

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تراکم سطح، شاخص هم‌پوشانی و ارزش اطلاعاتی

هادی عطاپور*؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

رضا احمدی؛ دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ: دریافت ۹۲/۱۲/۶ پذیرش ۹۳/۴/۱۶

چکیده

در پژوهش حاضر پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه سد لتیان با استفاده از چهار روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، تراکم سطح، شاخص هم‌پوشانی و ارزش اطلاعاتی انجام شده است. براساس مطالعات، نه پارامتر لیتولوژی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شیب و جهت شیب، ارتفاع، زاویه اصطکاک مواد تشکیل دهنده و کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای احتمالی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه، تشخیص داده شدند. با انطباق لایه‌های اطلاعاتی این عوامل بر نقشه زمین لغزش‌های قدیمی منطقه بررسی شده در محیط GIS، اثر هر یک از این عوامل در رخداد زمین لغزش‌ها ارزیابی شد و در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از هفت پارامتر مؤثر، تهیه شدند. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که نواحی با پتانسیل خطر بسیار زیاد برای زمین لغزش، عمدتاً در سه ناحیه شرق، مرکز و غرب مرز پایینی محدوده بررسی واقع شده‌اند. نکته قابل توجه آن است که از این سه ناحیه، دو ناحیه مرکزی و غربی در مرز مخزن سد لتیان قرار دارند. عمل‌کرد چهار روش پهنه‌بندی، با استفاده از شاخص‌های موجود ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی کارایی نسبی بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه بررسی شده دارند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، سد لتیان، روش تحلیل سلسله مراتبی، تراکم سطح، ارزش اطلاعاتی، شاخص هم‌پوشانی.

* نویسنده مسئول atapour@ut.ac.ir

مقدمه

تا به امروز روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ارائه شده است. به‌طور کلی تمام روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را می‌توان در سه رهیافت کلی در نظر گرفت: رهیافت کمی، رهیافت کیفی و هوش مصنوعی^۱. رهیافت کیفی بر پایه قضاوت‌های متخصص و یا گروهی از متخصصان قرار دارد در حالی که رهیافت کمی بر پایه ریاضیاتی و به‌دور از قضاوت‌های متخصصان است.

در روش‌های کیفی، برای تخمین خطر از ارزیابی‌های متخصص استفاده می‌شود. در ساده‌ترین شکل متخصصان روش‌های کیفی، پهنه‌بندی خطر به‌شکل مستقیم در صحرای انجام می‌دهند. این روش طی دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ به شکل گسترده‌ای استفاده شده است. در یکی دیگر از روش‌های آنالیز کیفی، متخصصان عوامل کنترل‌کننده زمین‌لغزش را در نظر می‌گیرند. این عوامل با توجه به پژوهش‌ها و تجربه‌های متخصص، اولویت‌بندی، امتیازدهی و وزن‌دار می‌شوند. در این صورت سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند برای هم‌پوشانی نقشه‌های وزن‌دار استفاده شود. در روش اخیر برای تبدیل ارزیابی‌ها و قضاوت‌ها به وزن‌ها، ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) می‌توانند استفاده شوند. در تصمیم‌گیری چندمعیاره گزینه‌ها بر پایه چندین شاخص، رتبه‌بندی می‌شوند. روش‌های مختلفی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره وجود دارد که از معروف‌ترین آن‌ها روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۲ است.

درباره پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کشور، تحقیقات پراکنده‌ای صورت گرفته است که از جمله می‌توان به فتاحی و همکاران [۱]، فیض‌نیا و همکاران [۲]، سفیدگری [۳]، سیارپور [۴]، فاطمی عقدا و همکاران [۵]، شادفر و همکاران [۶]، و شیرانی و همکاران [۷] اشاره کرد. براساس نتایج بررسی‌های احمدی [۸] و شادفر [۹]، روش AHP روش مناسب و کارآمدی در اکثر شرایط آب و هوایی شناخته شده است.

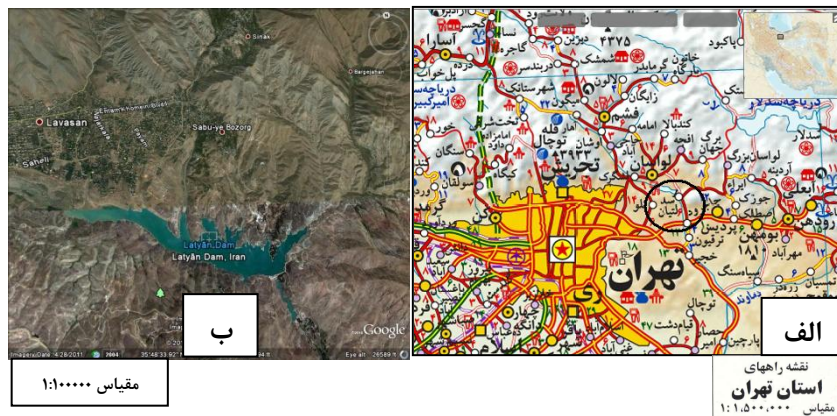
مشکلات پایداری دامنه‌ای در محل سد لتیان و محدوده دریاچه، از زمان احداث سد و حتی قبل از آن وجود داشته که برخی از این ناپایداری‌ها را در چهارچوب طرح کنترل پایداری

1. Artificial Intelligence 2. Analytic Hierarchy Process

سدها شرکت مهندسی مه‌باب قدس بررسی کرده است. از جمله این موارد می‌توان به بررسی و علاج بخشی نشست جاده لتیان-کلان و پایدارسازی تکیه‌گاه راست سد لتیان اشاره کرد [۱۰]. از جمله پژوهش‌های دیگر صورت گرفته طرح پهنه‌بندی خطر لغزش‌های حاصل از زلزله در شمال تهران [۱۱]، ارزیابی کارآیی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز سد لتیان [۱] و گزارش مقدماتی رانش زمین دریاچه سد لتیان به‌وسیله پایگاه ملی داده‌های علوم‌زمین کشور است [۱۲]. علیرغم اهمیت موضوع، تاکنون هیچ‌گونه بررسی جامع و کاملی در زمینه بررسی پتانسیل زمین‌لغزش و آنالیز ریسک در محدوده دریاچه سد لتیان صورت نگرفته است. پهنه‌بندی خطر لغزش و شناسایی زون‌های با خطر زیاد زمین‌لغزش نقش مهمی در مدیریت اراضی حاشیه مخزن و بهره‌برداری از سد دارد. بنا بر این تأمین آب مورد نیاز مصارف کشاورزی و بخشی از آب شرب تهران و نیز تولید برق از یک طرف و وقوع زمین‌لغزش‌هایی در این منطقه از جمله زمین‌لغزش اسفند ماه ۱۳۸۴، از طرف دیگر بررسی‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان را در راستای اهداف و در دستور کار ضرب‌العجل شرکت آب منطقه تهران قرار داده است [۱۳]. مساحت محدوده بررسی شده در حدود ۲۲/۳۶ کیلومتر مربع است که با توجه به نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های تهیه شده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵ مورد لغزش با مساحت بیش از ۲/۶۶ کیلومتر مربع در محدوده بررسی شده رخ داده است که این تعداد لغزش در حدود ۱۱/۹ درصد منطقه بررسی شده را پوشش می‌دهد. قابل ذکر است که این مقدار عدد چشم‌گیری است.

موقعیت جغرافیایی و مشخصات عمومی سد لتیان

سد لتیان در حدود ۳۶ کیلومتری شمال شرق تهران واقع شده است. برای دسترسی به محدوده سد باید ابتدا در مسیر جاده آسفالت تهران-جاجرود حرکت کرده پس از طی مسافتی در حدود ۳۰ کیلومتر، به سمت چپ منحرف شده و جاده فرعی آسفالت به سمت محدوده سد لتیان به مسافت ۶ کیلومتر را طی کرد. موقعیت جغرافیایی، راه‌های دسترسی و تصویر ماهواره‌ای محدوده بررسی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی، ب) تصویر ماهواره‌ای منطقه بررسی شده [۱۴]

سد لتیان روی رودخانه‌های جاجرود و لوارک واقع شده است. حوضه آبریز رودخانه جاجرود در محدوده سد لتیان حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد و متوسط رواناب حدود ۳۵۰ متر مکعب بر ثانیه است. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های این سد خلاصه شده است [۱۰].

جدول ۱. مشخصات سد لتیان [۱۰]

نوع سد	طول تاج	ارتفاع از پی	ارتفاع از بستر رودخانه	حداکثر تراز شمال	عرض پی	عرض تاج	ظرفیت نیروگاه
بتنی پایه‌دار	۴۵۰ متر	۱۰۷ متر	۸۰ متر	۱۶۱۰ متر	۹۹ متر	۹ متر	۴۵ مگاوات

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

براساس تحقیقات پایه و شناسایی عوامل اولیه مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، اطلاعات لازم برای ادامه تحقیقات از طریق نقشه‌های پایه‌ای موجود از جمله نقشه ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه شرق تهران- سری ۶۳۶۱، نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ شامل توپوگرافی، آبراه‌ها، پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌ها و هم‌چنین نقشه ۱:۲۵۰۰۰ عوارض نوزمین ساخت ارائه شده به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه‌های

۱:۲۰۰۰ شامل اطلاعات توپوگرافی، کاربری اراضی، جاده‌ها، آبراهه‌ها و مناطق مسکونی (تهیه شده به وسیله سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح) و سایر نقشه‌های موجود تهیه شد. هم‌چنین برای بررسی‌های بیش‌تر و تدقیق داده‌های موجود، عکس‌های هوایی با دو مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ و ۱/۴۰۰۰۰، برای سال‌های ۱۳۵۰ و ۱۳۸۱ از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد.

تهیه و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS

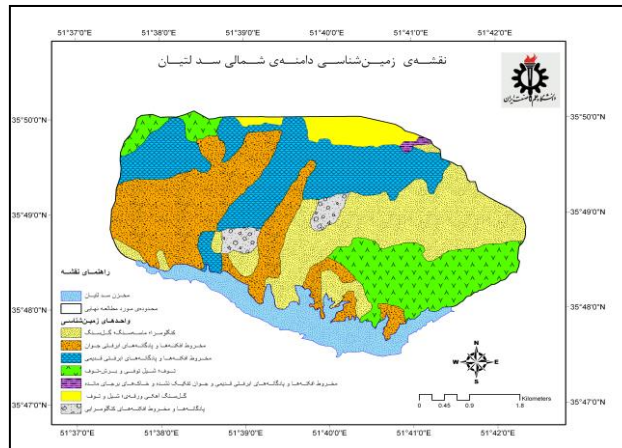
با توجه به شرایط جغرافیایی، زمین‌شناسی و ژئومکانیکی منطقه بررسی شده، براساس بررسی منابع و مشاهدات به دست آمده از بازدید میدانی به عمل آمده و بررسی‌های صحرائی، نه پارامتر لیتولوژی، گسل، آبراهه‌ها، جاده‌ها، کاربری اراضی، شیب دامنه‌ها، جهت شیب، ارتفاع و زاویه اصطکاک از جمله مهم‌ترین عوامل اولیه مؤثر در زمین‌لغزش منطقه، شناسایی شدند. سپس از طریق تدقیق داده‌ها و نقشه‌های پایه‌ای جمع‌آوری شده با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های میدانی، در محیط GIS، لایه‌های اطلاعاتی عوامل فوق به صورت shape file تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده با نقشه پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌های قدیمی رخ داده در منطقه، قطع داده شدند و نقش هر عامل در وقوع لغزش‌ها در دامنه شمالی مخزن سد لتیان ارزیابی شد. براساس این ارزیابی‌ها در نهایت ۷ عامل لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شیب، جهت شیب و ارتفاع به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر در زمین‌لغزش منطقه بررسی شده تشخیص داده شدند تا در مراحل بعد در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شوند. در ادامه هر یک از این عوامل و نحوه تأثیر آنها در زمین لغزش به‌طور خلاصه تجزیه و تحلیل می‌شوند.

۱. لیتولوژی

پارامتر لیتولوژی (جنس سنگ‌ها) در ایجاد سطوح دارای پتانسیل لغزش، مؤثر است چنان‌که دای^۱ و همکاران [۱۵] اشاره می‌کنند که فرآیند زمین‌لغزش، هم‌بستگی مستقیمی با این پارامتر دارد. بررسی سازندهای زمین‌شناسی محدوده بررسی شده نشان می‌دهد که نهشته‌های کواترنر، سازندهای شمشک، قرمز و الیکا بیش‌ترین سطح لغزیده را دارند و سازندهای لالون، میلا، ولکانیک‌های کرتاسه، فجن و ولکانیک کرج هیچ‌گونه لغزشی ندارند و از پایدارترین سازندهای

1. Dai

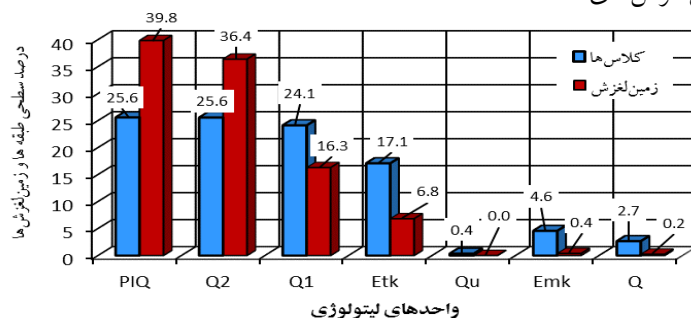
سازندهای حوضه آبخیز به‌شمار می‌روند. از لحاظ سنگ‌شناسی، توف‌ها، شیل‌ها، نهشته‌های آبرفتی و واریزه‌ای، ماسه سنگ، مارن، سیلتستون، ماسه سنگ و آهک مارنی بیش‌ترین سطح لغزیده را دارند و در سنگ‌های آهکی و دولومیتی، ماسه سنگ کوارتزیتی و آندزیت هیچ‌گونه لغزشی رخ نداده است. شکل ۲ لایه اطلاعاتی لیتولوژی منطقه بررسی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. لایه اطلاعاتی نقشه زمین‌شناسی در دامنه شمالی مخزن سد لتیان

چنان‌که در لایه اطلاعاتی لیتولوژی در شکل ۲ مشهود است این لایه شامل ۷ طبقه کنگلومرا، ماسه‌سنگ با میان لایه‌های گلسنگ (PIQ)؛ مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی جوان (Q2)؛ مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (Q1)؛ توف، شیل توفی و توف-برش (Etk)؛ مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جوان تفکیک نشده (Qu)؛ گلسنگ آهکی ورقه‌ای، شیل و توف (Emk)؛ پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های کنگلومرای (Q) است. با قطع دادن نقشه زمین‌لغزش‌ها با این لایه، درصد زمین‌لغزش رخ داده در هر طبقه مشخص شد. نمودار تغییرات مربوط به درصد سطحی زمین‌لغزش رخ داده در هر طبقه از لایه اطلاعاتی لیتولوژی به‌همراه درصد سطحی همان طبقه در شکل ۳ نشان داده شده است. منظور از درصد سطحی زمین‌لغزش، نسبت مساحت زمین‌لغزش در هر طبقه به کل مساحت زمین‌لغزش رخ داده در منطقه است. همچنین منظور از درصد سطحی هر طبقه، نسبت مساحت آن به مساحت کل منطقه بررسی شده است.

چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود بیش از ۷۶ درصد سطحی زمین لغزش‌ها در دو طبقه یعنی طبقه‌های PIQ و Q2 واقع شده است. این در حالی است که این دو طبقه حدود ۵۰ درصد منطقه بررسی شده را تشکیل می‌دهند و این امر حاکی از اهمیت عامل لیتولوژی در رخداد زمین لغزش‌های منطقه است.



شکل ۳. نمودار تغییرات درصد سطحی طبقه‌های مختلف لایه لیتولوژی به همراه درصد سطحی زمین لغزش‌های هر طبقه

۲. گسل

استفاده پارامتر فاصله از گسل به عنوان معیاری مهم و تأثیرگذار روی زمین لغزش، به دلیل نقش مهم گسل‌های فعال در به وجود آوردن ریزلرزه‌ها و هم‌چنین تأثیر غیرمستقیم در خردشدگی مصالح و هوازدگی آن‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت برشی مصالح است. بررسی تأثیر عامل فاصله از گسل بر زمین لغزش‌های قدیمی رخ داده در محدوده سد لتیان، نشان می‌دهد که نزدیک به ۸۰ درصد از زمین لغزش‌های منطقه در فاصله کم‌تر از ۷۲۷ متری گسل‌های موجود در منطقه رخ داده است. به عبارت دیگر همواره طبقه‌های با فاصله کم‌تر از گسل، سطح زمین لغزش نسبی بیشتری دارند.

۳. طبقات ارتفاعی

ارتفاع ناحیه بررسی شده نیز در وقوع زمین لغزش مؤثر است. تغییرات ارتفاع در محدوده بررسی شده از ۱۵۴۴ تا ۲۰۱۷ متر در خط‌الرأس‌ها متغیر است. در محدوده بررسی شده با توجه به نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها، ۶ طبقه ارتفاعی شامل ۱۶۳۰-۱۵۴۴، ۱۶۸۵-۱۶۳۰، ۱۷۴۰-۱۶۸۵، ۱۸۰۵-۱۷۴۰، ۱۸۷۴-۱۸۰۵ و ۲۰۱۷-۱۸۷۴ متر در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در منطقه بررسی شده زمین لغزش‌ها به‌طور عمده در طبقه ارتفاعی ۱۶۸۵-

۱۶۳۰ متر رخ داده‌اند به طوری که بیش از ۵۷ درصد سطحی لغزش‌ها در این طبقه قرار دارد. این در حالی است که این طبقه حدود ۲۶ درصد منطقه را تشکیل می‌دهد. بعد از این طبقه، طبقه ارتفاعی ۱۶۳۰-۱۵۴۴ متر نسبت به بقیه طبقات ارتفاعی، اهمیت بیش‌تری دارد. قابل ذکر است که در مجموع در سه طبقه ارتفاعی آخر که حدود ۴۲ درصد منطقه را پوشش می‌دهند، کم‌تر از ۱ درصد سطحی زمین لغزش قرار دارد. بنا بر این نتیجه‌گیری می‌شود که عامل ارتفاع باید به‌عنوان یک عامل مهم در پهنه‌بندی زمین لغزش در منطقه بررسی شده در نظر گرفته شود.

۴. زاویه شیب و جهت شیب

زاویه شیب سطح زمین از عوامل اصلی پتانسیل گسیختگی دامنه‌ها به‌شمار می‌رود و به دو صورت طبیعی و مصنوعی تغییر می‌کند. افزایش شیب، وضعیت تعادل مواد سازنده دامنه را برهم زده و موجب بالا رفتن تنش‌های برشی در مواد دامنه می‌شود. برای تهیه لایه اطلاعاتی زاویه شیب و جهت شیب منطقه، از نقشه توپوگرافی استفاده شد. برای منطقه بررسی شده، عامل شیب به ۵ طبقه ۰-۵، ۵-۱۱، ۱۱-۱۸، ۱۸-۲۶ و ۲۶-۵۳ تقسیم شد. ارزیابی‌ها نشان داد که طبقه‌های شیب ۵-۱۱ درجه و ۱۱-۱۵ درجه پتانسیل بیش‌تری برای رخداد زمین لغزش دارند. همچنین سه طبقه دیگر شیب از نظر زمین لغزش دارای اهمیت تقریباً یک‌سانی هستند. برای جهت شیب، ۸ جهت شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب و شمال غربی در نظر گرفته شد. ارزیابی‌ها نشان داد که به ترتیب جهت‌های جنوب غربی و غرب از نظر رخداد زمین لغزش اهمیت بیش‌تری دارند.

۵. کاربری اراضی

در محدوده بررسی شده، ۴ نوع کاربری عمده زراعی، مرتع، جنگل و مسکونی دیده می‌شود. قابل ذکر است که بیش‌تر منطقه به شکل مرتع است و کاربری عمده بعدی منطقه، کاربری مسکونی است. بررسی‌ها نشان داد که کاربری اراضی مرتع پتانسیل بیش‌تری برای زمین لغزش دارد. به طوری که بیش از ۶۱ درصد سطحی زمین لغزش‌های منطقه بررسی شده در این طبقه قرار داد. نتیجه به دست آمده فتاحی و همکاران [۱] که برای کل حوزه آبخیز لتیان به دست آمده است، با این نتیجه مطابقت دارد.

۶. جاده

جاده به‌طور عمده با کاهش دادن مقاومت برشی، باعث افزایش پتانسیل ناپایداری دامنه‌ها می‌شود. عملیات راه‌سازی و نیز لرزه‌های ناشی از تردد وسایط نقلیه به‌عنوان عوامل ناپایدارکننده دامنه‌ها، سبب بروز ناپایداری می‌شوند. در منطقه بررسی شده جاده‌ها در کل منطقه گسترده شده‌اند. به‌طوری‌که بعد از ایجاد لایه رستری فاصله از جاده، مشخص شد که تقریباً تمام منطقه بررسی شده در فاصله کم‌تر از ۱۵۰ متری جاده‌ها قرار می‌گیرند. بنا بر این با توجه به این‌که عامل فاصله از جاده تقریباً تأثیر یک‌سانی بر کل منطقه دارد، این عامل در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در نظر گرفته نشد.

۷. آبراهه

نزدیکی به خطوط آبراهه‌ای می‌تواند به‌عنوان عاملی مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌ها در نظر گرفته شود [۱۵]. قابل ذکر است که محل اتصال دو آبراهه در یک ناحیه تأثیر مضاعفی بر وقوع زمین‌لغزش دارد [۱۶]. برای این عامل، به‌کمک نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش پیکسل‌ها، ۵ طبقه شامل ۰-۳۶۸، ۳۶۸-۷۳۶، ۷۳۶-۱۱۳۴، ۱۱۳۴-۱۶۰۹، ۱۶۰۹-۲۴۷۲ و ۱۶۰۹ متر تعریف شد. در مرحله بعد این لایه با لایه زمین‌لغزش‌ها قطع داده شد. نتایج نشان داد که با فاصله گرفتن از آبراهه‌های اصلی، درصد سطحی زمین‌لغزش به‌سرعت کاهش یافته است. به‌طوری‌که بیش از ۶۳ درصد سطحی زمین‌لغزش در طبقه با فاصله کم‌تر از ۳۶۸ متر از رودخانه واقع شده است. از طرفی بیش از ۹۴ درصد سطحی کل لغزش‌ها با فاصله کم‌تر از ۷۳۶ متر از آبراهه‌های اصلی (یعنی در دو طبقه اول) واقع شده‌اند. این امر نشان‌دهنده اهمیت زیاد این عامل در تهیه نقشه پهنه‌بندی است.

۸. زاویه اصطکاک

زاویه اصطکاک به‌عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی مهم سنگ و خاک، نقش بسیار مهمی در مقاومت برشی این مواد دارد. به‌همین علت در این تحقیق تصمیم گرفته شد تا این خاصیت سنگ به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی مجزا استفاده شود. بدین‌منظور از نقشه زاویه اصطکاک ارائه شده به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شد. به‌طوری‌که برای

زاویه اصطکاک چهار رده ۳۳-۱۸، ۳۶-۳۳، ۴۰-۳۶ و ۴۶-۴۰ درجه تعریف شد و سنگ‌های مختلف با توجه به زاویه اصطکاک در این چهار طبقه قرار گرفتند اما به دلیل عدم انطباق مناسب این لایه با لایه زمین‌لغزش‌ها، این عامل از بین عوامل مؤثر اولیه حذف شد و در تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده نشد.

پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

در روش تحلیل سلسله مراتبی به منظور وزن‌دهی به عوامل مؤثر در زمین‌لغزش، لازم است تا ابتدا ماتریس مقایسه‌های زوجی تشکیل شود و سپس طی مراحل و با نرمال کردن این ماتریس، وزن عوامل مختلف محاسبه شود. مراحل انجام کار بدین صورت است:

۱. ایجاد ماتریس مقایسه‌های زوجی برای عوامل مؤثر در زمین‌لغزش

در روش AHP به منظور وزن‌دهی به عوامل مؤثر، بین آن‌ها مقایسه‌های زوجی صورت می‌گیرد. به این صورت که ابتدا با استفاده از قضاوت‌های کارشناسی مبتنی بر بررسی‌های پژوهش‌گر و نیز سایر تحقیقات صورت گرفته متخصصان دیگر در منطقه بررسی شده، اقدام به رتبه‌بندی عوامل به ترتیب از اهمیت (اولویت) ضعیف تا اهمیت حداکثر می‌شود. سپس این رتبه‌ها به کمک جدول ۲ که مقیاس نمره‌دهی مقایسه‌های زوجی را نشان می‌دهد، به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل می‌شود. قابل ذکر است که همه مقایسه‌ها به صورت زوجی انجام می‌شود. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده می‌کنند به گونه‌ای که اگر عنصر a با b مقایسه شود، تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت a بر b یکی از حالت‌ها به شرح جدول ۲ است. باید به این موضوع توجه شود که در مقایسه‌های زوجی مقدار کمی رتبه یا اولویت هر عامل نسبت به همان عامل برابر عدد یک است. اما اگر رتبه عامل اول بر عامل دوم مثلاً ۲ باشد، در این صورت مقدار کمی رتبه عامل دوم بر عامل اول ۱/۲ خواهد بود. در ادامه مطابق جدول ۳، ماتریس $n \times n$ تشکیل می‌شود که n تعداد عوامل مؤثر انتخاب شده است. درایه‌های این ماتریس بر اساس مقایسه‌های صورت گرفته در مرحله قبل پر می‌شود. به عبارتی درایه‌های این ماتریس اهمیت نسبی هر عنصر نسبت به عناصر دیگر را مشخص می‌کند.

جدول ۲. مقیاس نمره‌دهی مقایسه‌های زوجی

نمره	تعریف	شرح
۱	اهمیت یکسان	دو عنصر، اهمیت یکسانی دارند.
۳	برتری متوسط	یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری متوسطی دارد
۵	برتری زیاد	یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری زیادی دارد
۷	برتری بسیار زیاد	یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری بسیار زیادی دارد
۹	برتری فوق‌العاده زیاد	یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری فوق‌العاده زیادی دارد
۲، ۴، ۶، ۸	ارزش‌های بینابین	موارد بینابین در قضاوت‌ها

جدول ۳. ماتریس مقایسه‌های زوجی عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان

عامل	لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب
لیتولوژی	۱	۲	۳	۴	۵	۷	۹
کاربری اراضی	۰،۵	۱	۲	۳	۳	۴	۸
آبراهه	۰،۳۳۳	۰،۵	۱	۳	۴	۵	۸
شیب	۰،۲۵	۰،۳۳۳	۰،۳۳۳	۱	۲	۳	۶
ارتفاع	۰،۲	۰،۳۳۳	۰،۲۵	۰،۵	۱	۲	۷
گسل	۰،۱۴۳	۰،۲۵	۰،۲	۰،۳۳۳	۰،۵	۱	۴
جهت شیب	۰،۱۱۱	۰،۱۲۵	۰،۱۲۵	۰،۱۶۷	۰،۱۴۳	۰،۲۵	۱
مجموع ستون	۲،۵۳۷	۴،۵۴۲	۶،۹۰۸	۱۲	۱۵،۶۴۳	۲۲،۲۵	۴۳

باید توجه کرد که در ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی، سطر I با ستون J مقایسه می‌شود. بنابراین همه عناصر قطر اصلی این ماتریس، عدد یک هستند. همچنین هر مقدار زیر قطر اصلی، معکوس مقدار بالای قطر است.

۲. نرمالیزه کردن ماتریس مقایسات زوجی و محاسبه وزن عوامل

پس از تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی، ابتدا این ماتریس نرمالیزه می‌شود به طوری که مقادیر عناصر هر ستون بر مجموع به دست آمده برای همان ستون تقسیم می‌گردد. در حقیقت طی این مرحله عناصر ماتریس، بی‌بعد می‌شوند. در مرحله بعد میانگین حسابی مقادیر عناصر در هر سطر از ماتریس نرمالیزه شده محاسبه می‌گردد تا وزن عاملی که در آن سطر قرار دارد به دست آید که به وزن‌های نسبی عوامل، معروف هستند. در جدول ۴ نتایج حاصل از نرمالیزه کردن ماتریس مقایسه‌های زوجی عوامل مؤثر نشان داده شده است.

جدول ۴. ماتریس نرمالیزه شده مقایسه‌های زوجی و محاسبه وزن عوامل با استفاده از روش میانگین حسابی

عامل	لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب	میانگین هر سطر
لیتولوژی	۰,۳۹۴	۰,۴۴	۰,۴۳۴	۰,۳۳۳	۰,۳۲	۰,۳۱۵	۰,۲۰۹	۰,۳۵
کاربری اراضی	۰,۱۹۷	۰,۲۲	۰,۲۹	۰,۲۵	۰,۱۹۲	۰,۱۸	۰,۱۸۶	۰,۲۲
آبراهه	۰,۱۳۱	۰,۱۱	۰,۱۴۵	۰,۲۵	۰,۲۵۶	۰,۲۲۵	۰,۱۸۶	۰,۱۹
شیب	۰,۰۹۹	۰,۰۷۳	۰,۰۴۸	۰,۰۸۳	۰,۱۲۸	۰,۱۳۵	۰,۱۴	۰,۱
ارتفاع	۰,۰۷۹	۰,۰۷۳	۰,۰۳۶	۰,۰۴۲	۰,۰۶۴	۰,۰۹۰	۰,۱۶۳	۰,۰۸
گسل	۰,۰۵۶	۰,۰۵۵	۰,۰۲۹	۰,۰۲۸	۰,۰۳۲	۰,۰۴۵	۰,۰۹۳	۰,۰۵
جهت شیب	۰,۰۴۴	۰,۰۲۸	۰,۰۱۸	۰,۰۱۴	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	۰,۰۲۳	۰,۰۲

۳. محاسبه نرخ ناسازگاری داده‌ها

نرخ ناسازگاری^۱، معیاری برای سنجش معناداری و دقت داده‌های وارد شده است. به عبارت دیگر به منظور ارزیابی مقایسه‌های زوجی صورت گرفته، سنجش میزان ناسازگاری ضروری است. برای این منظور این گام‌های به ترتیب انجام می‌گیرد:

گام ۱: محاسبه بردار مجموع وزنی (WSV^2): ماتریس مقایسه‌های زوجی (D) در بردار وزن‌های نسبی ضرب شد. به بردار به دست آمده بردار مجموع وزنی گفته می‌شود (جدول ۵):

$$WSV=D*W$$

گام ۲: محاسبه بردار سازگاری (CV): عناصر بردار مجموع وزنی بر بردار وزن‌های نسبی تقسیم شد. به بردار حاصل، بردار سازگاری گفته می‌شود (جدول ۵).

گام ۳: محاسبه بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه‌های زوجی (λ_{max}): برای محاسبه بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه‌های زوجی، میانگین عناصر بردار سازگاری محاسبه شد. میانگین عناصر بردار سازگاری برابر با مقدار $7/41$ به دست آمد.

گام ۴: محاسبه شاخص ناسازگاری^۳ (II): شاخص ناسازگاری بدین صورت محاسبه شد:

جدول ۵. نتایج محاسبه‌های بردار مجموع وزنی و بردار سازگاری

۲,۶۲۲	۱,۶۳۳	۱,۳۹۶	۰,۷۲۹	۰,۵۴۶	۰,۳۳۹	۰,۱۴۹	بردار مجموع وزنی
۷,۴۰۷	۷,۴۳۳	۷,۴۲۶	۷,۴۳۴	۷,۳۸	۷,۳۶۶	۷,۴۳۷	بردار سازگاری

1. Consistency Ratio

2. weighted sum vector

3. Consistency Index

$$II = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{7.41 - 7}{7 - 1} = 0.068$$

گام ۵: محاسبه نرخ ناسازگاری (IR): نرخ ناسازگاری بدین صورت محاسبه شد:

$$IR = \frac{II}{IRI} = \frac{0.068}{1.32} = 0.05$$

که IRI (شاخص ناسازگاری تصادفی) مقداری است که از جدول ۶ استخراج می‌شود. مقادیر این جدول بر پایه‌شبییه‌سازی تعداد زیادی از ماتریس‌های مقایسه زوجی $n \times n$ به دست آمده است. مطابق اصول روش AHP، اگر نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد در مقایسه‌های زوجی، سازگاری وجود دارد و می‌توان کار را ادامه داد. اگر نه تصمیم‌گیرنده باید در مقایسه‌های زوجی بازنگری کند. با توجه به این‌که برای مقایسه‌های زوجی صورت گرفته، میزان سازگاری برابر با ۰/۰۵ به دست آمد در نتیجه در این مقایسه‌های سازگاری وجود داشته و نیازی به بازنگری در مقایسه‌های انجام شده نیست. بنا بر این وزن‌های محاسبه شده برای عوامل مختلف مطابق جدول ۷ در نظر گرفته شد:

جدول ۶. نتایج محاسبات شاخص ناسازگاری تصادفی

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
IRI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۵۱

جدول ۷. وزن‌های حاصل برای عوامل مؤثر در زمین‌لغزش منطقه به کمک روش AHP

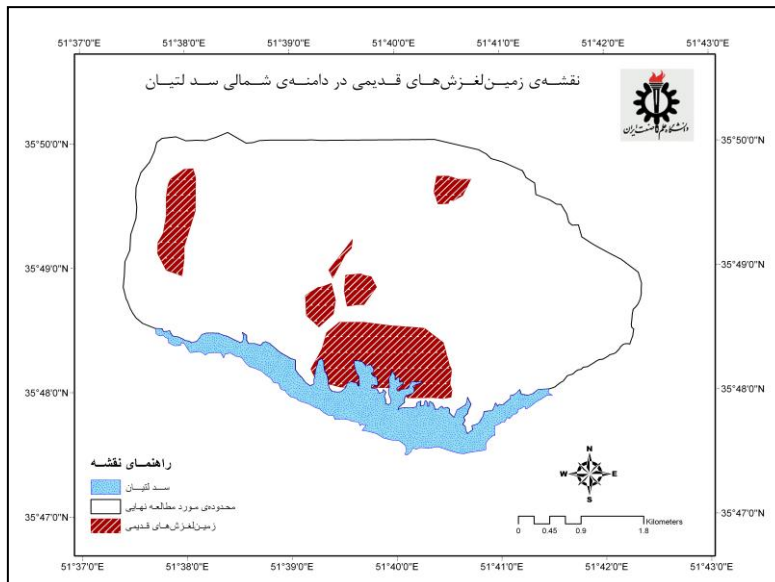
لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب
۰,۳۵۴	۰,۲۲	۰,۱۸۸	۰,۰۹۸	۰,۰۷۴	۰,۰۴۶	۰,۰۲

چنان‌که از جدول ۷ مشهود است براساس قضاوت‌های کارشناسی صورت گرفته، عامل لیتولوژی بیش‌ترین تأثیر و عامل جهت شیب، کم‌ترین تأثیر را بر زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. بعد از مشخص شدن وزن هر یک از عوامل مؤثر در زمین‌لغزش، لازم است تا وزن هر یک از طبقه‌های این عوامل نیز تعیین شود. چنان‌که قبلاً نیز اشاره شد برای طبقه‌بندی عوامل کمی مانند شیب، ارتفاع، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه، از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش پیکسل‌ها و عوامل کیفی مانند جهت شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی با توجه به تقسیم‌بندی‌های مشخص هر کدام از این عوامل، طبقه‌بندی صورت گرفته

است. با در نظر گرفتن این طبقه‌بندی‌ها، وزن همه طبقه‌های عواملی که در پهنه‌بندی، اهمیت زیادی دارند، تعیین شد. در ادامه نحوه وزن‌دهی به طبقه‌های مختلف مربوط به عوامل، آورده شده است.

۴. محاسبه وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در روش AHP

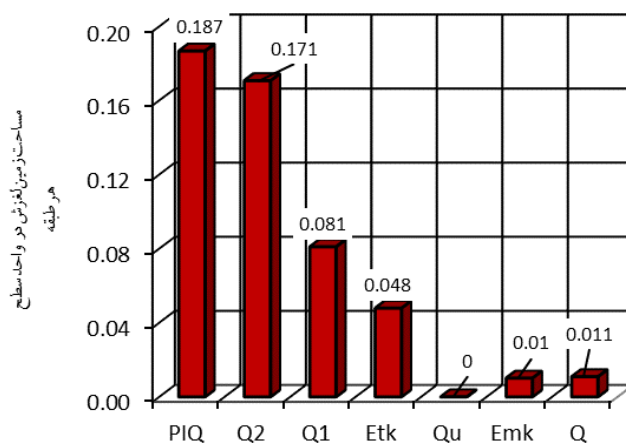
به منظور تعیین مقادیر وزن طبقه‌های عوامل مختلف، ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها (شکل ۴) با هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل مؤثر مطابقت داده شد. بدین وسیله تراکم سطحی زمین‌لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف هر یک از عوامل مؤثر به دست آمد. به عنوان نمونه نمودار تراکم سطحی زمین‌لغزش در طبقه‌های مختلف لیتولوژی در شکل ۵ نشان داده شده است. سپس وزن طبقه‌ها از نسبت سطح زمین‌لغزش موجود در هر طبقه به سطح کل آن طبقه محاسبه شد. قابل ذکر است که وزن مربوط به طبقه‌های مختلف در روش تحلیل سلسله مراتبی بین ۰-۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. بدین ترتیب برای طبقه‌ای که دارای بیش‌ترین



شکل ۴. نقشه پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌های قدیمی منطقه بررسی شده

سطح لغزش است امتیاز ۱۰۰ و برای طبقه‌ای که زمین لغزش ندارد امتیاز صفر منظور می‌شود. واضح است که برای طبقه‌هایی که سطح لغزش بین این دو مقدار دارند امتیاز مربوط براساس

میزان سطح لغزش، به دست می‌آید. در جدول ۸ وزن‌های محاسبه شده طبقه‌های مختلف همه عوامل مؤثر در زمین لغزش آورده شده است.



واحدهای لیتولوژی

شکل ۵. نمودار تراکم سطحی زمین لغزش در طبقه‌های مختلف لیتولوژی

جدول ۸. اطلاعات و وزن‌های طبقه‌های عوامل مؤثر در زمین لغزش

لیتولوژی		کاربری اراضی		جهت شیب		ارتفاع		فاصله از آبراهه		فاصله از گسل		شیب	
وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس
۱۰۰.۰	PIQ	50.2	جنگلی	72.7	N	100	1544-1630	100	0-368	100	0-727	62.4	0-5
۹۱.۴	Q2	94.4	زراعی	62.2	NE	81.8	1630-1685	51.1	368-736	62.5	727-1874	100	5-11
۴۳.۴	Q1	100	مرتع	75.5	E	34.3	1685-1740	12.1	736-1134			93.1	11-18
۲۵.۶	Etk	49.7	مسکونی	100	SE	0.0	1740-1805	6.7	1134-1609			63.8	18-26
۰.۰	Qu			46.4	S	1.6	1805-1874	0	1609-2472			60.3	26-53
۵.۴	Emk			40.3	SW								
۵.۸	Q			56.5	W								
				48.2	NW								

۵. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش AHP

پس از تعیین وزن همه طبقه‌های عوامل مؤثر، این وزن‌ها در نقشه‌های تهیه شده تأثیر داده شد و نقشه‌های وزنی تهیه شد. برای به دست آمدن مدل نهایی یا نقشه پهنه‌بندی، لازم

است که وزن خود عوامل نیز در طبقه‌های آن‌ها ضرب شده و با جمع آن‌ها وزن نهایی (W)، مطابق رابطه (۱) به دست آید:

$$W = X_1x_i + X_2x_i + X_3x_i + X_4x_i + X_5x_i + X_6x_i + X_7x_i \quad (1)$$

در این رابطه، Xها وزن مربوط به عوامل ۷ گانه است و Xها وزن مربوط به طبقه‌های مختلف این عوامل هستند. مقدار وزن نهایی عددی در بازه ۰-۱۰۰ است.

محاسبه‌های مورد نیاز، اعمال صحیح وزن‌های به دست آمده برای تک تک پارامترها و به دست آوردن خروجی مدل یعنی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10 انجام شد. در شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان با روش تحلیل سلسله مراتبی نشان داده شده است. برای طبقه‌بندی خطر زمین لغزش نیز از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها استفاده شده و ۵ طبقه با واژه‌های توصیفی خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر بسیار زیاد در نظر گرفته شد.

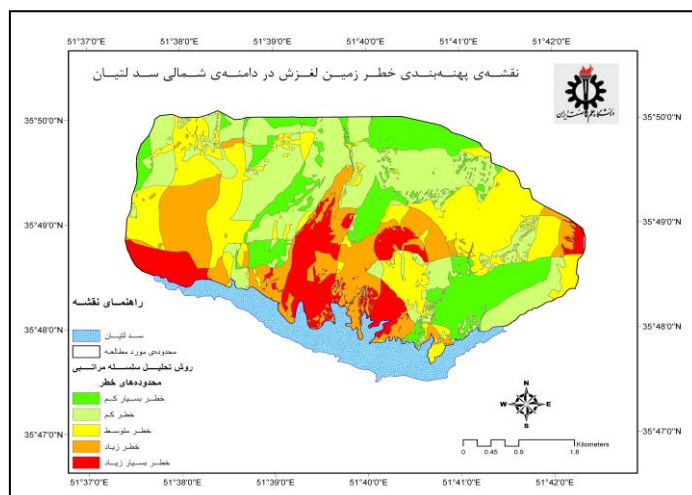
نمودار مربوط به درصد سطحی طبقه‌های خطر و هم‌چنین درصد سطحی زمین لغزش‌ها در هر کدام از این طبقه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود حدود ۴۰ درصد از کل زمین لغزش‌ها در طبقه با خطر بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. خود این طبقه خطر نیز حدود ۱۱ درصد منطقه را پوشش داده است. از طرفی در مجموع سه طبقه با خطر بسیار کم، کم و متوسط که بیش از ۷۱ درصد از سطح منطقه را تشکیل می‌دهند حدود ۲۵ درصد زمین لغزش‌ها را شامل می‌شوند.

پهنه‌بندی به روش تراکم سطح

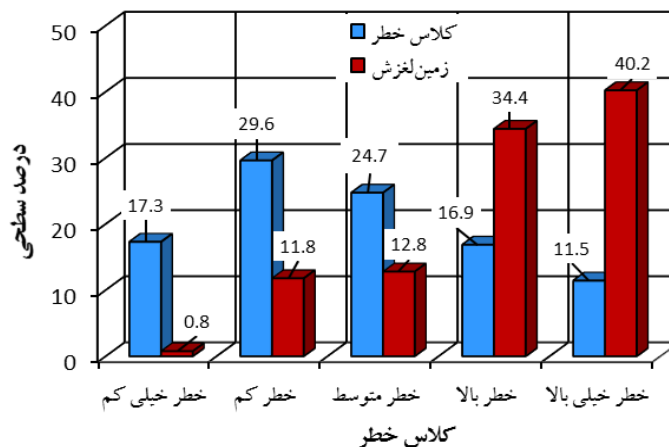
در روش تراکم سطح وزن مربوط به هر یک از طبقه‌های عوامل مختلف از این رابط به دست می‌آید [۱۸]:

$$W = 1000 \left(\frac{A}{B} \right) - 1000 \left(\frac{C}{D} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه W، وزن مربوط به هر یک از طبقه‌های عوامل مختلف؛ A، مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در هر یک از طبقه‌ها؛ B، مساحت هر طبقه؛ C، مساحت زمین لغزش‌های کل منطقه بررسی شده و D، مساحت کل منطقه بررسی شده است. در جدول



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی



شکل ۷. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش AHP

۹، وزن‌های به‌دست آمده از رابطه تراکم سطح برای همه طبقه‌های عوامل مؤثر خلاصه شده است:

پس از محاسبه میزان همه طبقه‌های مربوط به همه عوامل (جدول ۹)، این وزن‌ها به نقشه‌های مربوط اعمال شد و با روی هم‌گذاری این نقشه‌ها و جمع ارزش پیکسل‌های آن‌ها،

نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌روش تراکم سطح در ۵ طبقه مختلف خطر تهیه شد. برای تعیین مرز این ۵ طبقه خطر نیز از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها استفاده شد. قابل ذکر است که در این روش فقط از وزن طبقه‌های مختلف عوامل استفاده می‌شود. به‌طوری‌که بر خلاف روش AHP برای خود عوامل، وزنی در نظر گرفته نمی‌شود. شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌روش تراکم سطح را نشان می‌دهد.

جدول ۹. وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در زمین‌لغزش به‌روش تراکم سطح

عوامل مؤثر							
طبقه	زمین‌شناسی	کاربری اراضی	فاصله از آبراهه	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	جهت شیب
۱	۶۶٫۷	-۴۰٫۹۵	۹۹٫۶۶	۱۴٫۶۲	-۲۲٫۱۸	۱۸۴٫۰۴	۲۱٫۸۶
۲	۵۰٫۶۸	۲۸٫۵۶	-۷٫۷۱	-۳۵٫۸۱	۳۶٫۸	۱۲۸٫۷۸	۱٫۵۳
۳	-۳۸٫۹۹	۳۷٫۳۳	-۹۳٫۳۸		۲۶٫۰۳	-۱۵٫۷۲	۲۷٫۴۱
۴	-۷۲٫۱۱	-۴۱٫۸۵	-۱۰۵٫۲۵		-۱۹٫۸۹	-۱۱۹٫۹۸	۷۵٫۲۴
۵	-۱۱۹٫۹۸		-۱۱۹٫۹۸		-۲۵٫۳۹	-۱۱۵٫۱۲	-۲۹٫۴۳
۶	-۱۰۹٫۸۷					-۱۱۹٫۱۷	-۴۱٫۲۹
۷	-۱۰۹٫۱						-۹٫۶۳
۸							-۲۵٫۹۷

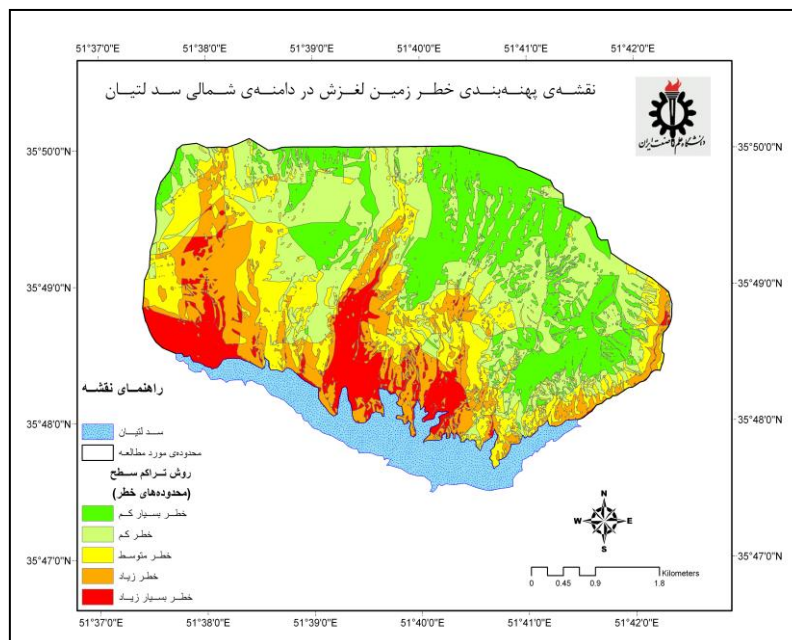
چنان‌که از شکل ۸ مشاهده می‌شود نواحی با خطر بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های غرب، مرکز و تا حدودی در شرق مرز پایینی محدوده بررسی شده واقع شده‌اند. در روش تراکم سطح، در کل دو طبقه با خطر بسیار کم و خطر کم که بیش از ۵۲ درصد منطقه بررسی شده را پوشش می‌دهند کم‌تر از ۷ درصد سطحی زمین‌لغزش‌ها واقع شده است (شکل ۹). هم‌چنین در طبقه با خطر بسیار زیاد بیش از ۴۰ درصد زمین‌لغزش‌ها تمرکز دارند. خود این طبقه حدود ۱۰ درصد از منطقه را اشغال کرده است.

پهنه‌بندی به‌روش ارزش اطلاعاتی

در روش ارزش اطلاعاتی وزن هر یک از طبقه‌های عوامل مؤثر از رابطه (۳) به‌دست می‌آید [۱۸]:

$$W_{inf} = \text{Ln} \left[\frac{\left(\frac{A}{B} \right)}{\left(\frac{C}{D} \right)} \right] \quad (3)$$

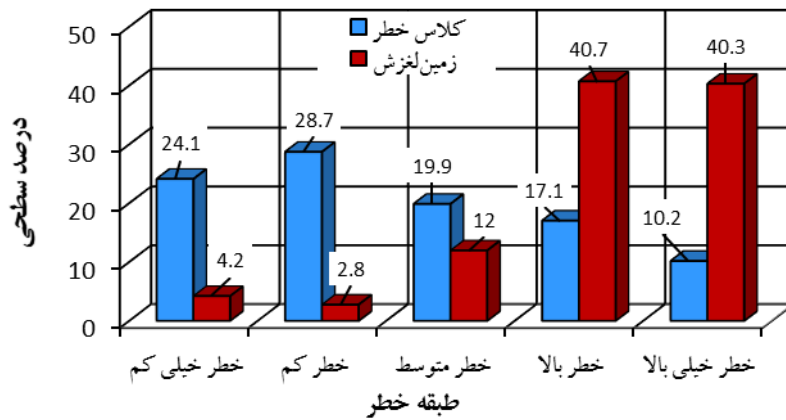
که در این رابطه W_{inf} ، وزن مربوط به هر طبقه؛ A ، مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در هر طبقه؛ B ، مساحت هر طبقه؛ C ، مساحت زمین لغزش‌های کل منطقه بررسی شده و D ، مساحت کل منطقه بررسی شده است. میزان ارزش اطلاعاتی منفی بیان‌گر کم‌تر بودن درصد سطحی ناپایداری از ناپایداری میانگین منطقه و مقدار ارزش اطلاعاتی مثبت، نشان‌گر بیش‌تر بودن درصد سطحی ناپایداری نسبت به میانگین منطقه است. ارزش اطلاعاتی صفر بیان‌گر متوسط درصد سطحی ناپایداری منطقه است. وزن طبقه‌های عوامل مختلف که با استفاده از رابطه ارزش اطلاعاتی به‌دست آمده‌اند در جدول ۱۰، خلاصه شده است:



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان به کمک روش تراکم سطح

در این روش نیز مانند روش تراکم سطح، بعد از محاسبه وزن همه طبقه‌های عوامل مختلف، این وزن‌ها به نقشه‌های مختلف اعمال شد. سپس با روی هم‌اندازی همه عوامل و

جمع کردن ارزش پیکسل‌های عوامل مختلف، نقشه نهایی خطر زمین لغزش به روش ارزش اطلاعاتی در ۵ طبقه خطر تهیه شد (شکل ۱۰).



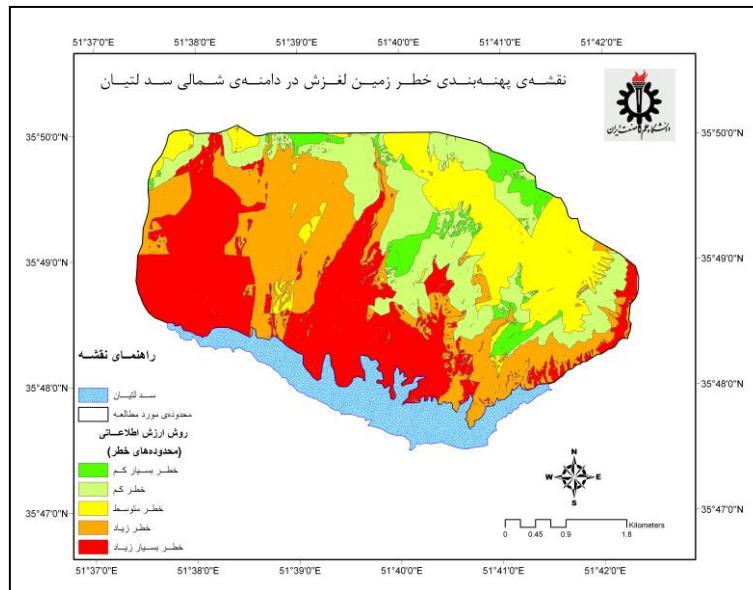
شکل ۹. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش تراکم سطح

جدول ۱۰. وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در زمین لغزش به روش ارزش اطلاعاتی

عوامل مؤثر							طبقه
جهت شیب	ارتفاع	شیب	فاصله از گسل	فاصله از آبراهه	کاربری اراضی	زمین‌شناسی	
۰,۱۶۷	۰,۹۳	-۰,۲۰۴	۰,۱۱۵	۰,۶۰۵	-۰,۴۱۸	۰,۴۴۲	۱
۰,۰۱۳	۰,۷۲۹	۰,۲۶۸	-۰,۳۵۴	-۰,۰۶۶	۰,۲۱۴	۰,۳۵۲	۲
۰,۲۰۶	-۰,۱۴	۰,۱۹۶		-۱,۵۰۶	۰,۲۷۱	-۰,۳۹۳	۳
۰,۴۸۷	-۱۰,۰۲۲	-۰,۱۸۱		-۲,۰۹۷	-۰,۴۳۹	-۰,۹۱۹	۴
-۰,۲۸۱	-۳,۲۰۵	-۰,۲۳۸		-۷,۹۳۷		-۵,۹۳۹	۵
-۰,۴۲۲	-۴,۹۹۲					-۲,۴۷۴	۶
-۰,۰۸۴						-۲,۴	۷
-۰,۲۴۴							۸

شکل ۱۱، نمودار اطلاعات مربوط به طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی و زمین لغزش‌های رخ داده در آن‌ها را نشان می‌دهد. در روش ارزش اطلاعاتی بیش از ۸۷ درصد سطحی زمین لغزش‌ها در طبقه با خطر بسیار زیاد قرار گرفته است. اما نکته‌ای که باید افزود این است که این طبقه خود بیش از ۳۱ درصد سطحی منطقه را شامل می‌شود. در واقع نسبت بین سطح لغزش در

این طبقه به سطح خود طبقه حدود ۰/۳۳ است در حالی که این نسبت برای روش شاخص هم‌پوشانی ۰/۴۹ است.



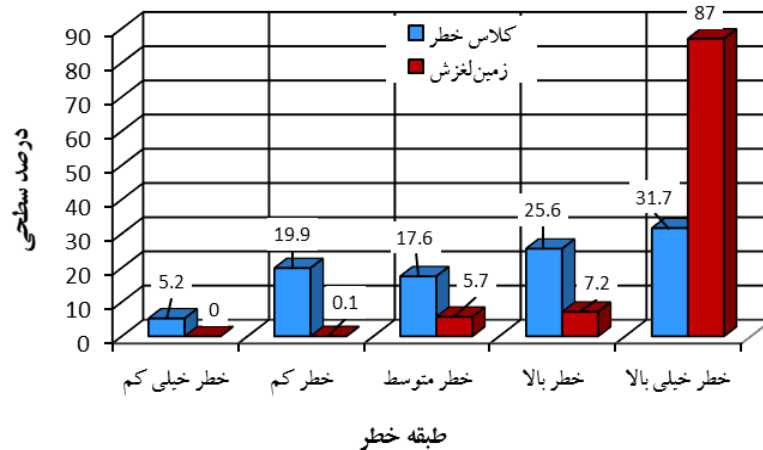
شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان به کمک روش ارزش اطلاعاتی

پهنه‌بندی به روش شاخص هم‌پوشانی

در روش شاخص هم‌پوشانی وزن مربوط به کلاس‌های مختلف عوامل مؤثر بین ۰ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. بدین ترتیب که از قطع دادن نقشه پراکنش زمین لغزش با عوامل مختلف استفاده شده و در مورد هر عامل، به طبقه‌ای که تراکم زمین لغزش بیش‌تری داشت وزن ۱۰ تعلق می‌گیرد. میزان بقیه کلاس‌ها با توجه به مقدار تراکم زمین لغزش در طبقه مربوطه، به صورت واحدی از ۱۰ تعیین می‌شود. چنان‌که مشخص است وزن طبقه‌ها در این روش برابر با ۰/۱ مقادیر طبقه‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی است. وزن طبقه‌های مختلف این عوامل مطابق رویه گفته شده محاسبه و در جدول ۱۱ خلاصه شده است.

در این روش علاوه بر میزان هر کلاس به هریک از عوامل نیز باید وزنی اعمال شود. این وزن وابسته به قضاوت کارشناسی است و بیشتر بستگی به شناخت محقق از منطقه بررسی شده دارد [۲]. در تحقیق حاضر براساس بررسی های کتابخانه‌ای و میدانی صورت گرفته، استمداد از نظرات کارشناسی متخصصان آشنا به منطقه و نیز نمودارهای مربوط به تراکم زمین لغزش، وزن‌های عوامل مختلف بدین صورت تعیین شد:

زمین‌شناسی=۱۰؛ کاربری اراضی=۷؛ فاصله از آبراهه=۶؛ فاصله از گسل=۴؛ شیب=۵؛ ارتفاع=۶ و جهت شیب=۲.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش ارزش اطلاعاتی

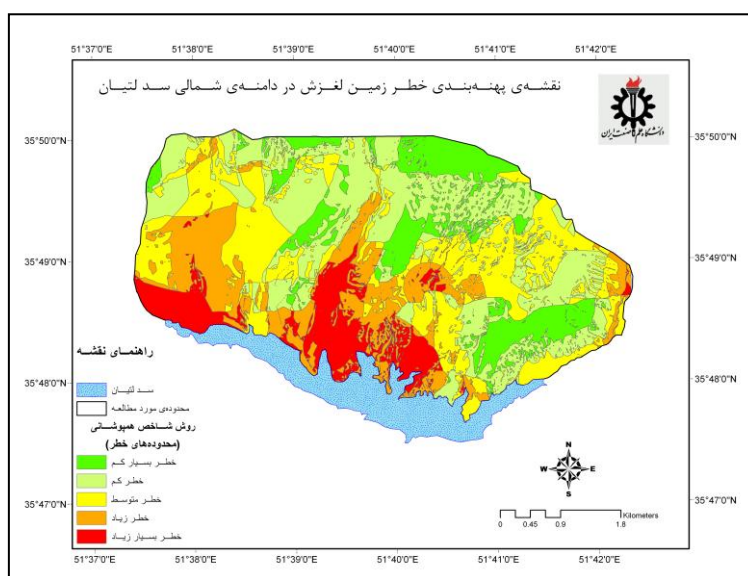
بعد از اعمال وزن‌های مرتبط با طبقه‌های مختلف به لایه‌های اطلاعاتی، وزن نهایی پیکسل‌ها با استفاده از رابطه (۴) حاصل شد و نقشه نهایی تهیه شد (شکل ۱۲). این نقشه نیز با استفاده از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها به ۵ طبقه خطر تقسیم شد.

$$W=10*A+7*B+6*C*4*D+5*E+6*F+2*G \quad (4)$$

که در این رابطه، A، B، C، D، E، F و G به ترتیب لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع و جهت شیب هستند.

جدول ۱۱. وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در زمین لغزش به روش شاخص هم‌پوشانی

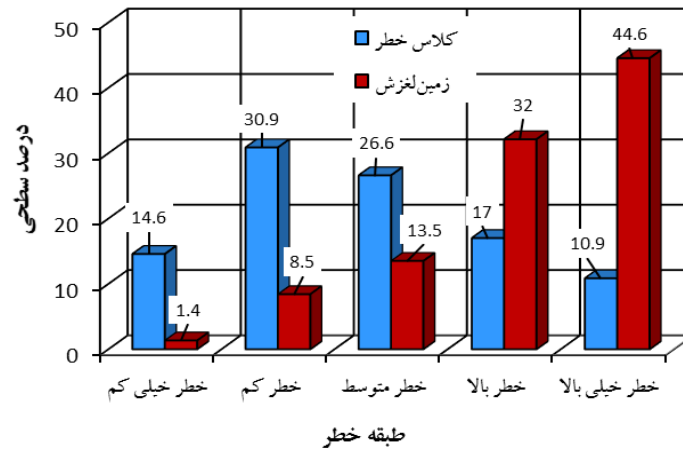
عوامل مؤثر طبقه	لیتولوژی	کاربری اراضی	فاصله از آبراهه	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	جهت شیب
۱	۱۰	۵,۰۲	۱۰	۱۰	۶,۲۴	۱۰	۷,۲۷
۲	۹,۱۴	۹,۴۴	۵,۱۱	۶,۲۵	۱۰	۸,۱۸	۶,۲۲
۳	۹,۳۴	۱۰	۱,۳۱		۹,۳۱	۳,۴۳	۷,۵۵
۴	۲,۵۶	۴,۹۷	۰,۶۷		۶,۳۸	۰	۱۰
۵	۰		۰		۶,۰۳	۰,۱۶	۹,۶۴
۶	۰,۵۴					۰,۰۳	۴,۰۳
۷	۰,۵۸						۵,۶۵
۸							۴,۸۲



شکل ۱۲. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان به کمک روش شاخص هم‌پوشانی

در نمودار پراکندگی شکل ۱۳ درصد وقوع زمین لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های مختلف خطر در روش شاخص هم‌پوشانی نشان داده شده است. در این روش بیش از ۷۶ درصد زمین لغزش‌ها در دو طبقه خطر زیاد و خطر بسیار زیاد متمرکز شده است. این در حالی است که این دو طبقه در مجموع حدود ۲۷ درصد سطحی منطقه را شامل می‌شوند. هم‌چنین

در دو طبقه با خطر کم و بسیار کم (در مجموع حاوی بیش از ۴۵ درصد سطحی منطقه) کم‌تر از ۱۰ درصد زمین‌لغزش‌ها رخ داده است.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌روشن شاخص هم‌پوشانی

ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف پهنه‌بندی زمین‌لغزش

در این مرحله با تلاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه و نقشه‌های پهنه‌بندی در محیط GIS، به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، با استفاده از شاخص‌های مجموع کیفیت^۱ (QS)، نسبت تراکم^۲ (DR) و دقت پیش‌بینی^۳ (P) پرداخته شد و روش‌های متناسب‌تر و با انطباق بیشتر بر شرایط منطقه بررسی شده، انتخاب شد. به‌طور کلی شاخص‌های نسبت تراکم (DR) و پیش‌بینی (P)، برای ارزیابی و مقایسه دقت طبقه‌های خطر در هر روش از روش‌های پهنه‌بندی و شاخص مجموع کیفیت (QS) برای ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف، برای تعیین مناسب‌ترین روش در تهیه نقشه پهنه‌بندی در منطقه بررسی شده کاربرد دارند. برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکم محاسبه شود. برای این منظور از رابطه (۵) استفاده شد:

$$DR = \frac{\left(\frac{S_i}{A_i}\right)}{\left(\frac{\sum_1^n S_i}{\sum_1^n A_i}\right)} \quad (5)$$

1. Quality Sum 2. Density Ratio 3. Precision of the Predicted

که در آن S_i ، مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر طبقه خطر؛ A_i ، مساحت i امین طبقه خطر در یک نقشه پهنه‌بندی و n تعداد طبقه‌های خطر است. نتایج حاصل نیز در جدول ۱۲ خلاصه شده است.

در یک روش پهنه‌بندی، تراکم لغزش طبقه با $DR = 1$ معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و رده دارای نسبت تراکمی ۲، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه hsj . بنا بر این هرچه تفکیک بین طبقه‌های خطر به وسیله شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش (و در نتیجه نقشه حاصل) دارای دقت یا مطلوبیت بیش‌تری است [۷].

مقدار مجموع کیفیت (QS) از طریق رابطه (۶) محاسبه شد [۷]، [۲۰]–[۲۳]. نتایج به‌دست آمده برای مجموع کیفیت نیز در جدول ۱۱ خلاصه شده است.

$$QS = \sum_{i=1}^n (DR - 1)^2 \times S \quad (6)$$

که QS، مجموع کیفیت؛ DR، نسبت تراکم؛ S، نسبت مساحت هر طبقه خطر به مساحت کل منطقه و n تعداد طبقه‌های خطر است.

دقت پیش‌بینی روش (P)، عبارت است از نسبت مساحت سطح لغزش یافته در طبقه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به مساحت کل آن پهنه‌ها که از رابطه (۷) محاسبه شد (جدول ۱۱):

$$P = \frac{K_s}{S} \quad (7)$$

که P، دقت پیش‌بینی روش در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا، K_s ، مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا و S، مساحت پهنه‌های خطر مرتبط هستند.

نتایج شاخص‌های DR و P (جدول ۱۱) نشان می‌دهند که در ارتباط با تفکیک طبقه‌های خطر، به ترتیب روش‌های تراکم سطح، شاخص هم‌پوشانی و تحلیل سلسله مراتبی دقت بیش‌تری دارند. از طرفی روش ارزش اطلاعاتی در قیاس با سه روش دیگر دقت کم‌تری در تفکیک طبقه‌های خطر دارند. این امر با دقت در داده‌های مساحت طبقه‌های خطر این روش (جدول ۱۱) نیز روشن می‌شود. زیرا در این روش به طبقه با خطر بسیار زیاد، سطحی بیش‌تر از ۳۱ درصد کل منطقه تعلق گرفته است. هم‌چنین بیش از ۵۵ درصد منطقه در دو طبقه خطر زیاد و خطر بسیار زیاد قرار دارند.

جدول ۱۲. شاخص‌های مجموع کیفیت، نسبت تراکمی و دقت پیش‌بینی روش‌های مختلف پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه بررسی شده

مدل پهنه‌بندی	طبقه‌های خطر	QS در هر طبقه	نسبت تراکمی (DR)	درصد مساحت هر طبقه (S)	دقت پیش‌بینی روش (P)	مجموع کیفیت (QS)
روش AHP	خطر بسیار کم	۰,۱۶	۰,۰۴	۱۷,۳۱	۰,۳۲	۱,۳۳
	خطر کم	۰,۱۱	۰,۰۴	۲۹,۶۲		
	خطر متوسط	۰,۰۶	۰,۰۵۲	۲۴,۷۴		
	خطر زیاد	۰,۱۸	۲,۰۴	۱۶,۸۸		
	خطر بسیار زیاد	۰,۷۲	۳,۵۲	۱۱,۴۴		
روش تراکم سطح	خطر بسیار کم	۰,۱۶	۰,۱۷	۲۴,۱۴	۰,۳۶	۱,۶۵
	خطر کم	۰,۲۳	۰,۱	۲۸,۷۳		
	خطر متوسط	۰,۰۳	۰,۶	۱۹,۸۹		
	خطر زیاد	۰,۳۳	۲,۳۹	۱۷,۰۴		
	خطر بسیار زیاد	۰,۸۹	۳,۹۶	۱۰,۱۹		
روش ارزش اطلاعاتی	خطر بسیار کم	۰,۰۵	۰	۵,۲۴	۰,۲	۱,۴۳
	خطر کم	۰,۲۰	۰	۱۹,۹۴		
	خطر متوسط	۰,۰۸	۰,۳۲	۱۷,۵۴		
	خطر زیاد	۰,۱۳	۰,۲۸	۲۵,۶۳		
	خطر بسیار زیاد	۰,۹۷	۲,۷۵	۳۱,۶۵		
روش شاخص هم‌پوشانی	خطر بسیار کم	۰,۱۲	۰,۰۹	۱۴,۵۹	۰,۳۳	۱,۵۳
	خطر کم	۰,۱۶	۰,۲۷	۳۰,۹۰		
	خطر متوسط	۰,۰۶	۰,۵۱	۲۶,۶۲		
	خطر زیاد	۰,۱۳	۱,۸۹	۱۷,۰۲		
	خطر بسیار زیاد	۱,۰۴	۴,۱	۱۰,۸۷		

در نهایت با توجه به مقادیر شاخص QS برای چهار روش پهنه‌بندی، مشخص شد که به ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی با مقادیر مجموع کیفیت به ترتیب برابر با ۱/۶۵ و ۱/۵۳ کارایی نسبی بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه بررسی شده دارند.

نتیجه‌گیری

نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حاصل از به‌کارگیری ۴ روش مختلف تحلیل سلسله مراتبی، تراکم سطح، شاخص هم‌پوشانی و ارزش اطلاعاتی نشان می‌دهند که نواحی با پتانسیل خطر بسیار زیاد برای زمین لغزش عمدتاً در سه ناحیه شرق، مرکز و غرب مرز پایینی محدوده بررسی شده واقع شده‌اند. این نکته حائز اهمیت است که از این سه ناحیه، دو ناحیه مرکزی و غربی در مرز مخزن سد لتیان قرار دارند و این امر نشان‌دهنده لزوم توجه ویژه به این دو ناحیه است.

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شده در دامنه شمالی مخزن سد لتیان، با استفاده از شاخص‌های مجموع کیفیت، نسبت تراکم ودقت پیش‌بینی نشان داد که به ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی کارایی نسبی بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه بررسی شده دارند.

براساس پژوهش‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر و ارائه نتایج حاصل به صورت نقشه حاوی نواحی دارای پتانسیل زمین لغزش در محدوده بررسی شده، به منظور پیش‌گیری از وقوع حوادث ناگوار و بروز خسارت‌های مالی و جانی فراوان پیشنهاد می‌شود که اولاً از انجام فعالیت‌های انسانی غیرضروری و غیراستاندارد در این نواحی جداً خودداری شود. ثانیاً نقاط پرخطر به کمک بررسی‌های مکانیک سنگ، زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک خاک، با استفاده از روش‌های ممکن از جمله روش‌های عددی و روش‌های مبتنی بر تعادل حدی، تجزیه و تحلیل پایداری شوند. به طوری که با تعیین ضریب ایمنی نقاط با پتانسیل بالای خطر، در صورت لزوم عملیات پایداری مناسب این دامنه‌ها انجام گیرد.

منابع

۱. اردکانی ف.، غیومیان م.، جلالی ن.، ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز سد لتیان، مجله زمین‌شناسی مهندسی، جلد اول، شماره ۱ (۱۳۸۲).
۲. فیض‌نیا س.، کلارستانی ع.، احمدی ح.، صفایی م.، بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش؛ مطالعه موردی حوضه آبخیز شیرین‌رود-سد فجن، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۷۵، شماره (۱۳۸۳).
۳. سفیدگری ر.، ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز دماوند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۸۱).
۴. سیارپور م.، پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین لغزش در جنوب خلخال در استان اردبیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۷۸).
۵. فاطمی عقدا م.، غیومیان ج.، اشغلی فراهانی ع.، ارزیابی کارایی روش‌های آماری در تعیین پتانسیل خطر زمین لغزش، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم، شماره ۴۸. زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۲).
۶. شادفر ص.، قدوسی ج.، خلخالی ع.، بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دو متغیره و $LNRf$ در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، مطالعه موردی: حوزه آبخیز جنت رودبار، منابع طبیعی شماره ۷۸، بهار (۱۳۸۷).
۷. شیرانی ک.، سیف ع.، علیمزادی م.، صحت‌سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به کمک تکنیک GIS . مطالعه موردی: حوضه رودخانه ماربر، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی؛ سال یکم، شماره سوم، زمستان (۱۳۸۹).
8. Ahmadi H., Asmaly A., Feiznia S., Shariat Jafari M., "Hazard Zonation Mass Movements Using Two Methods of Multiple Regression (MR) and AHP (case study: Garmi chaye atershed)", Journal of Natural Resources, Jad 56 (2003) 326-323.

9. Shadfar S., Yamani M., Ghodousi J., Ghayomian J., "Landslide Hazard Zonation by Using AHP (case study: watershed Chalkrod Tonekabon)", *Journal of Research and the Construction of Natural Resources*, 75 (2007) 118-126.

۱۰. شرکت مهندسی مشاور مه‌آب قدس، گزارش زمین‌شناسی مهندسی، طرح علاج بخشی سد مخزنی لتیان-علاج بخشی نشست جاده لتیان-کلان (۱۳۷۷).

۱۱. نصیری ش.، پهنه‌بندی خطر ناشی از لغزش‌های حاصل از زلزله در شمال تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته زمین‌شناسی مهندسی، راهنما: د. علی ارومیه‌ای، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۳).

۱۲. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، گزارش مقدماتی رانش زمین دریاچه سد لتیان، گروه بلایای طبیعی و مدیریت بحران (۱۳۸۵).

۱۳. احمدی ر.، عطاپور ه.، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای تهران (۱۳۹۱).

۱۴. نقشه جامع راه‌های ایران، موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی (www.iranview.com) و Google Earth

15. Dai F.C., Lee C.F., Zhang X.H., "Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong", *Environmental Geology* 61 (2001) 257-271

16. Neaupane K.M., Piantanakulchai M., "Analytic network process model for landslide hazard zonation", *Engineering Geology* 85 (2006) 281-294

۱۷. محمدخان ش.، ساخت مدل منطقه‌ای خطر حرکات توده‌ای با استفاده از ویژگی‌های کیفی و تحلیل سیستم‌ها، مطالعه موردی حوزه آبخیز طالقان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران (۱۳۸۰).

۱۸. فتاحی اردکانی م.، بررسی و ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و تکنیک سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز لتیان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، مرکز آموزش عالی امام خمینی (۱۳۷۹).

19. Avanzi G.D, Giannecchini R., Puccinelli A., "Geologic and Geomorphic Factor of the Land Slides Triggered in the Cardoso T. Basin (Tuscany, Italy) by the 19th June, 1996 Intense Rainstorm", Proceeding of the 8 th International Symposium on Landslides, vol. 1 (2000) 381-386.
20. Gee M.D., "classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability", Bell, Davi H. (e). Proceeding 6th international symposium on landslids, 2 (1992) 110-121.
21. Shirani K., Chavoshi S., Ghayomian J., "Evaluation of Methods for Landslide Hazard Zonation in the Uptown Padena Semirom", Research Journal of Sciences, Isfahan University, 23(1), (2006) 23-38.
22. Shirani K., Ghayomian J., Mokhtari A., "Evaluation of Bivariate and Multivariate Statistical Methods in Landslide Hazard Zonation", Journal of Water and Watershed, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 2(2), (2005) 36-48.
23. Shariat Jafari M., Ghayomian J., "Evaluation of Bivariate Statistical Analysis Models in Sandslide Hazard Zonation", Tehran University Journal, 34 (1), (2008) 137-143.