چکیده

مطالعـهٔ علمـی و جامع فرایندهـای دامنـه‌ای، خصوصـاً پدیدهٔ زمین‌لغـزش، در دنیا بـه دلایل متعدد یکـی از جالب‌ترین موضوعات ژئومورفولوژی است. رسیدن به نتایج مطلوب‌تر به لحاظ پیش‌گیری از خسارت در بخش‌های گوناگون عمرانی و اقتصادی، از جمله در پروژه‌های راه‌سـازی، سدسازی، تأسیسات شـهری و روستایی و کشاورزی اهمیـت فراوان دارد. به همین دلیل روش‌های متفاوتی برای بررسـی مناطق مسـتعدِ زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن ابداع شـده اسـت. هدف این پژوهشِ مروری بر روش‌های بررسی این پدیدهٔ طبیعی است که گاه، کم یا بیش، فعالیت‌های انسـانی نیز موجب تشـدید یا تسریع وقوع آن می‌شود. در راستای این هدف پس از مطالعات کتاب‌خانه‌ای و جمع‌آوری منابع، سعی شده است که روش‌های مطالعهٔ زمین‌لغزه‌ها بر مبنای ماهیت به دو بخش روش‌های تجربی و روش‌های آماری تقسیم و چند روش نسبتاً مهم‌تر یا رایج‌تر انتخاب شوند.

کلیدواژه‌ها: فرسایش، حرکات دامنه‌ای، زمین‌لغزش، پهنه‌بندی.

مقدمه

شـکل‌های متفاوت فرسـایش، بـا فرایندها و حـرکات دامنه‌ای از مهم‌ترین عوامل تغییر شکل ناهمواری‌ها به‌شمار می‌روند. به محض تشکیل فراورده‌های هوازدگی و تخریب بر سطح دامنه‌ها، عوامل دما و آب به کمک دخالت نیروی جاذبهٔ فرایندهای فرسایش را موجب می‌شوند. این عوامل بر حسب جنس و نسبت مقاومت سنگ‌ها و در ارتباط با شرایط اقلیمی حاکم بر نواحی مختلـف، فرایندهای دامنه‌ای را به‌صورت لغزش، ریزش، خزش و سولیفلوکسـیون موجب می‌شـوند که چهرهٔ زمین را دائماً تحت‌تأثیر قـرار می‌دهند [محمـودی، ۱۳۸۰: ۲]. زمین‌لغزش، بین انواع حرکات دامنه‌ای، به دلیل وضعیت حساس دامنه‌ها در رابطه با خطرات وقوع این پدیده، همواره مورد توجه محققان و برنامه‌ریزان بوده اسـت. احتمالاً بزرگ‌ترین زمین‌لغزش جهان، زمین‌لغزش «سیمره» بوده که در دامنهٔ شرقی «کبیرکوه» مشـرف به درهٔ سیمره در نزدیکی پلدختر به وقوع پیوسته است [علایی‌طالقانی، ۱۳۸۲: ۱۷۷].

پیشینهٔ مطالعات

سـابقهٔ مطالعات و پژوهش در مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش و حرکات توده‌ای در کشـورهای توسـعه‌یافته به ۵۰ سال پیش برمی‌گـردد [کرم و محمودی، ۱۳۸۴: ۱۴-۱]. به نظر می‌رسـد بتوان تاریخچهٔ مطالعات این موضوع را به دو بخش تقسیم کرد:

۱. مطالعات بدون استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی: این مطالعات بر مبنای امتیازدهی به عوامل مؤثر در ناپایداری و در نهایت به دست آوردن یک نقشه از پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه صورت گرفته‌اند. روش‌های آن‌ها بیشتر تجربی بوده که البته دقت آن‌ها مورد تردید اسـت. در ایـن روش‌های تعداد پارامترهای مورد اسـتفاده متفاوت بوده است. بعضی روش‌ها از پارامترهای بیشتری استفاده کرده‌اند کـه از دقت بالاتـری برخوردار بوده‌اند. از جملهٔ ایـن روش‌ها به نقل از **شریعت‌جعفری** (۱۳۷۵) می‌توان از روش **مینی‌رد** (۱۹۷۷)، **رادبروچ و ونـت ورس**(۱۹۷۱)، **استیسونسـن**(۱۹۷۷)، **بـراب**(۱۹۷۲)، **نیلسن**(۱۹۷۹)، مؤسسهٔ راه ژاپن(۱۹۸۸) و... نام برد.

سعید الفتی، فرشاد صفرپور، مهدی محمودآبادی
دانشجویان دورهٔ کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی دانشگاه یزد

مخاطرات محیطی

زمین لغزش

۲. اســتفاده از سیســتم اطلاعات جغرافیایی: پــس از ورود و تشکیل لایه‌های اطلاعات، عملیات گوناگون رایانه‌ای روی آن‌ها انجام شده است. استفاده از سیســتم‌های رایانه‌ای و نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایــی، به عنوان یک ابــزار و فناوری، می‌تواند در تســریع کارها و افزایش دقت نقشــه‌های تولید شده نقش به‌ســزایی داشته باشد. در این مطالعه روش‌های منتخــب در دو بخش از نظر ماهیت، یعنی روش‌های تجربی و روش‌های آماری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

الف) روش‌های تجربی

روش‌های تجربی زیادی در کشورهای جهان برای مطالعه و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها ابداع شده (از جمله؛ مؤسسه راه ژاپن ۱۹۸۸، نیلسن ۱۹۷۹ و ...) که در این میان، روش آنبالاگان و روش نیلسن انتخاب شده و شرح داده می‌شود.

روش آنبالاگان

روش آنبالاگان روش جدیدی اســت که بر اساس طرح امتیازدهی به عوامل ارزیابی خطر ناپایداری نام‌گذاری شده و به طراحان و مهندسان در انتخاب موقعیت‌های مناسب برای اجرای طرح‌های توسعه در مناطق کوهستانی کمک بزرگ و مؤثری می‌کند. در روش آنبالاگان می‌توان از شــیوهٔ کارتوگرافیک سنتی در تهیهٔ نقشــه‌های عامل روی کاغذ کالک و همپوشانی آن‌ها به منظور تهیهٔ نقشهٔ نهایی براساس امتیازها استفاده کرد.

براساس روش آنبالاگان، برای هرکدام از عوامل دخیل در ناپایداری‌ها، امتیازی در نظر گرفته شــده است. بیشترین امتیاز براساس نوع عامل، بیشترین میزان ناپایداری را در خصوص آن عامل نشان می‌دهد و عدد ۱۰ نشانگر مجموع کل امتیازهای تمام عامل‌هاســت که معادل بیشترین میزان خطر ناپایداری در واحدها محسوب می‌شود.

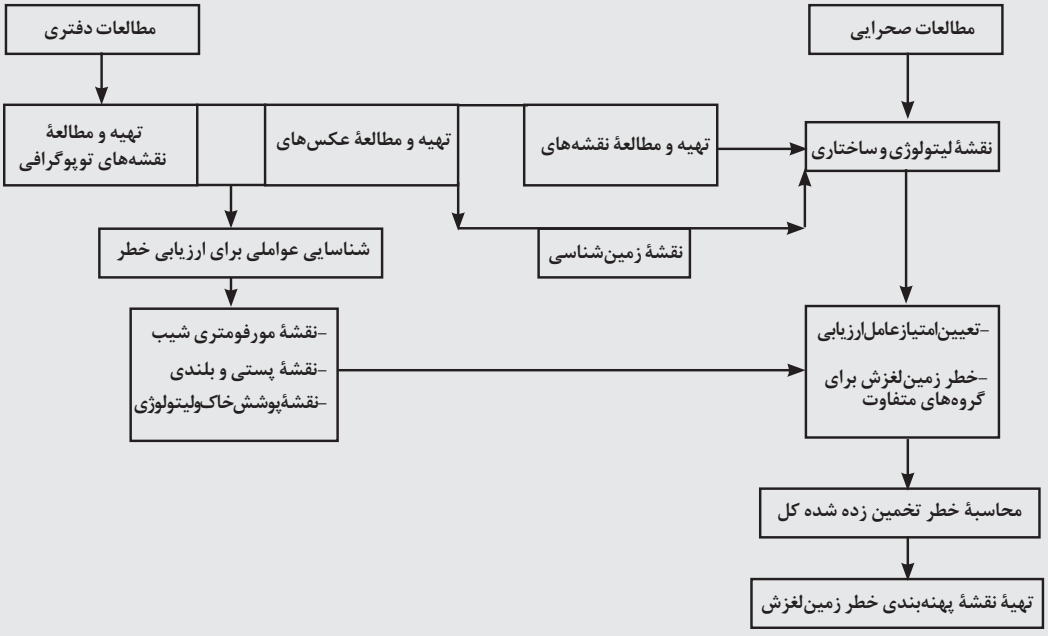
برای تهیهٔ نقشــه، این روش توســط آنبالاگان ارائه شــده اســت (بلادپس، ۱۳۸۴): ۱. انتخاب واحد کاری؛ ۲. تهیهٔ نقشه‌های عامل؛ ۳. وزن‌دهی مناســب به زیر گروه‌های مختلف تعین شده در هر نقشه؛ ۴. جمع‌بندی وزن‌های هر واحد و دادن درجهٔ خطر به آن‌ها؛ ۵. ترســیم نقشــهٔ پهنه‌بندی برای کل منطقه با استفاده از درجات خطر محاسبه شده.

این روش توســط محققان متعددی، از جمله؛ **خضری** و همکارانش (۱۳۸۵)، **بلادپــس** (۱۳۸۴و۱۳۸۳)، **امینــی‌زاده** و **ارومیه‌ای**(۱۳۷۷)، **روســتایی** (۱۳۸۳)، **رضایی‌مقدم** و **شفیعی‌مهر** (۱۳۸۶)، در بررسی زمین لغزش‌ها در نواحی گوناگون مورد بررســی قرار گرفته اســت. برای مثال خضری و همکارانش (۱۳۸۵) در پژوهشــی به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ها در بخش مرکزی حوضهٔ زاب شهرستان سردشت به روش آنبالاگان پرداختند و مراحل زیر را در این تحقیق طی کردند:

۱. تعیین و تحدید منطقهٔ پژوهش بر مبنای نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و مطالعات میدانی؛

۲. مطالعه و بازدید میدانی و برداشــت داده‌های مربوط به ناپایداری دامنه‌ای با GPS و تهیهٔ نقشه ناپایداری‌های کنونی؛

۳. تقســیم‌بندی و تفکیک منطقه با رخساره‌های شیب (با ویژگی‌های مشــابهی از لحاظ زاویهٔ شــیب و جهت شیب) روی نقشــهٔ توپوگرافی بر اساس خصوصیــات تقســیم آب‌ها، کشیدگی یال‌ها و



نمودار ۱. فرایند تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش آنبالاگان

جدول ۱. عوامل ناپایداری دامنه‌ها و امتیازدهی آن‌ها براساس روش آنبالاگان

عوامل مؤثر در ناپایداری	لیتولوژی	ساختار زمین‌شناسی	ارتفاع نسبی	کاربری و پوشش زمین	وضعیت آب‌های زیزمینی	هندسهٔ شیب	جمع کل امتیاز
حداکثر امتیاز	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۱۰

جدول ۲. معیار پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه براساس امتیاز کل بر مبنای روش آنبالاگان

رده‌بندی	۱	۲	۳	٤	٥
جمع امتیاز	کمتر از ۲/۵	۵/۵ – ۳/۵	۵/۱ – ٦	٦/۱ – ۷	بیش از ۷/۵
میزان خطر پهنه	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

سـتیغ‌ها، تالوگ‌ها، رودخانه‌ها و ارتفاعات با تکیه بر عکس‌های هوایی و مطالعات میدانی و یکدسـت کردن رخساره‌های شیب با خصوصیات مشـابه، به منظور تهیهٔ نقشـه واحدهای کاری و فراهم آوردن امکان مطالعهٔ سیستمی، منسجم و منطقی؛

۴. ارزیابی دقیق روابط و نقش عوامل مؤثر در ناپایداری‌ها؛

۵. امتیازدهی به هر واحد بر مبنای نقشـه‌های عامل و جدول‌های امتیاز مورد تأکید در روش آنبالاگان و جمع‌بندی امتیازهای هر واحد برای تعیین وضعیت پایداری و ناپایداری واحدها؛

۶. پهنه‌بندی نهایی منطقه از نظر خطر ناپایداری به پنج دسته (بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیارکم) و تهیه و ترسیم نقشه پهنه‌بندی مربوط بر اساس موارد گفته شده؛

۷. تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری؛

۸. ارزیابی عوامل مؤثر در ناپایداری و امتیاز دهی به آن‌ها.

بر اساس نقشهٔ پهنه‌بندی تهیه شده، درصد سطوح هر کدام از پهنه‌ها به تفکیک در هر کدام از دامنه‌های غربی و شرقی «درهٔ زاب» در منطقهٔ پژوهش، براساس میزان ناپایداری تشریح شد، که بر مبنای آن، ۳۸ درصد منطقه دارای خطر ناپایداری زیاد تا خیلی زیاد و فقط دو درصد از منطقه دارای خطر ناپایداری دامنه‌ای خیلی کم است.

روش نیلسن روشی ساده و کاربردی برای ارزیابی ظرفیت خطر زمین لغزش با استفاده از سه پارامتر شیب، جنس مصالح و لغزش‌های قدیمی ارائه داد

۲. روش نیلسن

نیلسن و همکارانش در سال ۱۹۷۹ برای ارزیابی سریع پایداری شیب-ها در منطقهٔ خلیج سانفرانسیسکو با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، شـیب و عکس هوایی اقدام به تهیهٔ نقشه ارزیابی خطر پایداری شیب با مقیاس ۱:۱۲۵۰۰۰ کردند [شـریفی و دریابـاری، ۱۳۸۵]. روش کار او و همکارانش به این شرح است:

۱. تهیهٔ نقشهٔ جامع در گستره‌های شیب؛ ۲. تهیهٔ نقشهٔ نهشته‌های زمین‌لغزشی؛ ۳. تهیهٔ نقشهٔ واحدهای زمین‌شناسی حساس به گسیختگی؛ ۴. انطباق سه نقشهٔ مذکور و تهیهٔ نقشه‌های پایداری نسبی شیب‌ها که به شش رده تقسیم شد.

روش نیلسن روشی ساده و کاربردی برای ارزیابی ظرفیت خطر زمین لغزش با اسـتفاده از سه پارامتر شیب جنس مصالح و لغزش‌های قدیمی ارائه داد. این روش شیوهای مفید در ارزیابی اولیه پایداری شیب‌ها است، لیکن ایراداتی چند بر آن وارد است:

- در روش نیلسـن تمامی ته‌نشست‌های لغزشی منطقه با خطر بالا محسوب شـده‌اند، درحالی‌که در زلزلهٔ منجیل فقط در چند مورد زمین لغزش حادث شده، همان یا بخشی از زمین‌لغزش‌های قدیمی بوده‌اند.
- رده‌های شیبی پیشنهادی نیلسن متناسب با منطقهٔ مورد مطالعهٔ خود اوست که از توپوگرافی پستی برخوردار بوده است، اما در مناطقی با ناهمواری بیشتر، لازم است که رده‌های شیبی مناسب‌تری انتخاب شوند.
- تقسـیم مصالح به سـه ردهٔ لغزش، مسـتعد لغزش و نهشته‌های سطحی زمین‌لغزش، یک تقسیم‌بندی خیلی کلی است.

بنابراین اصلاح آن بدین‌گونه صورت گرفت:

- ردهٔ شیبی از سه گروه به چهار گروه رسید.
- زمین‌لغزه‌های قدیمی بر اساس مقدار به دو رده و زمین‌لغزه‌های با شیب کمتر از ۳۰ درجه، در گروه خطر بالا طبقه‌بندی شدند.
- در این رده‌بندی، دامنه‌های با شیب بیش از ۳۰ درجه، صرف‌نظر از جنس سنگ مستعد وقوع سقوط سنگی ویا خاکی در نظر گرفته شده‌اند.
- پنج رده تقسیم‌بندی نیلسن در این سیستم به هفت رده افزایش یافت [شریفی و دریاباری، ۱۳۸۵].

ب) روش‌های آماری

۱. روش اسکالوگرام

از ایـن روش، به منظـور اولویت‌بندی عوامل از نظر میزان تأثیر و مکان‌های لغزشـی، و از نظر فراوانی تعداد رخداد، اسـتفاده می‌شود. در روش اسکالوگرام، به متغیرهای مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها امتیاز مناسب داده می‌شـود؛ به نحوی کـه هر اندازه نقش متغیری در ایجـاد لغزش زیادتر باشد، امتیازی بیشتری به آن تعلق می‌گیرد و برعکس. میانگین امتیازات داده شده در هر ستون محاسبه و به عنوان ضرایب لغزش پارامترها ثبت می‌شـود. آن‌گاه، انحراف معیار و نصف مقدار آن محاسبه و در هر ستون گنجانده می‌شـود. سپس نصف انحراف معیار یک بار با میانگین جمع و بار دیگر از میانگین تفریق می‌شود که نتایج این عملیات در یک دیف از جدولی که از قبل تنظیم شـده، ثبت می‌شود و ملاک اصلی برای تعیین دامنـهٔ تغییرات پارامترها قرار می‌گیرد. دامنهٔ تغییرات پارامترها در سـه طبقه تقسیم‌بندی می‌شـود (مثبت، منفی و خنثا). در مرحلهٔ بعد، برای تعیین اولویت نواحی و پارامترها، نشـانه‌های ردیف‌ها و ستون‌ها چند بار جابه‌جا می‌شـوند تا حالت قرارگیری علامت‌ها مناسب‌ترین شکل را پیدا کند (وضعیت مناسـب هنگامی است که بیشـترین علامت‌ها در اطراف محور یا قطر ماتریسی جدول تجمع یابند که در این صورت جدول نهایی، اولویت پارامترها و نواحی را مشخص می‌کند).

$$X_i > \bar{X} + \frac{SD}{2}$$: طبقهٔ مثبت $$X_i < \bar{X} - \frac{SD}{2}$$: طبقهٔ منفی

$$\bar{X} + \frac{SD}{2} < X_i < \bar{X} - \frac{SD}{2}$$: طبقهٔ خنثا

کـه در آن‌هـا داریم: X_i : پارامتر، SD: انحـراف معیار و $\bar{X}$ میانگین امتیاز هر ستون.

سرور (۱۳۸۳)، برای ارزیابی فرایند لغزش در باغ‌های چای نواحی کوهستانی شرق گیلان، به تهیه و هم‌مقیاس کردن نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسـی ۱:۲۵۰۰۰۰، کاربـری اراضـی ۱:۱۰۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ مربوط به محدودهٔ مورد مطالعه پرداخت. با انطباق نقشه‌ها، برخی داده‌های اولیه را استخراج و نقشه‌های پایه (نقشه-های توپوگرافی، شیب، شبکهٔ زهکشی، زمین‌شناسی، روستاها و باغ‌های چای و ...) را ترسیم کرد و برای سهولت در کارش، ناحیهٔ شرق گیلان را به چهار ناحیه تقسیم و آمار ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتر مورد نیاز را جمع‌آوری کرد. پس از جمع‌آوری داده‌ها و تقسیم‌بندی عناصر سیستم، با استفاده از روش‌های آماری به بررسی و تحلیل اطلاعات موجود پرداخت و عوامل و عناصری را که به نحوی در ایجاد پدیدهٔ زمین‌لغزش مؤثر بودند، تعیین کرد. پس از آن به منظور اولویت‌بندی عوامل از نظر میزان تأثیر و مکان‌های لغزشی و از نظر فراوانی تعداد رخداد، از روش‌های اسکالوگرام بهره گرفت؛ به نحوی‌که هر اندازه نقش متغیری در ایجاد لغزش زیادتر بود،

در روش آماری دو متغیره، وقوع زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و هریک از عوامل محیطی مؤثر در این پدیده به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شوند

امتیازی بیشتری به آن تعلق گرفت و برعکس. او در نهایت با بهره‌گیری از این روش توانست مهمترین مکان‌های لغزشی در باغ‌های چای و تمام نواحی شرق گیلان را نشان دهد.

۲. روش رگرسیونی

تاکنون مطالعات فراوانی در ایران به‌منظور بررسی و مطالعهٔ زمین‌لغزش‌ها مانند پهنه‌بندی خطرات زمین لغزش‌ها و مطالعات دیگر مربوط به این پدیده، با استفاده از روش‌های گوناگون رگرسیونی(اعم از چند متغیره، دو متغیره، خطی، لاجستیک و...) صورت گرفته‌اند که می‌توان به کارهای **ماتئو** و **راوت** (۲۰۰۹)، **لی** و همکارانش (۲۰۰۷) **بیاتی‌خطیبی** (۱۳۸۵ و ۱۳۸۶)، **جوکارسرهنگی** (۱۳۸۶)، **شیرانی** و همکارانش (۱۳۸۵)، **جباری** و **میرنظری** (۱۳۸۶)، **محمودی** و **کرم** (۱۳۸۴)، **مقیمی** (۱۳۸۴)، **مهدوی‌فر** و همکارانش (۱۳۸۰) و **ملکی** و **قربان‌پور** (۱۳۸۷) اشاره داشت. در ادامه کوشیده‌ایم مختصر شرحی در مورد بعضی از این روش‌ها بدهیم:

روش آماری رگرسیون دو متغیره: در روش آماری دو متغیره، وقوع زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و هریک از عوامل محیطی مؤثر در این پدیده به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شوند. اهمیت هر عامل در ارتباط با ناپایداری دامنه‌ها مستقل از دیگر عوامل، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و از فراوانی داده‌ها (مثل سطح لغزش یافته و یا تعداد زمین لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه) برای محاسبهٔ احتمال وقوع استفاده می‌شود.

مثلاً **شیرانی** و همکارانش (۱۳۸۵)، در بررسی و ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، از هشت عامل از جمله لیتولوژی، فاصله از گسل، حداکثر شتاب افقی زلزله و... استفاده کردند و برای این کار در محیط Ilwis ابتدا با قطع هر نقشهٔ عامل با نقشهٔ زمین‌لغزش‌ها، تراکم سطحی زمین‌لغزش در هر ردهٔ متغیر را محاسبه کردند. سپس با محاسبهٔ ارزش اطلاعات برای هر ردهٔ متغیر، به ثبت مقدار ارزش اطلاعات برای هر عامل اقدام کردند و درنهایت با جمع جبری نقشه‌های ارزش اطلاعات عوامل و طبقه‌بندی نقشهٔ به دست آمده از مراحل قبل، نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را آماده ساختند.

مدل آماری رگرسیون چند متغیره: در تحلیل چند متغیره، متغیرهای مورد استفاده در بررسی زمین‌لغزش در برخی مواقع کمّی (شیب، بارندگی و...) و در مواردی نیز کیفی(جهت شیب، پوشش گیاهی و...) هستند. از آن‌جا که در روش‌های آماری از داده‌های کمی استفاده می‌کنند، لذا لازم است داده‌های کیفی به کمی تبدیل شوند.

مدل آماری تحلیل ممیزی: این روش چند متغیره آماری، با استفاده از توابعی بر حسب مقادیر متغیرهای مستقل، امتیازی را برای عضویت در هر گروه محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر، با استفاده از معادلهٔ خطی که بهترین تفکیک را بین دو گروه واحد زمینی ناپایدار (کد یک) و واحد زمینی پایدار (کد صفر) به وجود می‌آورد، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش می‌پردازد.

مدل رگرسیون لاجستیک: در مدل رگرسیون لاجستیک، متغیر وابسته که وقوع یا عدم وقوع حرکت توده‌ای است، به صورت دو حالت صفر(عدم وقوع) و یک (وقوع) بیان می‌شود. در این مدل، احتمال وقوع حرکت دامنه‌ای و زمین‌لغزش در هر سلول یا شبکهٔ نقشه‌ای نشان داده می‌شود که مقادیر آن به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل براورد می‌گردد. چنان‌چه X معرف برداری از داده‌های طیفی و محیطی یک سلول یا شبکهٔ نقشه‌ای باشد، مدل هم‌بستگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y(X)=f(X_1, X_2, . Xn)$$

که در آن X_n ($i=1, 2, ... n$) معرف ویژگی‌های طیفی و محیطی مربوط به هر سلول یا شبکهٔ نقشه‌ای است. پس از محاسبهٔ $Y(X)$ برای هر یک از شبکه‌های نقش‌ای، مقادیر مربوط به احتمال وقوع حرکت توده‌ای و زمین لغزش در دامنه‌ای از صفر (عدم وقوع) تا یک (وقوع) برای هر شبکهٔ نقشه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P(i|x)=EXP(B_1+B_2X_i+...B_nX_i)/1+EXP(B_1+B_2X_i...B_nX_i)$$

که در آن، B ضریب متغیر و X متغیر مستقل است. در این مدل مقادیر تخمین به صورت منحنی لاجستیک (منحنی Sشکل) است.

مدل رگرسیون خطی: با در دست داشتن مقادیر X_i معین (متغیر مستقل) مقدار Y_i یا متغیر وابسته را می‌توان به صورت خطی براورد کرد. مدل کلی تابع رگرسیون به صورت معادلهٔ زیر است:

$$Y_i=B_1+B_2X_i+...+B_jX_i$$

که در آن، Y_i: خمین متغیر وابسته، B_1: ضریب ثابت یا عرض از مبدأ، B_2: ضریب متغیر X_i، و X_i: متغیر مستقل است.

۳. روش تحلیل سلسله مراتبی یا قضاوت کارشناسی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی یکی از روش‌های رایج در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و هم‌چنین، یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. در این روش، افزون بر امکان فرموله کردن مسئله به صورت سلسله‌مراتبی، امکان در نظر گرفتن

انواع معیارهای کمی وکیفی دربارهٔ موضوع یا مسئلهٔ مورد نظر نیز وجود دارد. مزیت اصلی AHP آن اســت که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا یک مسئلهٔ پیچیده را به صورت ساختار سلسله‌مراتبی بشکنند و سپس به حل آن بپردازند. وزن معیار تصمیم‌گیری و گزینه‌های متفاوت با توجه به مقایسهٔ تنها دو عنصر در هر مرحله به دست می‌آید. برای بیان میــزان ترجیح دادن یک عنصر بر عنصر دیگر، از عبارات غربالی، مقیاس عددی یا نمودارهای ستونی استفاده می‌شود که به سهولت به محاسبات کمک می‌کنند. هم‌چنین، ماهیت تحلیل AHP منطق شفاف و واضحی بــرای انتخاب گزینه‌های مختلف بــه وجود مــی‌آورد. در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، عناصر هر سطح نسبت به عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایســه و وزن آن‌ها محاسبه می‌شود. این وزن‌ها را «وزن نسبی» می‌نامند. سپس با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌شود که آن را «وزن مطلق» می‌نامیم. همهٔ مقایسه‌ها به صورت زوجی انجام می‌گیرند. در این مقایســه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند کرد و به گونه‌ای که اگر عنصر a با b مقایســه شود، تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت a بر b یکی از حالاتِ به شرح جدول ۴ است.

جدول ۳. مقیاس مقایسهٔ دو به دو در مدل سلسله‌مراتبی

ترجیحات (قضاوت شفاهی)	مقدار عددی
کاملاً مرجح یا مطلوب‌ترین	۹
ترجیح یا مطلوب خیلی قوی	۷
ترجیح یا مطلوب قوی	۵
کمی مرجح یا کمی مطلوب‌تر	۳
ترجیح یا مطلوبیت کمتر یا کمی مهمتر	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۸، ٦، ٤، ۲

منبع: شیرانی و همکاران، ۱۳۸۵.

این روش مبتنی بر تجزیهٔ مسائل پیچیده به سلسله‌مراتب است که در رأس آن‌ها هدف کلی قرار دارد. AHP روش ســادهٔ مناسبی برای عملیات اصلی روی ماتریس‌هاســت. با ایجاد سلســله مراتب مناســب و پردازش گام‌به‌گام، و ســاخت ماتریس‌های مقایسه‌ای در سطوح متفاوت سلســله مراتب، AHP مقادیر ویژهٔ آن را محاســبه می‌کند، و با ترکیب مقادیــر ویژه، ضرایب وزنی گزینه‌های متفاوت را به‌دســت می‌آورد. این روش نیز توســط محققان و معمولاً همراه با روش‌های دیگر پهنه‌بندی مورد اســتفاده قرار می‌گیــرد. ازجمله **شــادفر** و همکارانش (۱۳۸۶)، **جبــاری** و **میرنظری** (۱۳۸۶)، **ملکی** و **قربان‌پور** (۱۳۸۷)، **علیجانی** و همکارانش (۱۳۸۶)، و **احمدی** و همکارانش (۱۳۸۳) از آن اســتفاده کرده‌اند.

مثلاً شــادفر و همکارانش (۱۳۸۶) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ آبریز چالکرود تنکابن، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، ایــن مراحل را لحــاظ کردند: آن‌ها در انجام ایــن پژوهش از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰/۰۰۰ و ۱:۴۰/۰۰۰ به ترتیب مربوط به ســال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۸۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM^+ سال ۲۰۰۲ مرکز سنجش از دور، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰/۰۰۰ و ۱:۵۰/۰۰۰ سازمان جغرافیایی ارتش، و مجموعهٔ منابع اطلاعات علمی در زمینهٔ آب و هوا، ژئومورفولوژی، زمین‌شناســی، و یافته‌هــای مطالعاتی و پژوهشــی در ارتباط با موضوع پژوهش اســتفاده کردند. برای پهنه‌بندی نیز با اســتفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، عناصر هر سطح را با عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه و وزن آن‌ها را محاسبه کردند. این وزن‌ها را وزن نسبی نامیدند و با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه را مشخص کردند که وزن مطلق نام گرفت.

یکــی از مزایای روش تحلیل سلســله‌مراتبی این اســت که در آن، عوامــل مؤثــر در بروز پدیدهٔ زمین‌لغزش، از طریق مقایســهٔ جفتی بین عوامل وزن داده شــده و میزان تأثیرگــذاری هریک از عوامل در رخداد زمین‌لغزش، اولویت‌بندی می‌شــوند؛ به‌طوری‌که از این طریق، می‌توان به نتایج مطمئن‌تری دســت یافــت. افزون بر ایــن، از آن‌جا که در این روش به دلیل اهمیت و شیوه‌های محاسباتی لحاظ شده در آن می‌توان عوامل زیادتری را در رخداد پدیده‌های ژئومورفولوژی، زمین‌شناســی و مانند آن دخالت داد، از این‌رو این روش می‌تواند روش جامع‌تر و کامل‌تری در مقایسه با سایر روش‌های متداول به ویــژه در رابطه با پهنه‌بندی خطــر زمین‌لغزش باشد.

یکی از مزایای روش تحلیل سلسله‌مراتبی این است که در آن، عوامل مؤثر در بروز پدیدهٔ زمین‌لغزش، از طریق مقایسهٔ جفتی بین عوامل وزن داده شده و میزان تأثیر گذاری هریک از عوامل در رخداد زمین‌لغزش، اولویت‌بندی می‌شوند

۴. عملگرهــای منطق فازی

این روش طبق سلیقه می‌تواند هم در میان روش‌های هوش مصنوعی و هم در میان روش‌های آماری مورد بررسی قرار گیرد که در این‌جا در میان روش‌های آماری مطرح شده است.

منطق فازی به زبان ساده

فازی[1] به معنای غیر قطعی، ســیّال، ناواضح و مبهم اســت. اگر یک مجموعه قطعی نباشد، دارای درجه‌ای از فازی بودن است که در آن مرزها به صورت مبهم ترسیم می‌شوند. هرچه مرزها مبهم‌تر باشند، آن مجموعه

فازی‌تر به حساب می‌آید. برای مثال، وقتی می‌گوییم هوای اتاق سرد است یا گرم است، با یک قطعیت گفته‌ایم که هوا سرد یا گرم است، اما منطق فازی می‌گوید چه درجه‌ای از سرد یا گرم بودن و می‌بینیم که قطعیتی در این قضاوت وجود ندارد.

گذری بر تاریخچهٔ منطق فازی

تئـوری مجموعه‌هـای فـازی و منطق فـازی را اولین‌بار پرفسـور **لطفی‌زاده** (لطفعلی عسکرزاده) در رساله‌ای به نام «مجموعه‌های فازی: اطلاعات و کنترل» در سال ۱۹۶۵ معرفی کرد. هدف اولیهٔ او در آن زمان، توسعهٔ مدلی کارامدتر برای توصیف فرایند پردازش زبان‌های طبیعی بود. او مفاهیم و اصطلاحاتـی هم‌چون مجموعه‌های فازی، رویدادهای فازی، اعداد فازی و فازی‌سازی را وارد علوم ریاضیات و مهندسی کرد.

در هر مجموعهٔ فازی مانند A، وابسـتگی یک عضو (X) از مجموعهٔ مرجع آن، از طریق عضویت آن، به صورت یک رابطه تعریف می‌شود.

اشتراک فازی

با توجـه به این‌که در عملگر اشـتراک فازی، اشـتراک بین عوامل در مدل وارد می‌شـود، ابتدا عامل‌های مؤثر با اسـتفاده از روند تغییرات هیستوگرام منحنی، طبقه‌بندی، و طبقات عوامل بر مبنای درصد لغزش رخ داده در هر طبقه، بین صفر و یک وزن‌دهی می‌شـوند. در مرحلهٔ بعد، نقشه‌های وزنی هر عامل را می‌سازند و از اشتراک آن‌ها، نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حاصل می‌آید. درنهایت از تلفیق نقشهٔ حاصل آمده با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها، درصد و مساحت طبقات نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش اشتراک فازی به دست می‌آید.

ضرب جبری فازی

در ضرب جبری فازی، تمامی عوامل وزنی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در هم ضرب می‌شـوند و چون تمام وزن‌های داده شـده به کلاسـه‌های متفاوت، عوامل مؤثر بین اعداد صفر و یک هستند، در نقشهٔ حاصله اعداد کوچک می‌شوند و به سمت صفر میل می‌کنند.

جمع جبری فازی

در جمع جبری فازی متمم مجموعه‌ها محاسـبه می‌شود. به‌همین دلیل در نقشهٔ خروجی، بر خلاف ضرب جبری فازی ارزش ضرب جبری فازی، ارزش پیکسـل‌ها به سـمت یک میل می‌کنـد. در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در طبقه دارای خطر قرار می‌گیرد. پس از تلفیق نقشه‌های طبقه‌بندی شده، براساس روابط حاکم بر عملگر جبر فازی با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها، درصد و مساحت طبقات متفاوت نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش به دست می‌آید.

فازی گاما

به‌منظور تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر فازی ضرب و حساسیت خیلی کم فازی جمع، عملگر دیگری به نام «فازی گاما» معرفی شده است که به صورت حدفاصل بین این دو عملگر عمل می‌کند. در ضمن، محدودهٔ تغییرات بین صفر و یک است. هم‌چنین، نمایهٔ دیگری به نام نمایهٔ «جمع کیفی» (QS) نیز در این عملگرها وجود دارد که شامل یک‌سلسله روابط ریاضی می‌شود. برای اطلاع از جزئیات بیشترِ نمایه‌های فوق به اصل مقالهٔ «**عبادی‌نژاد** و همکاران، ۱۳۸۶» مراجعه فرمایید.

عبادی‌نـژاد و همکارانش (۱۳۸۶)، در پژوهشـی بـه ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین‌لغزش در حوضهٔ آبخیز شیرود پرداختند. وی و همکارانش نقشه‌های توپوگرافی تنکابن، سیره‌سـر و لاکتراشان با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشهٔ زمین‌شناسی قزوین‌ـ رشت با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی با مقیاس‌های ۱:۲۰۰۰۰ سـال ۱۳۷۳ و ۱:۴۰۰۰۰ سال ۱۳۸۰، تصاویر ماهواره‌ای +ETM سال ۲۰۰۲ و دسـتگاه GPS را مورد اسـتفاده قرار دادند و از روش‌های فوق در این بررسـی اسـتفاده کردند. در نهایت آن‌ها نتیجه گرفتند کـه هر کدام از عملگرهای فازی به نحوی دارای نقص‌اند و دقت مناسب وکافی را ندارند. با توجه به اختلاف فاحش بین نتیجهٔ جمع جبری فازی و ضرب فازی، برای رسیدن به نتیجهٔ مناسب‌تر، از فازی گاما که حدفاصل این دو عملگر است، استفاده کردند. این مدل (فازی گاما)، مناسب‌ترین روش برای دست‌یابی به هدف این تحقیق تشخیص داده شد.

نتیجه

پس از بررسـی تحقیقات صورت گرفته در مورد پدیدهٔ زمین‌لغزش و روش‌های مطالعهٔ آن، چند روش انتخاب و از نظر ماهیت به دو دسـته تقسیم شدند:

۱. روش‌های تجربی: بعضی از این روش‌ها چون روش‌های نیلسـن و آنبـالاگان، مبتنی بر امتیازدهی به عوامل مؤثر در وقوع این پدیده و در نهایت تهیهٔ نقشهٔ خطر منطقه است.

۲. روش‌های آماری: روش اسکالوگرام بر اساس متغیرهای مؤثر بر زمین‌لغزش، روش‌های رگرسیونی، روش‌هایی کاملاً آماری، و روش تحلیل سلسله‌مراتبی بر پایهٔ عملیات ریاضی (ماتریس‌ها) می‌توانند صورت گیرند و روش منطق فازی بر پایهٔ اسـتدلالات ریاضی استوار است. این روش‌ها برای مناطقی با شرایط طبیعی خاص تعریف شده‌اند و با توجه به هدف، مقیاس، محتوا، تجارب محقق و تکنیک و فناوری مورد استفاده، از دقت و صحت متفاوتی برخوردارند. استفاده از این روش‌ها برای مناطق مشابه (از مجموعه عوامل طبیعی حاکم بر منطقه مثل شـرایط اقلیمی و زمین شناسی) مستلزم تطبیق شرایط و یا تصحیح روش‌ها در صورت لزوم است.

قدردانی: با تشکر از آقای دکتر **داریوش مهرشاهی**، استادیار گروه جغرافیای دانشگاه یزد، آقای دکتر **علی طالبی**، استادیار گروه منابع طبیعی دانشـگاه یزد و آقای دکتر **ایرج جباری**، دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه رازی به دلیل راهنمایی‌های بی‌دریغ و در اختیار گذاشتن برخی منابع.

پی‌نوشت

1. fuzzy