پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنهٔ 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 ۹۲/۱۲/٦ **پذیرش** ۹۳/٤/۱٦

چکیده

در پژوهش حاضر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ 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، زاویهٔ اصطکاک مواد تشکیل دهنده و کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای احتمالی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، تشخیص داده شدند. با انطباق لایه‌های اطلاعاتی این عوامل بر نقشهٔ زمین‌لغزش‌های قدیمی منطقهٔ بررسی شده در محیط GIS، اثر هر یک از این عوامل در رخداد زمین‌لغزش‌ها ارزیابی شد و در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از هفت پارامتر مؤثر، تهیه شدند. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که نواحی با پتانسیل خطر بسیار زیاد برای زمین‌لغزش، عمدتاً در سه ناحیهٔ شرق، مرکز و غرب مرز پایینی محدودهٔ بررسی واقع شده‌اند. نکتهٔ قابل توجه آن است که از این سه ناحیه، دو ناحیهٔ 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 به‌ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی کارایی نسبی بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

مقدمه

تا به امروز روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ارائه شده است. به‌طورکلی تمام روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را می‌توان در سه رهیافت کلی در نظر گرفت: رهیافت کمی، رهیافت کیفی و هوش مصنوعی[1]. رهیافت کیفی بر پایهٔ قضاوت‌های متخصص و یا گروهی از متخصصان قرار دارد در حالی‌که رهیافت کمی برپایهٔ 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 صحرا را انجام می‌دهند. این روش طی دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ به شکل گسترده‌ای استفاده شده است. در یکی دیگر از روش‌های آنالیز کیفی، متخصصان عوامل کنترل‌کنندهٔ 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 پایهٔ چندین شاخص، رتبه‌بندی می‌شوند. روش‌های مختلفی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره وجود دارد که از معروف‌ترین آن‌ها روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP[2]) است.

دربارهٔ پهنه‌بندی خطرزمین لغزش در کشور، تحقیقات پراکنده‌ای صورت گرفته است که از جمله می‌توان به فتاحی و همکاران[۱]، فیض‌نیا و همکاران [۲]، سفیدگری [۳]، سیارپور [٤]، فاطمی عقدا و همکاران [۵]، شادفر و همکاران [٦]، و شیرانی و همکاران [۷] اشاره کرد. براساس نتایج بررسی‌های احمدی [۸] و شادفر[۹]، روشAHP روش مناسب و کارآمدی در اکثر شرایط آب و هوایی شناخته شده است.

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

1. ArtificialIntelligence 2. Analytic Hierarchy Process

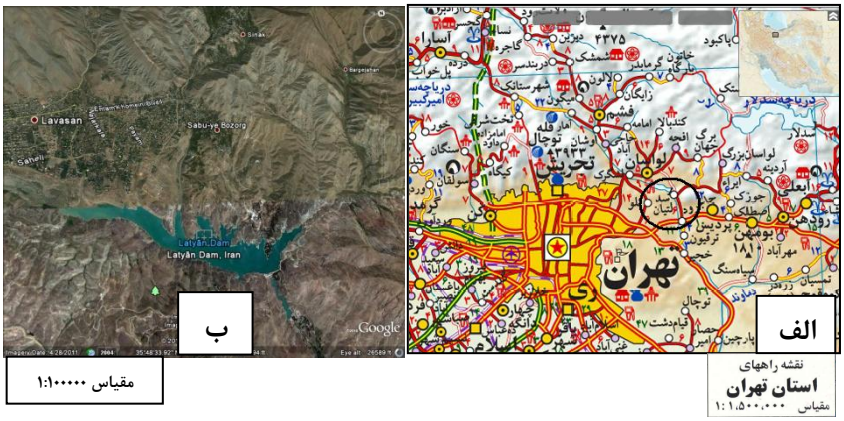
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

سدها شرکت مهندسی مهاب قدس بررسی کرده است. از جملهٔ این موارد می‌توان به بررسی و علاج بخشی نشست جادهٔ 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 به‌وسیلهٔ پایگاه ملی داده‌های علوم‌زمین کشور است [۱۲]. علیرغم اهمیت موضوع، تاکنون هیچ‌گونه بررسی جامع و کاملی در زمینهٔ بررسی پتانسیل زمین‌لغزش و آنالیز ریسک در محدودهٔ دریاچه سد لتیان صورت نگرفته است. پهنه‌بندی خطر لغزش و شناسایی زون‌های با خطر زیاد زمین‌لغزش نقش مهمی در مدیریت اراضی حاشیهٔ 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 ۱۳۸٤، از طرف دیگر بررسی‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان را در راستای اهداف و در دستور کار ضرب‌العجل شرکت آب منطقهٔ تهران قرار داده است[۱۳]. مساحت محدودهٔ بررسی شده در حدود ۲۲/۳٦ کیلومتر مربع است که با توجه به نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های تهیه شده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵ مورد لغزش با مساحت بیش از ۲/٦٦ کیلومتر مربع در محدودهٔ بررسی شده رخ داده است که این تعداد لغزش در حدود ۱۱/۹ درصد منطقهٔ 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 ۳٦ کیلومتری شمال شرق تهران واقع شده است. برای دسترسی به محدودهٔ سد باید ابتدا در مسیر جاده آسفالته تهران-جاجرود حرکت کرده پس از طی مسافتی در حدود ۳۰ کیلومتر، به سمت چپ منحرف شده و جادهٔ فرعی آسفالته به‌سمت محدودهٔ سد لتیان به مسافت ٦ کیلومتر را طی کرد. موقعیت جغرافیایی، راه‌های دسترسی وتصویر ماهواره‌ای محدودهٔ بررسی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی، ب) تصویر ماهواره‌ای منطقهٔ بررسی شده[١٤]

سد لتیان روی رودخانه‌های جاجرود و لوارک واقع شده است.حوضهٔ آب‌ریز رودخانهٔ جاجرود در محدودهٔ 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 نرمال	عرض پی	عرض تاج	ظرفیت نیروگاه
بتنی پایه‌دار	٤٥٠ متر	۱۰۷ متر	۸۰ متر	١٦١٠ متر	۹۹ متر	۹ متر	٤٥ مگاوات

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

براساس تحقیقات پایه و شناسایی عوامل اولیهٔ مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، اطلاعات لازم برای ادامهٔ تحقیقات از طریق نقشه‌های پایه‌ای موجود از جمله نقشهٔ ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی، نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقهٔ شرق تهران- سری ٦٣٦١، نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ شامل توپوگرافی، آبراهه‌ها، پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌ها و هم‌چنین نقشهٔ ۱:۲۵۰۰۰ عوارض نوزمین ساخت ارائه شده به‌وسیلهٔ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

۱:۲۰۰۰ شامل اطلاعات توپوگرافی، کاربری اراضی، جاده‌ها، آبراهه‌ها و مناطق مسکونی (تهیه شده به‌وسیلهٔ 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 ۱/٤۰۰۰۰، 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 منطقهٔ بررسی شده، براساس بررسی منابع و مشاهدات به‌دست آمده از بازدید میدانی به‌عمل آمده و بررسی‌های صحرایی، نه پارامتر لیتولوژی، گسل، آبراهه‌ها، جاده‌ها، کاربری اراضی، شیب دامنه‌ها، جهت شیب، ارتفاع و زاویهٔ اصطکاک از جمله مهم‌ترین عوامل اولیهٔ 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 به‌صورت shape file تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده با نقشهٔ پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌های قدیمی رخ داده در منطقه، قطع داده شدند و نقش هر عامل در وقوع لغزش‌ها در دامنهٔ 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 منطقهٔ بررسی شده تشخیص داده شدند تا در مراحل بعد در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شوند. در ادامه هر یک از این عوامل و نحوهٔ تأثیر آن‌ها در زمین لغزش به‌طور خلاصه تجزیه و تحلیل می‌شوند.

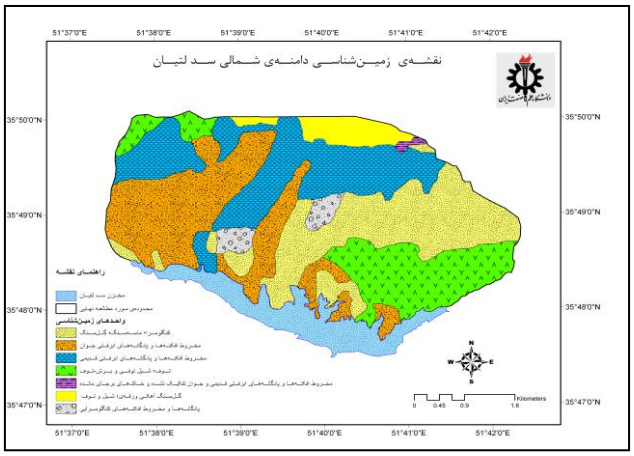
۱. لیتولوژی

پارامتر لیتولوژی (جنس سنگ‌ها) در ایجاد سطوح دارای پتانسیل لغزش، مؤثر است چنان‌که دای[1] و همکاران [۱۵] اشاره می‌کنند که فرآیند زمین‌لغزش، هم‌بستگی مستقیمی با این پارامتر دارد. بررسی سازندهای زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی شده نشان می‌دهد که نهشته‌های کواترنر، سازندهای شمشک، قرمز و الیکا بیش‌ترین سطح لغزیده را دارند و سازندهای لالون، میلا، ولکانیک های کرتاسه، فجن و ولکانیک کرج هیچ‌گونه لغزشی ندارند و از پایدارترین سازندهای

1. Dai

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

سازندهای حوضهٔ 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 لایهٔ اطلاعاتی لیتولوژی منطقهٔ بررسی شده را نشان می‌دهد.

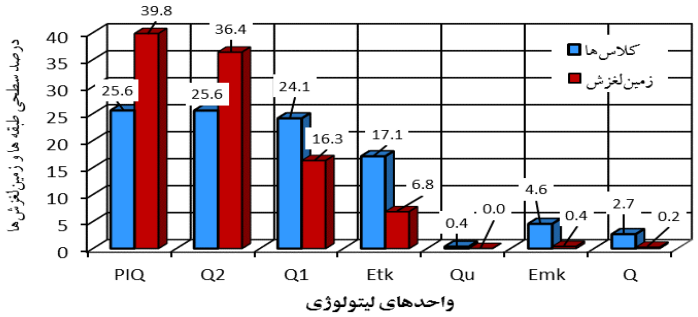


شکل ۲. لایهٔ اطلاعاتی نقشهٔ زمین‌شناسی در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان

چنان‌که در لایهٔ 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 کنگلومرایی (Q) است. با قطع دادن نقشهٔ 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 لایهٔ 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 منطقهٔ بررسی شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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



شکل ۳. نمودار تغییرات درصد سطحی طبقه‌های مختلف لایهٔ لیتولوژی به‌همراه درصد سطحی زمین‌لغزش‌های هر طبقه

۲. گسل

استفادهٔ پارامتر فاصله از گسل به‌عنوان معیاری مهم و تأثیرگذار روی زمین‌لغزش، به‌دلیل نقش مهم گسل‌های فعال در به‌وجود 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 زمین‌لغزش‌های قدیمی رخ داده در محدودهٔ سد لتیان، نشان می‌دهد که نزدیک به ۸۰ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه در فاصلهٔ کم‌تر از ۷۲۷ متری گسل‌های موجود در منطقه رخ داده است. به‌عبارت دیگر همواره طبقه‌های با فاصلهٔ کم‌تر از گسل، سطح زمین‌لغزش نسبی بیش‌تری دارند.

۳. طبقات ارتفاعی

ارتفاع ناحیهٔ بررسی شده نیز در وقوع زمین‌لغزش مؤثر است. تغییرات ارتفاع در محدودهٔ بررسی شده از ۱۵٤٤ تا ۲۰۱۷ متر در خط‌الرأس‌ها متغیر است. در محدودهٔ بررسی شده با توجه به نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها، ٦ طبقه ارتفاعی شامل ۱٦۳۰–۱۵٤٤، ۱٦۸۵–۱٦۳۰، ۱۷٤۰–۱٦۸۵، ۱۸۰۵–۱۷٤۰، ۱۸۷٤–۱۸۰۵ و ۲۰۱۷–۱۸۷٤ متر در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در منطقهٔ بررسی شده زمین‌لغزش‌ها به‌طور عمده در طبقهٔ ارتفاعی ۱٦۸۵–

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

۱٦۳۰ متر رخ داده‌اند به‌طوری‌که بیش از ۵۷ درصد سطحی لغزش‌ها در این طبقه قرار دارد. این در حالی است که این طبقه حدود ۲٦ درصد منطقه را تشکیل می‌دهد. بعد از این طبقه، طبقهٔ ارتفاعی ۱٦۳۰-۱۵٤٤ متر نسبت به بقیهٔ طبقات ارتفاعی، اهمیت بیش‌تری دارد. قابل ذکر است که در مجموع در سه طبقهٔ ارتفاعی آخر که حدود ٤۲ درصد منطقه را پوشش می‌دهند، کم‌تر از ۱ درصد سطحی زمین‌لغزش قرار دارد. بنا بر این نتیجه‌گیری می‌شود که عامل ارتفاع باید به‌عنوان یک عامل مهم در پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقهٔ بررسی شده در نظر گرفته شود.

٤. زاویهٔ شیب و جهت شیب

زاویهٔ شیب سطح زمین از عوامل اصلی پتانسیل گسیختگی دامنه‌ها به‌شمار می‌رود و به دوصورت طبیعی و مصنوعی تغییر می‌کند. افزایش شیب، وضعیت تعادل مواد سازندهٔ دامنه را برهم زده و موجب بالا رفتن تنش‌های برشی در مواد دامنه می‌شود. برای تهیهٔ لایهٔ اطلاعاتی زاویهٔ شیب و جهت شیب منطقه، از نقشهٔ توپوگرافی استفاده شد. برای منطقهٔ بررسی شده، عامل شیب به ۵ طبقه ۵-۰، ۱۱-۵، ۱۸-۱۱، ۲٦-۱۸ و ۵۳-۲٦ تقسیم شد. ارزیابی‌ها نشان داد که طبقه‌های شیب ۱۱-۵ درجه و ۱۵-۱۱ درجه پتانسیل بیش‌تری برای رخداد زمین‌لغزش دارند. هم‌چنین سه طبقهٔ دیگر شیب از نظر زمین‌لغزش دارای اهمیت تقریباً یک‌سانی هستند. برای جهت شیب، ۸ جهت شمال، شمال‌شرقی، شرق، جنوب‌شرقی، جنوب، جنوب‌غربی، غرب و شمال‌غربی در نظر گرفته شد. ارزیابی‌ها نشان داد که به‌ترتیب جهت‌های جنوب غربی و غرب از نظر رخداد زمین‌لغزش اهمیت بیش‌تری دارند.

۵. کاربری اراضی

در محدودهٔ بررسی شده، ٤ نوع کاربری عمده زراعی، مرتع،جنگل و مسکونی دیده می‌شود. قابل ذکر است که بیش‌تر منطقه به شکل مرتع است و کاربری عمدهٔ بعدی منطقه، کاربری مسکونی است. بررسی‌ها نشان داد که کاربری اراضی مرتع پتانسیل بیش‌تری برای زمین‌لغزش دارد. به‌طوری‌که بیش از ٦۱ درصد سطحی زمین‌لغزش‌های منطقهٔ بررسی شده در این طبقه قرار داد. نتیجهٔ به‌دست آمدهٔ فتاحی و همکاران [۱]که برای کل حوزهٔ آبخیز لتیان به‌دست آمده است، با این نتیجه مطابقت دارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

٦. 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 ناپایدارکنندهٔ دامنه‌ها، سبب بروز ناپایداری می‌شوند. در منطقهٔ بررسی شده جاده‌ها در کل منطقه گسترده شده‌اند. به‌طوری‌که بعد از ایجاد لایهٔ رستری فاصله از جاده، مشخص شد که تقریباً تمام منطقهٔ بررسی شده در فاصلهٔ 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 [١٦]. برای این عامل، به‌کمک نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش پیکسل‌ها، ۵ طبقه شامل ٣٦٨-٠، ٧٣٦-٣٦٨، ١١٣٤-٧٣٦، ١٦٠٩-١١٣٤ و ٢٤٧٢-١٦٠٩ متر تعریف شد. در مرحلهٔ بعد این لایه با لایهٔ زمین‌لغزش‌ها قطع داده شد. نتایج نشان داد که با فاصله گرفتن از آبراهه‌های اصلی، درصد سطحی زمین‌لغزش به‌سرعت کاهش یافته است. به‌طوری‌که بیش از ٦٣ درصد سطحی زمین‌لغزش در طبقه با فاصلهٔ کم‌تر از ٣٦٨ متر از رودخانه واقع شده است. از طرفی بیش از ٩٤ درصد سطحی کل لغزش‌ها با فاصلهٔ کم‌تر از ٧٣٦ متر از آبراهه‌های اصلی (یعنی در دو طبقه اول) واقع شده‌اند. این امر نشان‌دهندهٔ اهمیت زیاد این عامل در تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی است.

۸. زاویهٔ اصطکاک

زاویهٔ 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 لایهٔ اطلاعاتی مجزا استفاده شود. بدین‌منظور از نقشهٔ زاویهٔ اصطکاک ارائه شده به‌وسیهٔ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شد. به‌طوری‌که برای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

زاویهٔ اصطکاک چهار ردهٔ ۳۳-۱۸، ۳٦-۳۳، ٤۰-۳٦ و ٤٦-٤۰ درجه تعریف شد و سنگ‌های مختلف با توجه به زاویهٔ اصطکاک در این چهار طبقه قرار گرفتند اما به‌دلیل عدم انطباق مناسب این لایه با لایهٔ زمین‌لغزش‌ها، این عامل از بین عوامل مؤثر اولیه حذف شد و در تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی استفاده نشد.

پهنه‌بندی به‌روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP)

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

۱. ایجاد ماتریس مقایسه‌های زوجی برای عوامل مؤثر در زمین‌لغزش

در روشAHP به‌منظور وزن‌دهی به‌عوامل مؤثر، بین آن‌ها مقایسه‌های زوجی صورت می‌گیرد. به‌این صورت که ابتدا با استفاده از قضاوت‌های کارشناسی مبتنی بر بررسی‌های پژوهش‌گر و نیز سایر تحقیقات صورت گرفتهٔ متخصصان دیگر در منطقهٔ بررسی شده، اقدام به رتبه‌بندی عوامل به‌ترتیب از اهمیت (اولویت) ضعیف تا اهمیت حداکثر می‌شود. سپس این رتبه‌ها به‌کمک جدول ۲ که مقیاس نمره‌دهی مقایسه‌های زوجی را نشان می‌دهد، به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل می‌شود. قابل ذکر است که همهٔ مقایسه‌ها به‌صورت زوجی انجام می‌شود. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده می‌کنند به‌گونه‌ای 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 رتبهٔ عامل دوم بر عامل اول ۱/۲ خواهد بود. در ادامه مطابق جدول ۳، ماتریس n*n تشکیل می‌شود که n تعداد عوامل مؤثر انتخاب شده است. درایه‌های این ماتریس بر اساس مقایسه‌های صورت گرفته در مرحلهٔ قبل پر می‌شود. به‌عبارتی درایه‌های این ماتریس اهمیت نسبی هر عنصر نسبت به عناصر دیگر را مشخص می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

جدول ۲. مقیاس نمره‌دهی مقایسه‌های زوجی

شرح	تعریف	نمره
دو عنصر، اهمیت یک‌سانی دارند.	اهمیت یک‌سان	۱
یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری متوسطی دارد	برتری متوسط	۳
یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری زیادی دارد	برتری زیاد	۵
یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری بسیار زیادی دارد	برتری بسیار زیاد	۷
یک عنصر نسبت به عنصر دیگر، برتری فوق‌العاده زیادی دارد	برتری فوق‌العاده زیاد	۹
موارد بینابین در قضاوت‌ها	ارزش‌های بینابین	۲،٤، ٦ و ۸

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

عامل	لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب
لیتولوژی	۱	۲	۳	٤	۵	۷	۹
کاربری اراضی	۰,۵	۱	۲	۳	۳	٤	۸
آبراهه	۰,۳۳۳	۰,۵	۱	۳	٤	۵	۸
شیب	۰,۲۵	۰,۳۳۳	۰,۳۳۳	۱	۲	۳	٦
ارتفاع	۰,۲	۰,۳۳۳	۰,۲۵	۰,۵	۱	۲	۷
گسل	۰,۱٤۳	۰,۲۵	۰,۲	۰,۳۳۳	۰,۵	۱	٤
جهت شیب	۰,۱۱۱	۰,۱۲۵	۰,۱۲۵	۰,۱٦۷	۰,۱٤۳	۰,۲۵	۱
مجموع ستون	۲,۵۳۷	٤,۵٤۲	٦,۹۰۸	۱۲	۱۵,٦٤۳	۲۲,۲۵	٤۳

باید توجه کرد که در ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی، سطر i با ستون j مقایسه می‌شود. بنابراین همهٔ 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 به‌طوری‌که مقادیر عناصر هر ستون بر مجموع به‌دست آمده برای همان ستون تقسیم می‌گردد. در حقیقت طی این مرحله عناصر ماتریس، بی‌بعد می‌شوند. در مرحلهٔ بعد میانگین حسابی مقادیر عناصر در هر سطر از ماتریس نرمالیزه شده محاسبه می‌گردد تا وزن عاملی که در آن سطر قرار دارد به‌دست آید که به وزن‌های نسبی عوامل، معروف هستند. در جدول ٤ نتایج حاصل از نرمالیزه کردن ماتریس مقایسه‌های زوجی عوامل مؤثر نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

جدول ٤. ماتریس نرمالیزه شدهٔ مقایسه‌های زوجی و محاسبهٔ وزن عوامل با استفاده از روش میانگین حسابی

عامل	لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب	میانگین هر سطر
لیتولوژی	۰,۳۹٤	۰,٤٤	۰,٤۳٤	۰,۳۳۳	۰,۳۲	۰,۳۱٥	۰,۲۰۹	۰,۳٥
کاربری اراضی	۰,۱۹۷	۰,۲۲	۰,۲۹	۰,۲٥	۰,۱۹۲	۰,۱۸	۰,۱۸٦	۰,۲۲
آبراهه	۰,۱۳۱	۰,۱۱	۰,۱٤٥	۰,۲٥	۰,۲٥٦	۰,۲۲٥	۰,۱۸٦	۰,۱۹
شیب	۰,۰۹۹	۰,۰۷۳	۰,۰٤۸	۰,۰۸۳	۰,۱۲۸	۰,۱۳٥	۰,۱٤	۰,۱
ارتفاع	۰,۰۷۹	۰,۰۷۳	۰,۰۳٦	۰,۰٤۲	۰,۰٦٤	۰,۰۹۰	۰,۱٦۳	۰,۰۸
گسل	۰,۰٥٦	۰,۰٥٥	۰,۰۲۹	۰,۰۲۸	۰,۰۳۲	۰,۰٤٥	۰,۰۹۳	۰,۰٥
جهت شیب	۰,۰٤٤	۰,۰۲۸	۰,۰۱۸	۰,۰۱٤	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	۰,۰۲۳	۰,۰۲

۳. محاسبه نرخ ناسازگاری داده‌ها

نرخ ناسازگاری[1]، معیاری برای سنجش معناداری و دقت داده‌های وارد شده است. به‌عبارت دیگر به‌منظور ارزیابی مقایسه‌های زوجی صورت گرفته، سنجش میزان ناسازگاری ضروری است. برای این منظور این گام‌های به‌ترتیب انجام می‌گیرد:

گام۱: محاسبهٔ بردار مجموع وزنی (WSV[2]): ماتریس مقایسه‌های زوجی (D) در بردار وزن‌های نسبی ضرب شد. به بردار به‌دست آمده بردار مجموع وزنی گفته می‌شود (جدول ۵):

$$WSV=D*W$$

گام۲: محاسبهٔ بردار سازگاری (CV): عناصر بردار مجموع وزنی بر بردار وزن‌های نسبی تقسیم شد. به بردار حاصل، بردار سازگاری گفته می‌شود (جدول ۵).

گام۳: محاسبهٔ بزرگ‌ترین مقدار ویژهٔ ماتریس مقایسه‌های زوجی (λ_{max}): برای محاسبهٔ بزرگ‌ترین مقدار ویژهٔ ماتریس مقایسه‌های زوجی، میانگین عناصر بردار سازگاری محاسبه شد. میانگین عناصر بردار سازگاری برابر با مقدار ۷/٤۱ به‌دست آمد.

گام٤: محاسبهٔ شاخص ناسازگاری[3] (II): شاخص ناسازگاری بدین‌صورت محاسبه شد:

جدول ۵. نتایج محاسبه‌های بردار مجموع وزنی و بردار سازگاری

بردار مجموع وزنی	۰,۱٤۹	۰,۳۳۹	۰,٥٤٦	۰,۷۲۹	۱,۳۹٦	۱,٦۳۳	۲,٦۲۲
بردار سازگاری	۷,٤۳۷	۷,۳٦٦	۷,۳۸	۷,٤۳٤	۷,٤۲٦	۷,٤۲۳	۷,٤۰۷

1. Consistency Ratio 2. weighted sum vector 3. Consistency Index

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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

گام۵: محاسبهٔ نرخ ناسازگاری (IR): نرخ ناسازگاری بدین‌صورت محاسبه شد:

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

که IRI (شاخص ناسازگاری تصادفی) مقداری است که از جدول ٦ استخراج می‌شود. مقادیر این جدول بر پایهٔشبیه‌سازی تعداد زیادی از ماتریس‌های مقایسهٔ زوجیn*n به‌دست 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 به‌این‌که برای مقایسه‌های زوجی صورت گرفته، میزان سازگاری برابر با ۰/۰۵ به‌دست 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 ٦. نتایج محاسبات شاخص ناسازگاری تصادفی

n	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
IRI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲٤	۱/۳۲	۱/٤۱	۱/٤٥	۱/٥۱

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

لیتولوژی	کاربری اراضی	آبراهه	شیب	ارتفاع	گسل	جهت شیب
۰,۳٥٤	۰,۲۲	۰,۱۸۸	۰,۰۹۸	۰,۰۷٤	۰,۰٤٦	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.

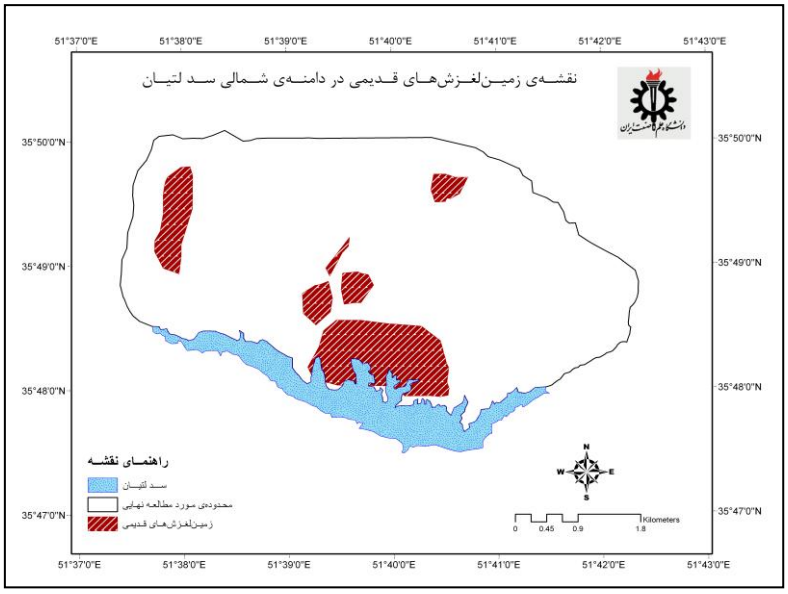
بعد از مشخص شدن وزن هر یک از عوامل مؤثر در زمین‌لغزش، لازم است تا وزن هریک از طبقه‌های این عوامل نیز تعیین شود. چنان‌که قبلا نیز اشاره شد برای طبقه‌بندی عوامل کمی مانند شیب، ارتفاع، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه، از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش پیکسل‌ها وعوامل کیفی مانند جهت شیب، کاربری اراضی و زمین شناسی با توجه به تقسیم بندی‌های مشخص هرکدام از این عوامل، طبقه‌بندی صورت گرفته

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

است. با در نظرگرفتن این طبقه‌بندی‌ها، وزن همهٔ طبقه‌های عواملی کـه در پهنه‌بندی، اهمیت زیادی دارند، تعیین شد. در ادامهٔ نحوهٔ وزن‌دهی به طبقه‌های مختلف مربوط به عوامل، آورده شده است.

٤. محاسبهٔ وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در روش AHP

به‌منظور تعیین مقادیر وزن طبقه‌های عوامل مختلف، ابتدا نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها (شکل ٤) با هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل مؤثر مطابقـت داده شد. بدین‌وسیله تراکم سطحی زمین‌لغزش‌ها در طبقه‌های مختلف هر یک از عوامل مؤثر به‌دست آمد. به‌عنوان 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 بـین ۰–۱۰۰ در نظر گرفته می‌شـود [۱۷]. بدین‌ترتیب برای طبقه‌ای که دارای بیش‌ترین

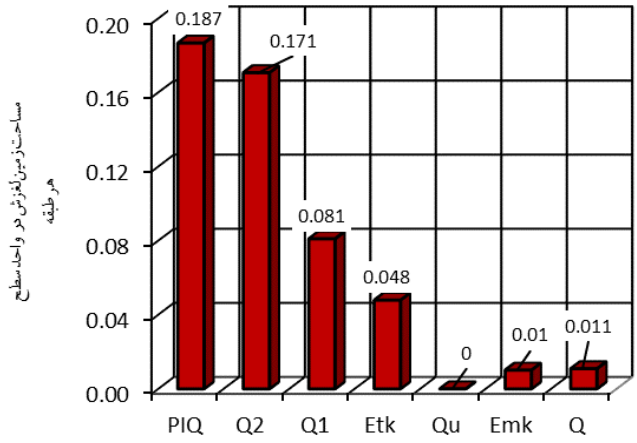


شکل ٤. نقشهٔ پراکنش سطحی زمین‌لغزش‌های قدیمی منطقهٔ بررسی شده

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

میزان سطح لغزش، به‌دست می‌آید. در جدول ۸ وزن‌های محاسبه شدهٔ طبقه‌های مختلف همهٔ عوامل مؤثر در زمین لغزش آورده شده است.



شکل ۵. نمودار تراکم سطحی زمین‌لغزش در طبقه‌های مختلف لیتولوژی

جدول ۸. اطلاعات و وزن‌های طبقه‌های عوامل مؤثر در زمین‌لغزش

شیب		فاصله از گسل		فاصله از آبراهه		ارتفاع		جهت شیب		کاربری اراضی		لیتولوژی	
کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن	کلاس	وزن
0-5	62.4	0-727	100	0-368	100	1544-1630	100	N	72.7	جنگلی	50.2	PIQ	۱۰۰،۰
5-11	100	727-1874	62.5	368-736	51.1	1630-1685	81.8	NE	62.2	زراعی	94.4	Q2	۹۱،٤
11-18	93.1			736-1134	12.1	1685-1740	34.3	E	75.5	مرتع	100	Q1	٤۳،٤
18-26	63.8			1134-1609	6.7	1740-1805	0.0	SE	100	مسکونی	49.7	Etk	۲٥،٦
26-53	60.3			1609-2472	0	1805-1874	1.6	S	46.4			Qu	۰،۰
								SW	40.3			Emk	٥،٤
								W	56.5			Q	٥،۸
								NW	48.2				

۵. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش AHP

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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

$$W = X_1x_i + X_2x_i + X_3x_i + X_4x_i + X_5x_i + X_6x_i + X_7x_i \qquad (۱)$$

در این رابطه، Xها وزن مربوط به‌عوامل ۷ گانه است و xها وزن مربوط به طبقه‌های مختلف این عوامل هستند. مقدار وزن نهایی عددی در بازه۱۰۰–۰ است.

محاسبه‌های مورد نیاز، اعمال صحیح وزن‌های به‌دست آمده برای تک تک پارامترها و به‌دست آوردن خروجی مدل یعنی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از نرم افزار ArcGIS10 انجام شد. در شکل ٦ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان با روش تحلیل سلسله مراتبی نشان داده شده است. برای طبقه‌بندی خطر زمین‌لغزش نیز از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها استفاده شده و ۵ طبقه با واژه‌های توصیفی خطر بسیار کم، خطرکم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر بسیار زیاد در نظر گرفته شد.

نمودار مربوط به درصد سطحی طبقه‌های خطر و هم‌چنین درصد سطحی زمین‌لغزش‌ها در هر کدام از این طبقه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود حدود ٤۰ درصد از کل زمین‌لغزش‌ها 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 زمین‌لغزش‌ها را شامل می‌شوند.

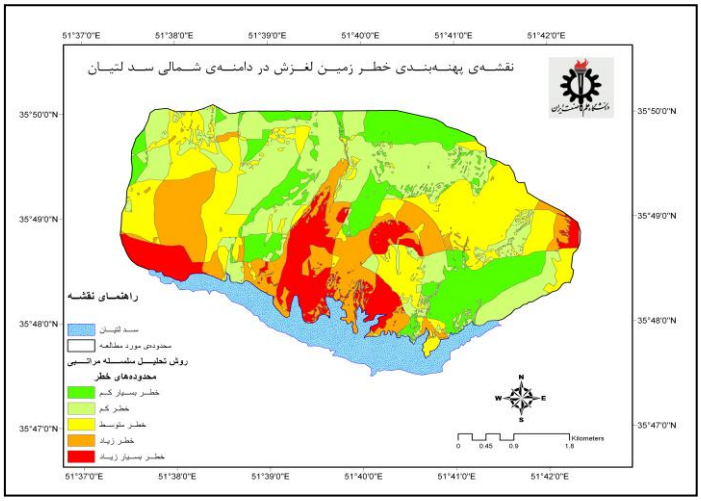
پهنه‌بندی به‌روش تراکم سطح

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

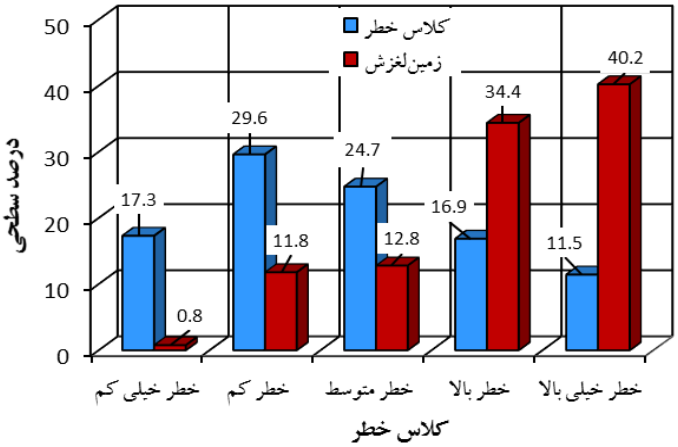
$$W = 1000\left(\frac{A}{B}\right) - 1000\left(\frac{C}{D}\right) \qquad (۲)$$

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]



شکل ٦. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان به‌کمک روش تحلیل سلسله مراتبی



شکل ۷. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها درمقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش AHP

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

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌روش تراکم سطح در ۵ طبقهٔ 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 نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌روش تراکم سطح را نشان می‌دهد.

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

	عوامل مؤثر							
طبقه	زمین‌شناسی	کاربری اراضی	فاصله از آبراهه	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	جهت شیب
۱	٦٦,۷	-٤۰,۹۵	۹۹,٦٦	۱٤,٦۲	-۲۲,۱۸	۱۸٤,۰٤	۲۱,۸٦
۲	۵۰,٦۸	۲۸,۵٦	-۷,۷۱	-۳۵,۸۱	۳٦,۸	۱۲۸,۷۸	۱,۵۳
۳	-۳۸,۹۹	۳۷,۳۳	-۹۳,۳۸		۲٦,۰۳	-۱۵,۷۲	۲۷,٤۱
٤	-۷۲,۱۱	-٤۱,۸۵	-۱۰۵,۲۵		-۱۹,۸۹	-۱۱۹,۹۸	۷۵,۲٤
۵	-۱۱۹,۹۸		-۱۱۹,۹۸		-۲۵,۳۹	-۱۱۵,۱۲	-۲۹,٤۳
٦	-۱۰۹,۸۷					-۱۱۹,۱۷	-٤۱,۲۹
۷	-۱۰۹,۱						-۹,٦۳
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 محدودهٔ بررسی شده واقع شده‌اند. در روش تراکم سطح، در کل دو طبقه با خطر بسیار کم و خطر کم که بیش از ۵۲ درصد منطقهٔ 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 ٤۰ درصد زمین‌لغزش‌ها تمرکز دارند. خود این طبقه حدود ۱۰ درصد از منطقه را اشغال کرده است.

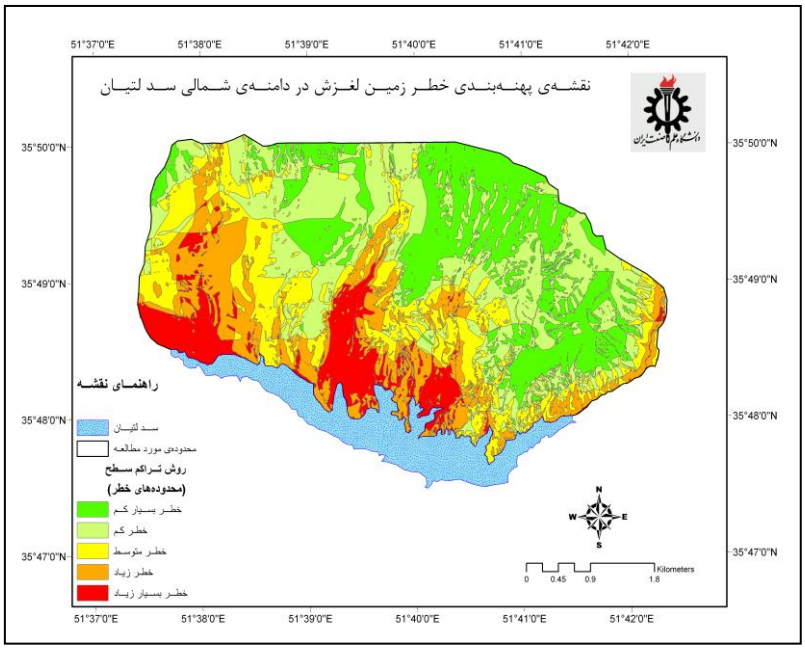
پهنه‌بندی به‌روش ارزش اطلاعاتی

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

$$W_{inf} = \mathrm{Ln}\left[\frac{\left(\frac{A}{B}\right)}{\left(\frac{C}{D}\right)}\right] \quad (۳)$$

که در این رابطه Winf، وزن مربوط به هر طبقه؛ A، مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر طبقه؛ B، مساحت هر طبقه؛ C، مساحت زمین‌لغزش‌های کل منطقهٔ بررسی شده و D، مساحت کل منطقهٔ 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 رابطهٔ ارزش اطلاعاتی به‌دست آمده‌اند در جدول ۱۰، خلاصه شده است:

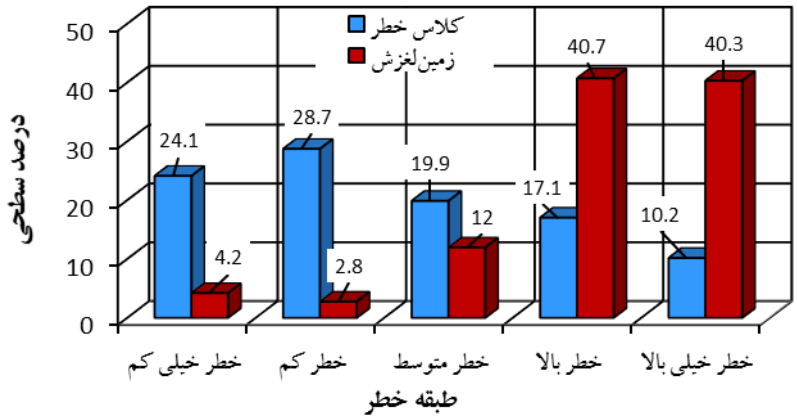


شکل ۸. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان به‌کمک روش تراکم سطح

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

جمع کردن ارزش پیکسل‌های عوامل مختلف، نقشهٔ نهایی خطر زمین لغزش به‌روش ارزش اطلاعاتی در ۵ طبقهٔ خطر تهیه شد (شکل ۱۰).



شکل ۹. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها درمقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش تراکم سطح

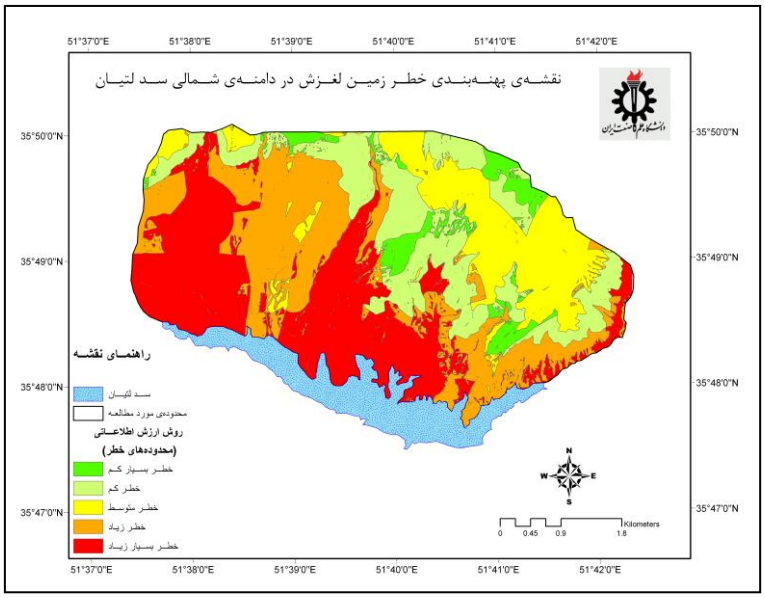
جدول ۱۰. وزن طبقه‌های مختلف عوامل مؤثر در زمین لغزش به روش ارزش اطلاعاتی

	عوامل مؤثر							
طبقه	زمین‌شناسی	کاربری اراضی	فاصله از آبراهه	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	جهت شیب
۱	۰,٤٤۲	-۰,٤۱۸	۰,٦۰٥	۰,۱۱٥	-۰,۲۰٤	۰,۹۳	۰,۱٦۷
۲	۰,۳٥۲	۰,۲۱٤	-۰,۰٦٦	-۰,۳٥٤	۰,۲٦۸	۰,۷۲۹	۰,۰۱۳
۳	-۰,۳۹۳	۰,۲۷۱	-۱,٥۰٦		۰,۱۹٦	-۰,۱٤	۰,۲۰٦
٤	-۰,۹۱۹	-۰,٤۲۹	-۲,۰۹۷		-۰,۱۸۱	-۱۰,۰۲۲	۰,٤۸۷
٥	-٥,۹۳۹		-۷,۹۳۷		-۰,۲۳۸	-۳,۲۰٥	-۰,۲۸۱
٦	-۲,٤۷٤					-٤,۹۹۲	-۰,٤۲۲
۷	-۲,٤						-۰,۰۸٤
۸							-۰,۲٤٤

شکل ۱۱، نمودار اطلاعات مربوط به طبقه‌بندی نقشهٔ پهنه‌بندی و زمین‌لغزش‌های رخداده در آن‌ها را نشان می‌دهد. در روش ارزش اطلاعاتی بیش از ۸۷ درصد سطحی زمین‌لغزش‌ها 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

این طبقه به سطح خود طبقه حدود ۰/۳۳ است در حالی که این نسبت برای روش شاخص هم‌پوشانی ۰/٤۹ است.



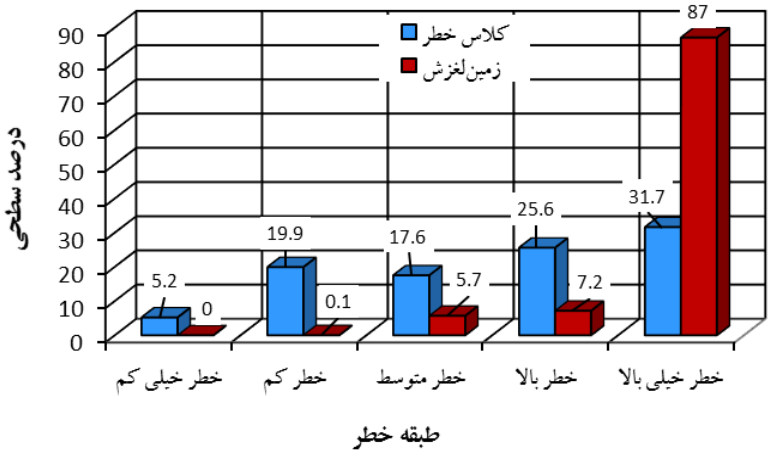
شکل ۱۰. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان به‌کمک روش ارزش اطلاعاتی

پهنه‌بندی به‌روش شاخص هم‌پوشانی

در روش شاخص هم‌پوشانی وزن مربوط به کلاس‌های مختلف عوامل مؤثر بین ۰ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. بدین‌ترتیب 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 بقیهٔ کلاس‌ها با توجه به مقدار تراکم زمین لغزش در طبقه مربوطه، به‌صورت 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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 منطقهٔ 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 بدین‌صورت تعیین شد:
زمین‌شناسی=۱۰؛ کاربری اراضی=۷؛ فاصله از آبراهه=٦؛ فاصله از گسل=٤؛ شیب=۵؛ ارتفاع=٦ و جهت شیب=۲.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها درمقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به‌روش ارزش اطلاعاتی

بعد از اعمال وزن‌های مرتبط با طبقه‌های مختلف به لایه‌های اطلاعاتی، وزن نهایی پیکسل‌ها با استفاده از رابطهٔ (٤) حاصل شد و نقشهٔ نهایی تهیه شد (شکل ۱۲). این نقشه نیز با استفاده از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها به ۵ طبقهٔ خطر تقسیم شد.

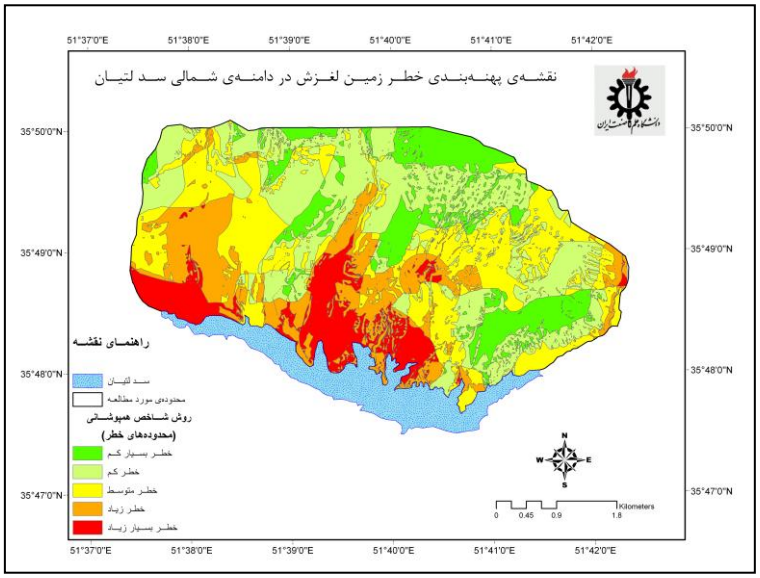
$$W=10*A+7*B+6*C*4*D+5*E+6*F+2*G \qquad (٤)$$

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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

عوامل مؤثر / طبقه	لیتولوژی	کاربری اراضی	فاصله از آبراهه	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	جهت شیب
۱	۱۰	۵,۰۲	۱۰	۱۰	٦,۲٤	۱۰	۷,۲۷
۲	۹,۱٤	۹,٤٤	۵,۱۱	٦,۲۵	۱۰	۸,۱۸	٦,۲۲
۳	۹,۳٤	۱۰	۱,۲۱		۹,۳۱	۳,٤۳	۷,۵۵
٤	۲,۵٦	٤,۹۷	۰,٦۷		٦,۳۸	۰	۱۰
۵	۰		۰		٦,۰۳	۰,۱٦	۹,٦٤
٦	۰,۵٤					۰,۰۳	٤,۰۳
۷	۰,۵۸						۵,٦۵
۸							٤,۸۲

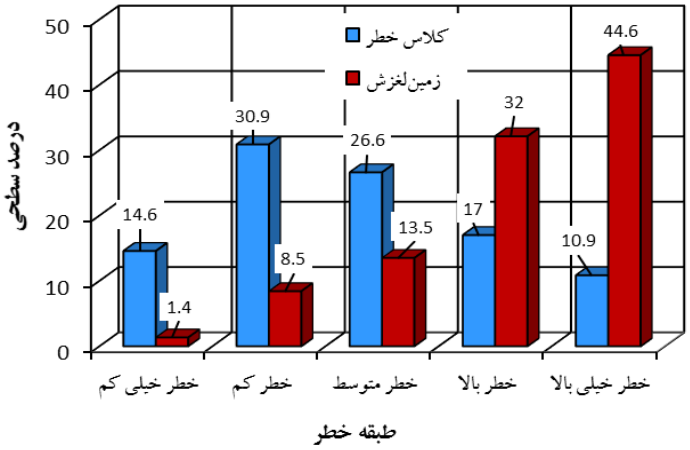


شکل ۱۲. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان به‌کمک روش شاخص هم‌پوشانی

در نمودار پراکندگی شکل ۱۳ درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها در مقابل درصد سطحی طبقه‌های مختلف خطر در روش شاخص هم‌پوشانی نشان داده شده است. در این روش بیش از ۷٦ درصد زمین‌لغزش‌ها در دو طبقه خطر زیادو 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

در دو طبقه با خطر کم و بسیار کم (در مجموع حاوی بیش از ٤٥ درصد سطحی منطقه) کم‌تر از ۱۰ درصد زمین‌لغزش‌ها رخ داده است.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات درصد وقوع زمین‌لغزش‌هادرمقابل درصد سطحی طبقه‌های خطر در نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به‌روش 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 زمین لغزش، با استفاده از شاخص‌های مجموع کیفیت (QS)[1]، نسبت تراکم (DR)[2] ودقت پیش‌بینی (P)[3] پرداخته شد و روش‌های متناسب‌تر و با انطباق بیش‌تر بر شرایط منطقه بررسی شده، انتخاب شد.

به‌طورکلی شاخص‌های نسبت تراکمی(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 تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی در منطقهٔ بررسی شده کاربرد دارند. برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکمی محاسبه شود. برای این منظور از رابطهٔ (۵) استفاده شد:

$$DR = \frac{\left(\frac{Si}{Ai}\right)}{\left(\frac{\sum_1^n S_i}{\sum_1^n A_i}\right)} \qquad (۵)$$

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

که در آن S_i، مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر طبقه خطر؛ A_i، مساحت iامین طبقه خطر دریک 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 ردهٔ دارای نسبت تراکمی ۲، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه hsj. بنا بر این هرچه تفکیک بین طبقه‌های خطر به‌وسیلهٔ شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش (و در نتیجه نقشهٔ حاصل) دارای دقت یا مطلوبیت بیش‌تری است[۷].

مقدار مجموع کیفیت (QS) از طریق رابطهٔ (٦) محاسبه شد [۷]، [۲۰]-[۲۳]. نتایج به‌دست آمده برای مجموع کیفیت نیز در جدول ۱۱ خلاصه شده است.

$$QS = \sum_{i=1}^{n} (DR - 1)^2 \times S \qquad (٦)$$

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 زیادبه مساحت کل آن پهنه‌ها که از رابطهٔ (۷) محاسبه شد (جدول ۱۱):

$$P = \frac{K_S}{S} \qquad (۷)$$

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، به‌ترتیب 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

جدول۱۲. شاخص‌های مجموع کیفیت، نسبت تراکمی و دقت پیش‌بینی روش‌های مختلف پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقهٔ 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	۰,۱٦	۰,۰٤	۱۷,۳۱	۰,۳۲	۱,۲۳
	خطر کم	۰,۱۱	۰,٤	۲۹,٦۲		
	خطر متوسط	۰,۰٦	۰,۵۲	۲٤,۷٤		
	خطرزیاد	۰,۱۸	۲,۰٤	۱٦,۸۸		
	خطر بسیار زیاد	۰,۷۲	۳,۵۲	۱۱,٤٤		
روش تراکم سطح	خطر بسیار کم	۰,۱٦	۰,۱۷	۲٤,۱٤	۰,۳٦	۱,٦۵
	خطر کم	۰,۲۳	۰,۱	۲۸,۷۳		
	خطر متوسط	۰,۰۳	۰,٦	۱۹,۸۹		
	خطر زیاد	۰,۳۳	۲,۳۹	۱۷,۰٤		
	خطر بسیار زیاد	۰,۸۹	۳,۹٦	۱۰,۱۹		
روش ارزش اطلاعاتی	خطر بسیار کم	۰,۰۵	۰	۵,۲٤	۰,۲	۱,٤۳
	خطر کم	۰,۲۰	۰	۱۹,۹٤		
	خطر متوسط	۰,۰۸	۰,۳۲	۱۷,۵٤		
	خطر زیاد	۰,۱۳	۰,۲۸	۲۵,٦۳		
	خطر بسیار زیاد	۰,۹۷	۲,۷۵	۳۱,٦۵		
روش شاخص هم‌پوشانی	خطر بسیار کم	۰,۱۲	۰,۰۹	۱٤,۵۹	۰,۳۳	۱,۵۳
	خطر کم	۰,۱٦	۰,۲۷	۳۰,۹۰		
	خطر متوسط	۰,۰٦	۰,۵۱	۲٦,٦۲		
	خطرزیاد	۰,۱۳	۱,۸۹	۱۷,۰۲		
	خطر بسیار زیاد	۱,۰٤	٤,۱	۱۰,۸۷		

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

در نهایت با توجه به مقادیر شاخص QS برای چهار روش پهنه‌بندی، مشخص شد که به‌ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی با مقادیر مجموع کیفیت به‌ترتیب برابر با ۱/٦٥ و ۱/۵۳ کارایی نسبی بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ بررسی شده دارند.

نتیجه‌گیری

نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حاصل از به‌کارگیری ٤ روش‌مختلف تحلیل سلسله مراتبی، تراکم سطح، شاخص هم‌پوشانی و ارزش اطلاعاتی نشان می‌دهند که نواحی با پتانسیل خطر بسیار زیاد برای زمین‌لغزش عمدتاً در سه ناحیهٔ شرق، مرکز و غرب مرز پایینی محدودهٔ بررسی شده واقع شده‌اند. این نکته حائز اهمیت است که از این سه ناحیه، دو ناحیهٔ مرکزی و غربی در مرز مخزن سد لتیان قرار دارند و این امر نشان‌دهندهٔ لزوم توجه ویژه به این دو ناحیه است.

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

براساس پژوهش‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر و ارائه نتایج حاصل به‌صورت نقشهٔ حاوی نواحی دارای پتانسیل زمین‌لغزش در محدودهٔ بررسی شده، به‌منظور 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 به‌کمک 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. به‌طوری‌که با تعیین ضریب ایمنی نقاط با پتانسیل بالای خطر، در صورت لزوم عملیات پایدارسازی مناسب این دامنه‌ها انجام گیرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

منابع

۱. اردکانی ف.، غیومیان م.، جلالی ن.، *ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضهٔ آبخیز سد لتیان*، مجله زمین‌شناسی مهندسی، جلد اول، شمارهٔ ۱ (۱۳۸۲).

۲. فیض‌نیا س.، کلارستانی ع.، احمدی ح.، صفایی م.، *بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش؛ مطالعهٔ موردی حوضهٔ آبخیز شیرینرود–سد فجن*، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، جلد ۷۵، شمارهٔ (۱۳۸۳).

۳. سفیدگری ر.، *ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزهٔ آبخیز دماوند*،پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۸۱).

٤. سیارپور م.، *پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در جنوب خلخال در استان اردبیل*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۷۸).

۵. فاطمی عقدا م.، غیومیان ج.، اشقلی فراهانی ع.، *ارزیابی کارایی روش‌های آماری در تعیین پتانسیل خطر زمین لغزش*، فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم، شمارهٔ٤٨. زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۲).

٦. شادفر ص.، قدوسی.ج، خلخالی ع.، *بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دو متغیره و LNRF در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، مطالعهٔ موردی: حوزهی آبخیز جنت رودبار*، منابع طبیعی شماره ۷۸، بهار (۱۳۸۷).

۷. شیرانی ک.، سیف ع.، علیمرادی م.، *صحت‌سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR)در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به‌کمک تکنیک GIS. مطالعه موردی: حوضهٔ رودخانه ماربر*، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی؛ سال یکم، شماره سوم، زمستان (۱۳۸۹).

8. Ahmadi H., Asmaly A., Feiznia S., Shariat Jafari M., "Hazard ZonationMass Movements Using Two Methods of Multiple Regression (MR) and AHP (case study: Garmi chayei atershed)", Journal of Natural Resources, Jad 56 (2003) 326-323.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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

۱۰. شرکت مهندسی مشاور مهاب 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*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد در رشته ی زمین‌شناسی مهندسی، راهنما: د. علی ارومیه‌ای، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔعلوم، 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 دامنهٔ شمالی مخزن سد لتیان با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)*، وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای تهران (۱۳۹۱).

۱٤. نقشهٔ جامع راه‌های ایران، موسسهٔ 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، مطالعهٔ موردی حوزهٔ آبخیز طالقان*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران (۱۳۸۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]

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

19. Avanzi G.D, Giannecchini R., Puccinelli A., "Geologic and Geomorphic Factorof the Land Slides Triggered in the Cardoso T. Basin (Tuscany, Italy) by the 19th June, 1996 IntenseRainstorm", 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 ofpredictive capability", Bell, Davi H. (e). Proceeding 6th international symposiumon landslids, 2 (1992) 110-121.
21. Shirani K., Chavoshi S., Ghayomian J., "Evaluation of Methods forLandslide Hazard Zonation in the Uptown Padena Semirom", Research Journal ofSciences, Isfahan University, 23(1), (2006) 23-38.
22. Shirani K., Ghayomian J., Mokhtari A., "Evaluation of Bivariate andMultivariate Statistical Methods in Landslide Hazard Zonation", Journal of Waterand Watershed, Soil Conservation and Watershed Management ResearchInstitute, 2(2), (2005) 36-48.
23. Shariat Jafari M., Ghayomian J., "Evaluation of Bivariate Statistical AnalysisModels in Sandslide Hazard Zonation", Tehran University Journal, 34 (1), (2008) 137-143.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.6.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3003]