. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, 4(4), pp. 311-325.

Ahmed, B., 2015a. Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12(6), pp. 1077-1095.

Ahmed, B., 2015b. Landslide susceptibility modelling applying user-defined weighting and data-driven statistical techniques in Cox's Bazar Municipality, Bangladesh. *Natural Hazards*, 79(3), pp. 1707-1737.

Bai, S.-B. et al., 2010. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), pp. 23-31.

Basofi, A., Fariza, A. & Dzulkarnain, M. R., 2016. *Landslides susceptibility mapping using fuzzy logic: A case study in Ponorogo, East Java, Indonesia*. s.l., IEEE, pp. 1-7.

Bera, A., Mukhopadhyay, B. P. & 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), pp. 935-959.

Bui, D. T. et al., 2016. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, 13(2), pp. 361-378.

Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S. & Tofani, V., 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), p. 2815.

Devkota, K. C. et al., 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), pp. 135-165.

Disasters, C. f. R. o. t. E. o., 2018. *Natural Disasters 2017*. [Online] Available at: <https://reliefweb.int/report/world/natural-disasters-2017> [Accessed 21 August 2020].

Elkadiri, R. et al., 2014. A remote sensing-based approach for debris-flow susceptibility assessment using artificial neural networks and logistic regression modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(12), pp. 4818-4835.

Fauvel, M., Chanussot, J. & Benediktsson, J., 2006. A combined support vector machines classification based on decision fusion. *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 2494-2497.

Fell, R. et al., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng Geol*, 102(3-4), pp. 85-98.

Highland, L., 2004. *Landslide Types and Processes*. [Online] Available at: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html> [Accessed 21 August 2020].

Highland, L., Bobrowsky, P. T. & others, 2008. The landslide handbook: a guide to understanding landslides. *US Geological Survey Reston*.

Hong, H., Pradhan, B., Xu, C. & Bui, D. T., 2015. Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. *Catena*, Volume 133, pp. 266-281.

Jiang, W. et al., 2017. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation. *Journal of Geographical Sciences*, 27(4), pp. 439-462.

Kanungo, D., Arora, M., Sarkar, S. & Gupta, R., 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(3-4), pp. 347-366.

Kuncheva, L. I. & Whitaker, C. J., 2003. Measures of diversity in classifier ensembles and their relationship with the ensemble accuracy. *Machine learning*, 51(2), pp. 181-207.

Lee, S. & Pradhan, B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), pp. 33-41.

Mathew, J., Jha, V. & Rawat, G., 2009. Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve method. *Landslides*, 6(1), pp. 17-26.

Milaghardan, A. H., Delavar, M. & Chehregan, A., 2016. Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster--Shafer theory. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), pp. 1-10.

Mitra, D. et al., 2018. Landslide risk assessment in Darjeeling hills using multi-criteria decision support system: a Bayesian network approach. *Disaster Risk Governance in India and Cross Cutting Issues*, pp. 361-386.

Nourani, V., Pradhan, B., Ghaffari, H. & Sharifi, S. S., 2014. Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Natural Hazards*, 71(1), pp. 523-547.

Othman, A. A. & Gloaguen, R., 2013. Automatic extraction and size distribution of landslides in Kurdistan Region, NE Iraq. *Remote Sensing*, 5(5), pp. 2389-2410.

Paudel, U. & Oguchi, T., 2014. *Implementation of random forest in landslide susceptibility study, a case study of the Tokamachi area, Niigata, Japan*. Pcaifico Yokohama, s.n.

Pourghasemi, H. R., Mohammady, M. & Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in

GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, Volume 97, pp. 71-84.

Pradhan, A. & Kim, Y., 2016. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. *Catena*, Volume 140, pp. 125-139.

Pradhan, B. & Lee, S., 2010. Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia. *Landslides*, 7(1), pp. 13-30.

Pradhan, B. et al., 2008. Utilization of optical remote sensing data and geographic information system tools for regional landslide hazard analysis by using binomial logistic regression model. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1), p. 023542.

Remondo, J., Bonachea, J. & Cendrero, A., 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2(4), pp. 321-328.

Ruta, D. & Gabrys, B., 2000. An overview of classifier fusion methods, computing and information system. *University of Paisley*.

Schleier, M. et al., 2014. Robust landslide susceptibility analysis by combination of frequency ratio, heuristic GIS-methods and ground truth evaluation for a mountainous study area with poor data availability in the Three Gorges Reservoir area, PR China. *Environmental earth sciences*, 71(7), pp. 3007-3023.

Sharma, S. & Mahajan, A. K., 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), p. 4.

Werner, E. D. & Friedman, H. P., 2010. Landslides: Causes, types and effects. In: *Landslides: Causes, types and effects*. New York, USA: Nova Science Pub Incorporated, p. 404.

Yilmaz, I., 2009. A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(3), pp. 297-306.

Youssef, A. M. & Pourghasemi, H. R., 2020. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*.

Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S. & Al-Katheeri, M. M., 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13(5), pp. 839-856.

عزت‌الله اصغری‌زاده، عبدالکریم محمدی‌بالانی، ۱۳۹۶. تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه.

اول تدوین تهران (تهران): انتشارات دانشگاه تهران.

فرناز کامران‌زاد، عماد محصل‌افشار، مسعود مجرب، حسین معماریان، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر

زمین‌لغزش در استان تهران با استفاده از روش‌های داده‌محور و تحلیل سلسله‌مراتبی. علوم زمین.

۲۵(۹۷)، p. ۱۰۱ تا ۱۱۴.

Abstract

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. The aim of this study is to integrate information on several final decisions resulting from the zoning of landslide hazard in the Semirom in Isfahan province. For this purpose, eight variables (slope, slope direction, rainfall, lithology, distance to residential areas, distance to river, distance to road and distance to selected faults) were categorized in GIS Software. Using the fuzzy and non-fuzzy hierarchical process, and in consultation with the experts, the layers and substrates were weighted. Also, two different overlay methods including weighted overlay and fuzzy overlay are applied on the results of fuzzy and non -fuzzy AHP methods. Then, four zoning maps were merged into the decision-making methods by the weighting method. Comparison and verification of the results showed that the zoning methods provide satisfactory results, but eventually the results were improved with the integration of information. To validate the research, the results were compared with historical land surveys. Based on the results, it was concluded that zoning by 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, zoning, landslide hazard, information integration



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering Department

M.Sc. Thesis in Water and Environmental Engineering

A Method based on Fuzzy-non Fuzzy Analytical Hierarchy Process (AHP) and Decision Fusion System for Landslide Hazard Zonation in Marbar Basin

By:Seyed MohammadReza Sajadi

Supervisor:

Dr. Ahmad Ahmadi, Dr. Behnaz Bigdeli

September 2020