

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده مخزن سد پلرود گیلان با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

محمد کشاورزبخشایش*؛ دانشگاه پیام نور،

محمود فلاح؛ شرکت ملی نفت ایران، فلات قاره

پذیرش ۹۴/۵/۳۱

تاریخ: دریافت ۹۳/۱۰/۷

چکیده

مقاله حاضر نتیجه ارزیابی و پهنه‌بندی خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای در محدوده بدنه و دریاچه سد پلرود را ارائه می‌کند. سد مخزنی پلرود یکی از سد هایی است که در منطقه گیلان و در فاصله ۲۹ کیلومتری جنوب رودسر بر رودخانه پلرود در حال بررسی و ساخت است. شرایط ریخت‌شناسی طبیعی از یکسو و وجود نهشته‌های تحکیم نیافته و سازندهای سنگی خرد شده ناشی از گسل‌های موجود در ساختگاه سد از سوی دیگر، محل احداث بدنه سد و دریاچه آن را مستعد ناپایداری‌های دامنه‌ای ساخته است. بررسی سابقه تاریخی منطقه نیز بیانگر پتانسیل زیاد دامنه‌های منطقه برای ناپایداری‌های دامنه‌ای است. از جمله این ناپایداری‌ها می‌توان به زمین‌لغزش بزرگ رخ داده در سال ۱۳۷۴ اشاره کرد که سبب خسارت‌های فراوانی در منطقه شده است. از این رو، تعیین مناطق پرخطر محدوده مخزن و ساختگاه پیش از آب‌گیری آن ضرورت زیادی دارد. در این پژوهش با استفاده از عمده عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، شامل درصد شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، ارتفاع، پوشش گیاهی و میزان بارندگی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تهیه شده است. برای وزن‌دهی به این عوامل، روش تحلیل مراتبی (AHP) در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حدود ۲۶ درصد از شیب‌های مشرف به دریاچه سد در منطقه با خطر زیاد قرار می‌گیرند. هم‌چنین مشخص شد که از بین عوامل ۹ گانه که به‌نحوی در وقوع زمین‌لغزش منطقه نقش ایفا می‌کنند، تأثیر جهت شیب و لیتولوژی نسبت به دیگر عوامل بیش‌تر است.

واژه‌های کلیدی: سد پلرود، زمین‌لغزش، پهنه‌بندی مدل AHP، سیستم اطلاعات جغرافیایی.

* نویسنده مسئول keshavarzm@yahoo.com

مقدمه

توجه به خطر زمین‌لغزش در سازه‌های آبی و سدها به دلیل تأثیر مستقیم و غیرمستقیم حضور آب در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای اهمیت زیادی دارد. این امر به‌ویژه به این دلیل برای این گونه سازه‌ها اهمیت پیدا می‌کند که مراحل مختلف احداث سد و آب‌گیری آن توأم با ایجاد تغییرات قابل توجه تنش‌های طبیعی در محدوده ساختگاه است. از این‌رو، بررسی شرایط پایداری دامنه‌های مشرف به ساختگاه و دریاچه سد در زمین احداث و پس از آب‌گیری حائز اهمیت فراوانی است. توجه نداشتن به این موضوع می‌تواند علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین بعدی برای نگهداری سد، خطرهای جانبی زیادی را متوجه مناطق پایین‌دست سد کند. نمونه بارز این مورد سد وایونت در ایتالیا است که در سال ۱۹۶۰ در مرحله بهره‌برداری قرار داشت اما در سال ۱۹۶۳ به موجب لغزش‌هایی که در قسمت‌هایی از مخزن سد اتفاق افتاد باعث توقف و بهره‌برداری از سد شد و موجب کشته شدن ۲۶۰۰ نفر شد [۱]. در کشور ما نیز ریزش‌های سنگی در محدوده سد لتیان و زمین‌لغزش در محدوده دریاچه سد قلعه‌چای عجب‌شیر، نمونه‌هایی از توجه نداشتن به خطر زمین‌لغزش در زمین احداث سازه است که هزینه‌های زیادی را برای ترمیم و اصلاح شیب‌ها در زمان بهره‌برداری به کشور تحمیل می‌کند. بررسی شرایط ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی محدوده سد پلرود بیان‌گر حساسیت قابل توجه شیب‌های این منطقه به ناپایداری‌های دامنه‌ای است. سابقه وقوع زمین‌لغزش‌های زیاد در محدوده طرح، توجه به ارزیابی میزان خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای را پیش از احداث و آب‌گیری سد مذکور ضروری ساخته است. از این‌رو، در تحقیق حاضر سعی شده است تا با استفاده از حداکثر اطلاعات موجود از زمین‌شناسی و توپوگرافیکی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، شیب‌های محدوده بررسی شده از نظر وقوع این پدیده پهنه‌بندی شود. در این تحقیق از روش سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر استفاده شده است که دارای مزیت‌هایی نسبت به سایر روش‌های متداول است. این روش یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، به طوری که در این روش افزون بر امکان فرموله

کردن مسئله به صورت سلسله مراتبی، امکان در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی درباره موضوع مورد نظر نیز وجود دارد [۲].

در دهه‌های اخیر، استفاده از این روش برای بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در ایران متداول شده است. در پژوهش‌های پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای در حوزه آبخیز گرمی‌چای استان اردبیل، احمدی و همکاران به تلفیق روش AHP و تکنیک GIS پرداخته‌اند [۳]. فیض‌نیا و همکاران انواع روش آماری دو متغیره شامل ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح، روش شاخص هم‌پوشانی و روش تحلیل سلسله مراتبی را برای پهنه‌بندی زمین لغزش در حوزه آبخیز شیرین‌رود آزمایش کردند و با ارزیابی مدل‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها با استفاده از روش‌های نسبت تراکمی و شاخص جمع کیفی به این نتیجه رسیده‌اند که روش AHP مناسب‌ترین مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه است [۴]. شادفر و همکاران [۵] در بررسی زمین لغزش‌های رخ داده در حوزه آبخیز چال‌کرود نشان دادند که استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی می‌تواند نقش مثبتی در نتیجه قضاوت مهندسی عوامل مؤثر در وقوع لغزش داشته باشد. بررسی عظیم‌پور و همکاران [۶] در حوزه آبخیز اهرچای آذربایجان شرقی نشان داده است که استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی شیوه مناسبی برای پهنه‌بندی زمین لغزش در محدوده بررسی شده است. هم‌چنین بهنیافر و همکاران [۷]، به منظور پهنه‌بندی خطرات زمین لغزش در حوزه آبریز فریزی، ترکیبی از مدل AHP و منطق فازی را پیشنهاد کرده‌اند که بیان‌گر قابلیت مناسب این روش‌ها در شناسایی مناطق پرخطر است.

موقعیت جغرافیایی ساختگاه

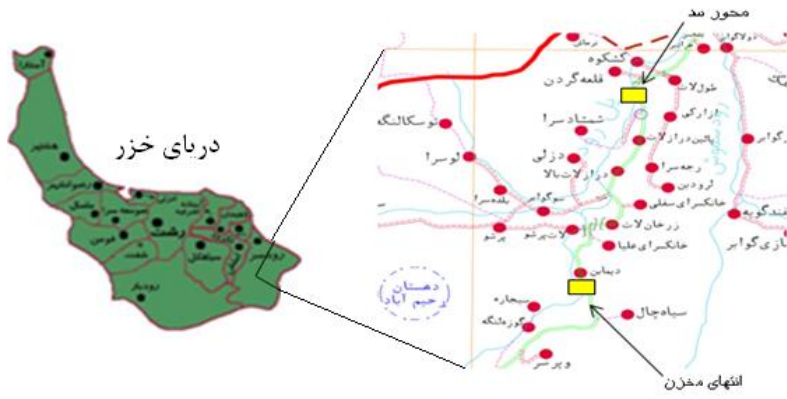
ساختگاه سد پلرود در منتهی‌الیه جنوب‌خاوری استان گیلان با مختصات $36^{\circ} 58' 48''$ عرض شمالی و $50^{\circ} 17' 6''$ طول خاوری در فاصله ۲۹ کیلومتری جنوب شهر رودسر بر رودخانه پلرود واقع شده است. گستره طرح در بخشی از حاشیه ارتفاعات شمالی رشته کوه البرز که به کوهستان اشکور مشهور است، قرار دارد. از نظر تقسیمات کشوری، این منطقه در دهستان رحیم‌آباد از شهرستان رودسر واقع شده است. نزدیک‌ترین آبادی به ساختگاه

روستاهاى طول لات و شمشادسرا در پایین‌دست و روستای درازلات در بالادست آن است. نزدیک‌ترین شهر به ساختگاه رحیم‌آباد در ۷ کیلومتری شمال‌خاوری ساختگاه قرار دارد (شکل ۱).

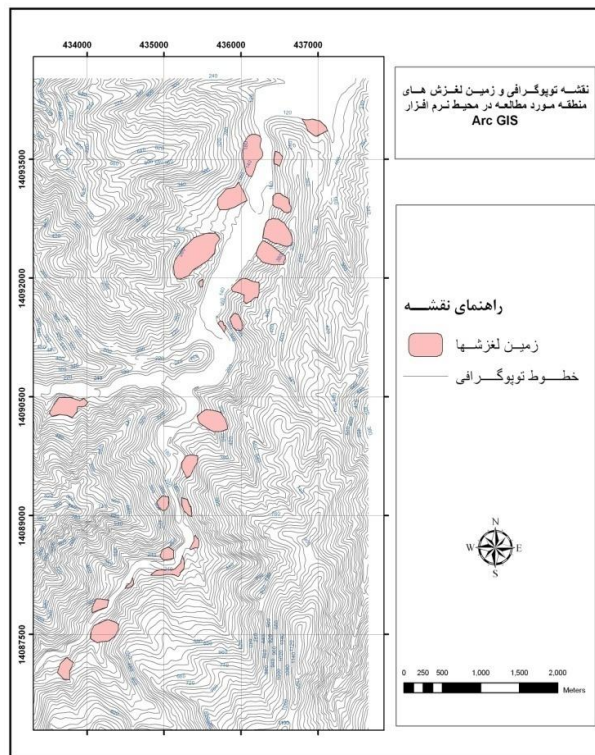
بررسی خطر ناپایداری دامنه‌ای

زمین‌لغزش یکی از پدیده‌های شناخته شده در خطرات مرتبط با زمین است که عوامل زیادی در وقوع آن در یک منطقه می‌توانند نقش ایفا کنند. تعیین میزان نقش این عوامل در وقوع زمین‌لغزش از مهم‌ترین بخش‌های بررسی زمین‌لغزش‌ها به‌ویژه در مقیاس منطقه‌ای است [۸]. هدف اصلی این تحقیق مشخص کردن عوامل تأثیرگذار بر حرکات توده‌ای و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش محدوده ساختگاه سد پل‌رود است. تعیین زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید به‌وقوع پیوسته در محدوده بررسی شده، مهم‌ترین مرحله پهنه‌بندی خطر به‌حساب می‌آید. بدین‌منظور در پژوهش حاضر ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه شده است (شکل ۲). این نقشه با استفاده از بررسی و تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری که در سال ۱۳۴۶ تهیه شده و بررسی تصاویر ماهواره‌ای ETM+ سال ۲۰۰۲ و نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ NW 30361 تهیه شده است. در مرحله بعدی و به‌منظور تدقیق موقعیت زمین‌لغزش‌های شناسایی شده در پژوهش‌های دقتی، بازدیدهای صحرائی متعددی در منطقه طرح به‌انجام رسیده و در مجموع ۲۴ مورد زمین‌لغزش در منطقه شناسایی و ثبت شده است. موقعیت این زمین‌لغزش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۳ نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده بررسی شده را نشان می‌دهد.

تعیین عوامل مؤثر در وقوع این زمین‌لغزش‌ها، مرحله بعدی این پژوهش را شامل می‌شود که در بررسی‌های صورت گرفته ۹ عامل به‌عنوان عوامل اصلی در وقوع ناپایداری دامنه‌ای در منطقه شناسایی شده است. نقشه پراکنش این عوامل در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه شده و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، نقشه پهنه‌بندی منطقه تهیه شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه بررسی شده در نقشه استان گیلان



شکل ۲. نقشه پراکنش زمین لغزش های شناسایی شده در محدوده سد پلرود



شکل ۳. نمایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده دریاچه سد در دست احداث پل رود

عوامل مؤثر در زمین‌لغزش منطقه پل رود

براساس پژوهش‌های دفتری و بررسی‌های صحرایی، ۹ عامل به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر وقوع ناپایداری دامنه‌ای در محدوده دریاچه و بدنه سد پل رود شناسایی شده است. مهم‌ترین دلیل انتخاب این عوامل، بررسی شرایط و عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در محدوده بررسی شده بوده است. این عوامل بدین شرح هستند:

۱. **شیب دامنه:** میزان شیب، یکی از پارامترهای مؤثر در تحلیل ناپایداری دامنه شیب منطقه است که به‌طور مستقیم بر لغزش تأثیرگذار است [۹]. با افزایش شیب تنش برشی افزایش می‌یابد و افزایش تنش برشی سبب ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد. به‌منظور تهیه نقشه شیب، از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شده است. این مدل از درون‌یابی خطوط توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ در محیط Arc GIS تهیه شده است. نقشه شیب برای منطقه در ۵ رده ۰-۵، ۵-۱۵، ۱۵-۲۵، ۲۵-۴۵، و بیش‌تر از ۴۵ درصد با توجه به شکستگی‌های منحنی هیستوگرام (نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش هر پیکسل) تهیه شد (شکل ۴ الف).

۲. **جهت شیب:** یکی از عوامل مهم در تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش است. زیرا جهت شیب نشان‌دهنده تأثیر متفاوت نور آفتاب، بادهای گرم و خشک و بارش در جهت‌های مختلف است. در نیم‌کره شمالی دامنه‌هایی که جنوبی هستند به نسبت

دامنه‌های شمالی بیشتر در معرض نور آفتاب قرار می‌گیرند و پایدارترند، و دامنه‌های شمالی و شمال غربی به دلیل این که کم‌تر در معرض نور آفتاب هستند دارای دمای خاک اندک و رطوبت خاک زیادند و ناپایدارترند [۱۰]. علاوه بر این اگر جهت شیب دامنه هم‌جهت با شیب لایه‌بندی و شیب لایه‌بندی کم‌تر از شیب دامنه باشد، احتمال وقوع لغزش افزایش خواهد یافت [۱۱].

نقشه جهت شیب در این تحقیق دارای ۸ رده به ترتیب شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب و شمال غربی تعیین شده است. شکل ۴ ب نقشه مذکور را نشان می‌دهد.

۳. ارتفاع: همانند زاویه شیب، میزان ارتفاع از عوامل کنترل‌کننده ناپایداری یک دامنه است. در دو دامنه مشابه با مقدار شیب ثابت، دامنه‌ای که مرتفع‌تر است پتانسیل ناپایداری بیش‌تری دارد و هر چه قدر پستی و بلندی منطقه بیش‌تر باشد، حساسیت به خطر زمین‌لغزش در آن منطقه بیش‌تر است. پست‌ترین و مرتفع‌ترین نقاط ارتفاعی منطقه به ترتیب ۱۲۰ و ۱۱۴۰ متر است. نقشه طبقات ارتفاعی منطقه در ۶ رده ۰-۲۰۰، ۲۰۰-۴۰۰، ۴۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۸۰۰، ۸۰۰-۱۰۰۰ و بیش‌تر از ۱۰۰۰ متر تهیه شده است (شکل ۴ ج).

۴. زمین‌شناسی: یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، جنس مصالح درگیر زمین‌لغزش است. از این‌رو، شناسایی و تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی از ملزومات اساسی پهنه‌بندی زمین‌لغزش است. برای تهیه نقشه زمین‌شناسی این منطقه، از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش جواهرده استفاده شده است [۱۲]. براین اساس واحدهایی در منطقه شناسایی و طبقه‌بندی شده‌اند که عبارتند از (شکل ۴ د):

d = دایک‌های آپلیتی تا تراکیتی آندزیتی،

Jkl = آهک خاکستری با میان لایه‌های شیلی،

Jks = تناوب شیپل و ماسه سنگ و بعضاً با تناوب سیلتستون و توده‌های آذرین بازیک،

K2Pv = سنگ‌های آتشفشانی تیره‌رنگ، گدازه‌های بازیک، آگلمرا، توف و برش آتشفشانی،

Qal = نهشته‌های درشت‌دانه آبرفتی رودخانه‌ای شامل تخته سنگ، قلوه‌سنگ و شن،

Qt1 = پادگانه آبرفتی شامل مصالح ریزدانه تا متوسط دانه،

Sy = توده‌های نفوذی سینیتی و گدازه‌های تراکیتی.

۵. فاصله از گسل: فعالیت گسل‌ها می‌تواند به‌عنوان عامل محرک در وقوع زمین‌لغزش‌ها

روی ناپایداری سطوح و دامنه‌ها خیلی تأثیر داشته باشد. گسل‌ها از دو نظر می‌توانند بر

ایجاد زمین‌لغزش‌ها مؤثر باشند: اول این‌که منشأ زلزله محسوب شده و در صورت وقوع

زلزله دامنه‌های نزدیک به آن‌ها بیش از دامنه‌های دورتر انرژی زلزله را دریافت کرده و

در نتیجه شانس بیش‌تری برای گسیختگی دارند، ثانیاً گسل یکی از عوامل اصلی

خردشدگی سنگ‌ها محسوب می‌شوند. به‌عبارت دیگر مسیری که گسل از آن می‌گذرد

دارای سنگ‌های ضعیف‌تری نسبت به سایر مناطق است. وجود این ناپوستگی موجب

کاهش مقاومت برشی دامنه و آمادگی بیش‌تر دامنه برای ناپایداری می‌شود.

نقشه فاصله از گسل منطقه بررسی شده در ۵ رده و به‌صورت ۰-۱۵۰، ۱۵۰-۳۰۰، ۳۰۰-۴۵۰-

۳۰۰، ۴۵۰-۶۰۰ متر و بیش‌تر از ۶۰۰ متر تهیه شده است. موقعیت گسل‌های منطقه در

شکل ۴ ه نشان داده شده است.

۶. فاصله از جاده: احداث جاده‌ها مانند دیگر سازه‌های خطی اجرا شده در زمین، باعث

تغییر تنش در شیب‌ها و تضعیف نیروی مقاومتی دامنه‌های طبیعی می‌شود. همین امر

باعث کاهش ضریب‌اطمینان شیب‌ها شده و می‌تواند سبب ناپایداری آن‌ها شود. هرچه

فاصله دامنه با جاده کم‌تر باشد، اثر منفی آن بر دامنه بیش‌تر است. برای تهیه نقشه فاصله

از جاده از نقشه‌های توپوگرافی ورقه‌های شماره 30361 NW با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و

هم‌چنین ورقه زمین‌شناسی جواهرده با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در محیط نرم‌افزار Arc GIS

استفاده شده است. این نقشه دارای ۵ رده با فواصل ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۳۰۰،

۳۰۰-۴۰۰ و بیش‌تر از ۴۰۰ متر است (شکل ۴ و).

۷. شاخص پوشش گیاهی (NDVI): در این بررسی شاخص پوشش گیاهی به صورت پارامتری محیطی استفاده شده است. NDVI یک مقدار از قابلیت انعکاس سطحی است و می‌تواند تخمین کمی از رشد گیاهان و توده زنده را به دست دهد [۱۳].

برای تهیه شاخص NDVI از داده‌های سنجیده III-LIS ماهواره P6Resource-IRS مربوط به سال 2006 استفاده شده است. این داده‌ها در محیط نرم‌افزار Idrisi تجزیه و تحلیل شده‌اند. شاخص NDVI با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است [۱۳].

$$NDVI = (NIR - R) * (NIR + R) \quad (1)$$

R: باند قرمز با توان جداسازی طیفی (۰/۶۲ - ۰/۶۸ میکرومتر)،

NIR: باند مادون قرمز نزدیک (۰/۷۷ - ۰/۸۶ میکرومتر).

در شاخص NDVI مقادیر کم‌تر و مساوی ۰/۱ منطبق با نواحی بایر، ماسه‌ای و یا برفی است. مقدارهای متوسط (۰/۲ - ۰/۳) علفزارها و بوته‌زارها را نشان می‌دهد و مقادیر زیاد (۰/۶ - ۰/۸) پوشش جنگلی را نشان می‌دهد [۱۵]. با استفاده از این شاخص، نقشه پوشش گیاهی در ۵ رده ۰/۲۲۰ - ۰، ۰/۲۸۷ - ۰/۲۲۰، ۰/۳۵۵ - ۰/۲۸۷، ۰/۴۲۲ - ۰/۳۵۵، ۰/۴۸۰ - ۰/۴۲۲ میکرومتر تهیه شده است (شکل ۴ ز).

۸. فاصله از آبراهه‌ها: در بررسی زمین‌لغزش‌ها، آب‌های جاری به‌عنوان عامل تغذیه‌کننده و یا زهکشی‌کننده توده‌های خاک و هم‌چنین جزو عوامل القاکننده زمین‌لغزش قلمداد می‌شوند. آب‌های جاری علاوه بر شستن مصالح پای شیب‌ها در کناره رودخانه‌ها، سبب افزایش زاویه شیب دامنه‌ها شده و در نتیجه باعث ناپایداری شیب می‌شوند. از این رو، این عامل نیز برای تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده شده است. نقشه فاصله از آبراهه در ۵ رده و به صورت ۰-۶۰، ۶۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۸۰، ۱۸۰-۲۴۰، ۲۴۰-۳۰۰ متر و بیش‌تر از ۳۰۰ متر تقسیم‌بندی شده است (شکل ۴ ح).

۹. بارش: در ایران بارش مهم‌ترین پارامتر اقلیمی در وقوع زمین‌لغزش به حساب می‌آید [۸]. بارش سبب بالا رفتن سطح تراز آب زیرزمینی و در پی آن افزایش فشار استاتیکی و فشار آب منفذی در مصالح دامنه‌ها شده و نقش مهمی در ایجاد زمین‌لغزش ایفا می‌کند.

در انجام این تحقیق، از اطلاعات بارشی ۱۳ ایستگاه هواشناسی به نام‌های طول لات، موسی کلابه، شاه‌شهیدان، پیرکوه، شلمان، لاهیجان، کیاکلابه، بیجار، شیرود، کاکرود، بی‌بالان، دیلمان، دیارجان و هرات‌بر برای تهیه نقشه توزیع بارش منطقه استفاده شده است [۱۴]. برای این منظور مقدار متوسط بارندگی سالانه و ارتفاع از سطح دریا در هر ایستگاه طی یک دوره آماری مشترک انتخاب شد و در محیط نرم‌افزار Arc GIS، نقشه پراکندگی میزان بارش منطقه تهیه شد (شکل ۴ ط) که شامل ۳ رده با میزان بارش کم‌تر از ۱۱۵۰، ۱۴۳۰-۱۱۵۰، و بیش از ۱۴۳۰ میلی‌متر در سال است.

۱. تلفیق اطلاعات

روش به‌کار رفته برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده دریاچه و بدنه سد پل‌رود، تحلیل سلسله‌مراتبی است. این روش یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، به طوری که در این روش افزون بر امکان فرموله کردن مسئله به صورت سلسله‌مراتبی، امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی در باره موضوع مورد نظر نیز وجود دارد [۲].

در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با توجه به عوامل ایجادکننده لغزش در منطقه، ابتدا یک ماتریس 9×9 تشکیل داده (به تعداد عوامل مؤثر در لغزش) و سپس عناصر هر سطح نسبت به عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت دوگانه با هم مقایسه شده است. به گونه‌ای که هر عامل نسبت به تأثیر شدت در رخداد زمین‌لغزش یکی از حالت‌ها در جدول ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. در این ماتریس ستون ۱ ردیف ۱ نشان‌گر اولویت معیار جهت شیب بر جهت شیب است که دارای الویت و اهمیت یکسانی نسبت به هم هستند. هر عامل نسبت به خودش برابر عدد ۱ است که در جدول یک ماتریس قطری را به وجود می‌آورد. پس از اختصاص عددها، عناصر با هم دوتایی مقایسه می‌شوند و مقادیر مربوط به هر یک از آنها مشخص می‌شود. مثلاً ارزش زمین‌شناسی نسبت به خودش برابر ۱ است و به عامل قبل از خودش یعنی جهت شیب برابر با $1/3$ است. به همین ترتیب عوامل دیگر هم نسبت به هم مقایسه می‌شوند.

جدول ۱. تعیین ارزش معیارها نسبت به یکدیگر با استفاده از قضاوت مهندسی [۲]

| ردیف | ارزش نظری برای مقایسه بین دو معیار | ارزش عددی معادل ارزش نظری |
|------|--|---------------------------|
| ۱ | دارای ارزش یکسان و برابر | ۱ |
| ۲ | ارزش یکی نسبت به دیگری کمی بیش‌تر است | ۳ |
| ۳ | ارزش یکی نسبت به دیگری بیش‌تر است | ۵ |
| ۴ | ارزش یکی نسبت به دیگری مسلماً بیش‌تر است | ۷ |
| ۵ | ارزش یکی نسبت به دیگری مطلقاً بیش‌تر است | ۹ |
| ۶ | ارزش‌های بینابینی | ۲-۴-۶-۸ |

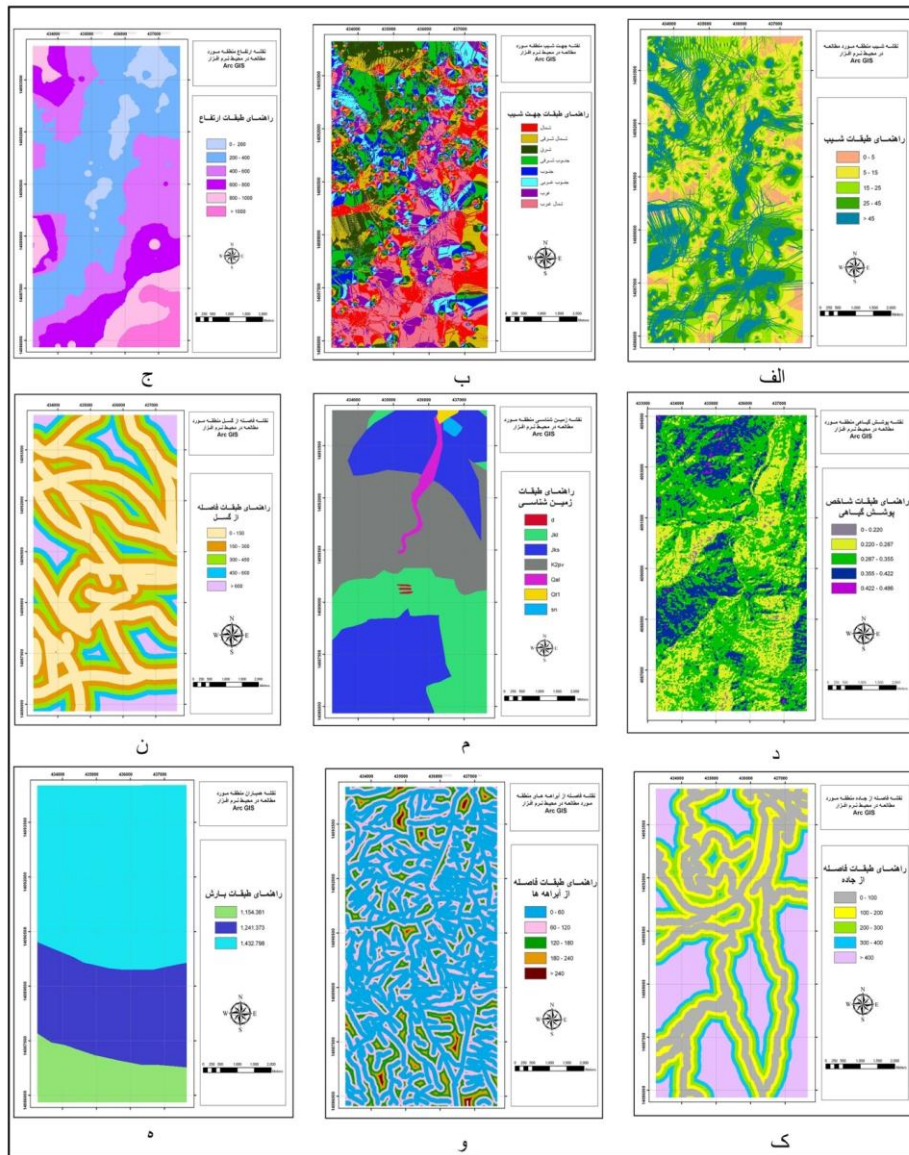
۲. وزن دهی و نرمال سازی عوامل

پس از امتیازدهی به عوامل ۹ گانه در جدول ماتریس و مقایسه زوجی عوامل با هم‌دیگر، وزن نسبی هر یک از آن‌ها محاسبه و نرمال‌سازی شده‌است. برای این منظور در مرحله اول ابتدا مقادیر هریک از ستون‌ها را با هم جمع کرده و در مرحله دوم ماتریس مورد نظر نرمالیزه شده‌است (جدول ۲). سپس وزن نسبی که از میانگین ماتریس نرمالیزه به‌دست آمده محاسبه می‌شود (جدول ۳). اولویت هرکدام از عوامل براساس مقادیر وزن دریافتی در میزان خطر زمین لغزش در منطقه بررسی شده به‌صورت ستون وزن نسبی به‌ترتیب از بالا به پایین است.

جدول ۲. ماتریس و مقدار عددی مربوط به هریک از عوامل ۹ گانه مؤثر در زمین‌لغزش در منطقه

بررسی شده

| | باران | آبراهه | پوشش | جاده | شیب | رده | گسل | زمین | جهت |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| جهت | ۹ | ۸ | ۷ | ۵ | ۵ | ۴ | ۴ | ۳ | ۱ |
| زمین | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ |
| گسل | ۶ | ۵ | ۴ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| طبقات | ۶ | ۵ | ۴ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| شیب | ۵ | ۴ | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| جاده | ۵ | ۴ | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| پوشش | ۳ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| آبراهه | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| باران | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| جمع | ۴۴ | ۵/۳۵ | ۲۷/۸۳۳ | ۱۵/۷۸۳ | ۱۵/۷۸۳ | ۱۰/۶۱۶ | ۱۰/۶۱۶ | ۵/۶۷۶ | ۲/۶۱۶ |



شکل ۴. نقشه‌های پایه استفاده شده (الف) رده‌بندی شیب، (ب) جهت شیب، (ج) ارتفاع، (د) میزان پوشش گیاهی، (م) زمین‌شناسی، (ن) فاصله از گسل‌ها، (ک) فاصله از جاده‌ها، (و) فاصله از آبراه‌ها (ه) میزان بارش

جدول ۳. مقادیر میانگین محاسبه شده و ضریب وزن هر یک از عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش در منطقه

| وزن نسبی | باران | آبراهه | پوشش گیاهی | جاده | شیب | طبقات ارتفاعی | گسل | زمین-شناسی | جهت شیب |
|----------|-------|--------|------------|-------|-------|---------------|-------|------------|---------|
| ۰/۳۳۰ | ۰/۲۰۴ | ۰/۲۲۵ | ۰/۲۵۱ | ۰/۳۱۶ | ۰/۳۱۶ | ۰/۳۷۶ | ۰/۳۷۶ | ۰/۵۸۲ | ۰/۳۸۲ |
| ۰/۲۰۸ | ۰/۱۵۹ | ۰/۱۶۹ | ۰/۱۷۹ | ۰/۲۵۳ | ۰/۲۵۳ | ۰/۲۸۲ | ۰/۲۸۲ | ۰/۱۷۶ | ۰/۱۲۷ |
| ۰/۱۱۲ | ۰/۱۳۶ | ۰/۱۴۰ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۲۶ | ۰/۱۲۶ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۹۵ |
| ۰/۱۱۲ | ۰/۱۳۶ | ۰/۱۴۰ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۲۶ | ۰/۱۲۶ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۹۵ |
| ۰/۰۷۴ | ۰/۱۱۳ | ۰/۱۱۲ | ۰/۱۰۷ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۷۶ |
| ۰/۰۷۴ | ۰/۱۱۳ | ۰/۱۱۲ | ۰/۱۰۷ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۷۶ |
| ۰/۰۳۷ | ۰/۰۶۸ | ۰/۰۵۶ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۵۴ |
| ۰/۰۲۵ | ۰/۰۴۵ | ۰/۰۲۸ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۴۷ |
| ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۴۲ |

بعد از نرمالیزه کردن و محاسبه وزن نسبی عوامل مؤثر، میزان ارزش اطلاعاتی هر یک از رده‌های عوامل محاسبه شده است. از رابطه ۲ برای محاسبه میزان ارزش اطلاعاتی استفاده شده است.

$$W = \left[\frac{A/C}{B/D} \right] \quad (2)$$

W وزن عوامل مؤثر مربوط به هر رده

A مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در هر رده (هکتار)

B مساحت هر رده (هکتار)

C مساحت کل زمین لغزش‌های منطقه بررسی شده (هکتار)

D مساحت کل منطقه بررسی شده (هکتار)

پس از محاسبه میزان ارزش اطلاعاتی (جدول ۴)، فاکتور کلی حساسیت (M) را

می‌توان از رابطه ۳ محاسبه کرد:

$$M = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8 + a_9x_9 \quad (3)$$

در این رابطه M عامل حساسیت خوانده می‌شود که مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ متغیر است، در صورتی که $M=0$ باشد نشان‌گر وجود نداشتن خطر زمین‌لغزش است و $M=100$ نشان‌گر حداکثر میزان خطر است.

فاکتورهای x_1 تا x_9 به ترتیب مربوط به عوامل جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، فاصله از جاده، پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه و میزان بارش است. فاکتورهای α_1 تا α_9 هم مربوط به وزن نسبی هریک از عوامل ۹گانه هستند. با استفاده از رابطه ۳ مقدار M برای هر رده محاسبه شده است (جدول ۵).

جدول ۴. وزن مربوط به هریک از رده‌های عوامل ۹گانه مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه

| وجه شیب | زمین شناسی | | فاصله | | ارتفاع | | شیب | | فاصله از جاده | | پوشش گیاهی | | آبراهه | | بارش | | |
|---------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|---------------|-------|------------|-------|--------|-------|------|-------|------|
| | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | رده | وزن | |
| A_1 | ۵۷/۹ | L_1 | ۶۶۳ | F_1 | ۶۴/۲ | H_1 | ۱۰۰ | S_1 | ۴۳/۳ | D_1 | ۹۰ | N_1 | ۲۷/۳ | W_1 | ۱۰۰ | R_1 | ۱۴/۷ |
| A_2 | ۴۴/۳ | L_2 | ۰ | F_2 | ۵۵ | H_2 | ۷۵/۱ | S_2 | ۱۰۰ | D_2 | ۱۰۰ | N_2 | ۱۰۰ | W_2 | ۵۹/۹ | R_2 | ۴۲/۷ |
| A_3 | ۵۱/۱ | L_3 | ۷۵/۶ | F_3 | ۱۰۰ | H_3 | ۰/۲ | S_3 | ۹۸/۳ | D_3 | ۳۷/۴ | N_3 | ۷۵/۸ | W_3 | ۳۴/۴ | R_3 | ۱۰۰ |
| A_4 | ۴۲/۱ | L_4 | ۱۰۰ | F_4 | ۹۸/۱ | H_4 | ۰ | S_4 | ۹۶/۲ | D_4 | ۹/۷ | N_4 | ۲۹/۸ | W_4 | ۲۷/۳ | | |
| A_5 | ۲۶/۷ | L_5 | ۱۶۳ | F_5 | ۵ | H_5 | ۰ | S_5 | ۸۲/۴ | D_5 | ۰ | N_5 | ۰ | W_5 | ۰ | | |
| A_6 | ۶۲/۹ | L_6 | ۶۵/۳ | | | H_6 | ۰ | | | | | | | | | | |
| A_7 | ۱۰۰ | L_7 | ۴۶۷ | | | | | | | | | | | | | | |
| A_8 | ۶۷/۴ | | | | | | | | | | | | | | | | |

جدول ۵. تعیین میزان حساسیت رده‌های مختلف ۹گانه بر منطقه بررسی شده

| رده | وزن | ۱ رده | ۲ رده | ۳ رده | ۴ رده | ۵ رده | ۶ رده | ۷ رده | ۸ رده |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| وجه شیب | ۰/۳۳۰ | ۱۹/۱۰۷ | ۱۴/۶۱۹ | ۱۶/۸۶۳ | ۱۳/۸۹۳ | ۸/۸۱۱ | ۲۰/۷۵۷ | ۳۳ | ۲۲/۲۴۳ |
| زمین‌شناسی | ۰/۲۰۸ | ۱۳/۷۹۰ | ۰ | ۱۵/۷۲۴ | ۲۰/۸ | ۳/۳۹۰ | ۱۳/۶۴۴ | ۹/۷۱۳ | |
| فاصله از گسل | ۰/۱۱۲ | ۷/۱۹۰ | ۶/۱۶ | ۱۱/۲ | ۱۰/۹۸۷ | ۰/۵۶ | | | |
| ارتفاع | ۰/۱۱۲ | ۱۱/۲ | ۸/۴۱۱ | ۰/۰۲۲ | ۰ | ۰ | | | |
| شیب | ۰/۰۷۴ | ۳/۲۰۴ | ۷/۴ | ۷/۲۷۴ | ۷/۱۱۸ | ۶/۰۹۷ | | | |
| فاصله از جاده | ۰/۰۷۴ | ۶/۶۶ | ۷/۴ | ۲/۷۶۷ | ۰/۷۱۷ | ۰ | | | |
| پوشش گیاهی | ۰/۰۳۷ | ۱/۰۱۰ | ۳/۷ | ۲/۸۰۴ | ۱/۱۰۲ | ۰ | | | |
| فاصله از | ۰/۰۲۵ | ۲/۵ | ۱/۴۹۷ | ۰/۸۶ | ۰/۶۸۲ | ۰ | | | |
| بارش | ۰/۰۱۸ | ۰/۲۶۶ | ۰/۷۶۸ | ۱/۸ | | | | | |

بررسی جدول تعیین وزن عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و امتیازدهی به این عوامل نشان می‌دهد که عامل جهت شیب و زمین‌شناسی بیش‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش داشته و عامل بارندگی کم‌ترین نقش را در وقوع این پدیده بر عهده دارند.

۳. تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر

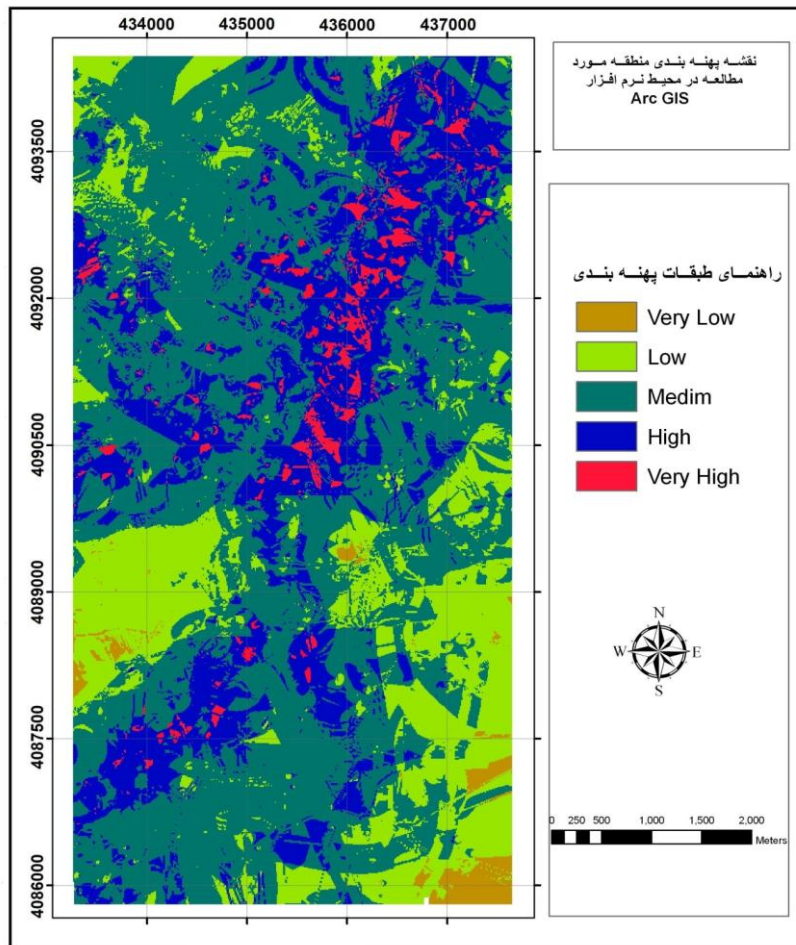
از ترکیب و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی ۹ گانه و با توجه به رده‌بندی استاندارد زون‌های لغزشی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه پلرود در پنج پهنه تهیه شده است. شکل ۵ نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده بررسی شده را نشان می‌دهد. هم‌چنین مساحت هریک از نواحی براساس هکتار و درصد سطحی آن‌ها نسبت به مساحت کل منطقه بررسی شده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مساحت و درصد رده‌های مختلف خطر زمین لغزش

| ردیف | توصیف خطر | مساحت (هکتار) | درصد |
|------|---------------------------|---------------|------|
| ۱ | خطر خیلی کم (Very Low) | ۵۷/۹ | ۱ |
| ۲ | خطر کم (Low) | ۷۲۱/۸ | ۱۹ |
| ۳ | خطر متوسط (Medium) | ۲۰۴۴/۸ | ۵۴ |
| ۴ | خطر بالا (High) | ۸۸۶/۶ | ۲۳ |
| ۵ | خطر خیلی بالا (Very High) | ۹۳/۳ | ۳ |

بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر خطر زمین لغزش در محدوده ساختگاه و دریاچه سد پلرود واقع در استان گیلان بررسی شده و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برای این منطقه ارائه شده است. برای تهیه این نقشه از عمده عوامل مؤثر در ایجاد ناپایداری‌های دامنه‌ای در ناحیه استفاده شده است. این عوامل شامل نقشه‌های شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، ارتفاع، میزان پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه و میزان بارش بوده است. برای وزندهی به عوامل و محاسبه میزان خطر در بخش‌های مختلف ناحیه بررسی شده، روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. این روش به دلیل چند معیاره بودن و مقایسه هم‌زمان عوامل مؤثر در لغزش، دقت نسبی زیادی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده دریاچه و بدنه سد پلرود دارد. برای وزندهی به عوامل نه‌گانه شناسایی شده در محدوده، ابتدا نقشه لغزش‌های قدیم و جدید بوقوع پیوسته در منطقه، با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش محدوده سد پل‌رود

هم‌چنین بررسی‌های صحرایی شناسایی شده واز آن در تعیین درجه اهمیت هریک از عوامل در وقوع ناپایداری دامنه‌ای منطقه استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیش از ۲۶ درصد مساحت ناحیه بررسی شده در زون با خطر زیاد تا بسیار زیاد قرار می‌گیرد. براین اساس، بخش‌های وسیعی از دریاچه سد و ساختگاه سد در نواحی پرخطر قرار گرفته است. برخلاف تصور غالب که افزایش شیب همواره با افزایش خطر ناپایداری دامنه‌ای همراه است، شیب‌های ۵ تا ۱۵ درصد بیش‌ترین درصد زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه را به‌خود اختصاص داده‌اند. این امر به‌دلیل شرایط اقلیمی منطقه است که شیب‌های تند از سنگ‌های بسیار

محکم تشکیل شده‌اند، از این رو، در برابر ناپایداری دامنه‌ای مقاوم‌تر هستند. اکثر زمین لغزش‌های منطقه، در دامنه‌هایی با جهت غرب و شمال‌غربی رخ داده‌اند. این موضوع با روند ساختارهای اصلی منطقه شامل گسل‌های بزرگ و تاقدیس و ناودیس‌های البرز مرکزی مطابقت دارند. توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص می‌سازد که تعداد ۱۲ مورد از زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه در واحد زمین‌شناسی Tks که از تناوب شیل و ماسه سنگ مربوط به دوره زمانی ژوراسیک-کرتاسه، رخ داده است. همین امر مؤید ناپایداری نسبی این سازندها در برابر فرسایش و در نتیجه تشکیل شیب‌های متوسط در منطقه است. هرچند که در اکثر تحقیقات صورت گرفته، نقش بارندگی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در ایجاد ناپایداری‌های دامنه‌ای قلمداد شده است، با این حال پژوهش حاضر نشان می‌دهد که میزان بارندگی عامل ثانوی است. این عامل زمانی می‌تواند باعث ناپایداری شود که با عوامل دیگری مانند زمین‌شناسی توأم شود.

منابع

1. Müller L., "The Vaiont catastrophe-a personal review", Engineering Geology, Vol. 24 (1/4) (1987).
2. Saaty T.L., Vargas G.L., "Models, Methods, Concepts, and Applications of the Analytic Hierarchy Process", Kluwer Academic Publisher, Boston (2001).
3. احمدی ح.، اسمعیلی ا.، فیض‌نیا س.، شریعت‌جعفری م.، پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغییره (MR) و تحلیل سلسله مراتبی سیستم‌ها (AHP) مطالعه موردی حوضه آبخیز گرمی چای، مجله منابع طبیعی ایران، نشریه شماره ۴ (۱۳۸۲).
4. فیض‌نیا س.، کلارستاقی ع.ا.، احمدی ح.، صفایی م.، بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبخیز شیرین رود سد تجن، مجله منابع طبیعی، جلد ۵۷. شماره ۱ (۱۳۸۳).
5. شادفر ص.، مجتبی ی.، جمال ق.، جعفر غ.، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی-مطالعه موردی حوضه آبخیزچالک‌رود، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵ (۱۳۷۶).

۶. عظیم‌پور ع.، حسن ص.، علی د.، محمدرضا ث.، ارزیابی نتایج مدل *AHP* در پهنه‌بندی خطر زمین لغزه - مطالعه موردی حوضه آبریز اهر چای، فضای جغرافیایی، جلد ۹، شماره ۲۶ (۱۳۸۸).
۷. بهنیا فر ا.، پروین ک.، کاربرد مدل *AHP* و منطق فازی در منطقه‌بندی خطرات زمین‌لغزش حوضه آبریز فریزی در دامنه شمالی کوه‌های بینالود، مجله جغرافیای طبیعی، سال سوم، شماره ۹ (۱۳۸۹).
۸. میرصانعی ر.، محمدرضا م.، راهنمای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در ایران، کارگروه زلزله و لغزش لایه‌های زمین، پژوهشکده سوانح طبیعی (۱۳۸۴).
9. Chacon J., Irigaray C., Fernandez T., "Large to middle scale landslides inventory analysis and mapping with modeling and assessment of derived susceptibility", Hazards and risks in a GIS, 7th International IIAEG congress (1994) 4669-4678.
10. Lee S., Min K., "Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea", Environmental Geology, 40 (2001) 1095-1113.
11. Lee S., Pradhan B., "Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression model", Landslides, 4 (1) (2007) 33-41.
۱۲. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین‌شناسی چارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ جواهرده (۱۳۸۰).
13. Crippen R.E., "Calculating the vegetation index faster," Remote Sensing of Environment", Vol. 34 (1990) 71-73.
۱۴. سازمان هواشناسی کشور، گزارش ایستگاه‌های هواشناسی استان گیلان در دوره ۴۵ ساله (۱۳۸۵).
15. Weier J., Herring D., "Measuring Vegetation (NDVI EVI)", http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.html (2008).