





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 2 - Number 42, Summer 2022

<https://geoeh.um.ac.ir>


 <https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.69988.1048> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و دوم، تابستان ۱۴۰۱، صص ۲۱-۱

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور با استفاده از مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP

فرنگیس نظری بیاتیانی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، پردیس بین‌الملل کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

 منصور جعفری‌گلو^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

شیرین محمدخان - استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مهران مقصودی - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۲۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۲۹

چکیده

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در یک منطقه و پهنه‌بندی خطر آن یکی از اقدامات اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و کاهش مخاطرات محیطی ناشی از آن است. تحقیق حاضر با هدف تعیین عرصه‌های حساس نسبت به احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور (شهرستان خلخال) انجام گرفته است. در این راستا، ۹ عامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه شامل لیتولوژی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، گسل، جاده‌سازی، شبکه زهکشی و بارش، شناسایی شدند و مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه، جهت تعیین عرصه‌های آسیب‌پذیر از مدل ترکیبی احتمالات شرطی (قضیه بیز) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) بهره گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پهنه‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد به ترتیب حدود ۲۸/۶۹ و ۲۵/۴۰ درصد، پهنه‌های با خطر متوسط حدود ۲۱/۵۷ درصد و پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم نیز به ترتیب ۱۴/۲۱ و ۱۰/۱۳ درصد از منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند؛ بنابراین، بیش از ۵۴ درصد از منطقه کلور دارای پتانسیل خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش است که دلیل اصلی آن شیب زیاد و وجود سازندهای آهکی مارنی است. همچنین، صحت

Email: mjbeglou@ut.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۸۷۵۵۶۸

نحوه ارجاع به این مقاله:

نظری بیاتیانی، فرنگیس؛ جعفری‌گلو، منصور؛ محمدخان، شیرین؛ مقصودی، مهران؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور با استفاده از مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP. جغرافیا و مخاطرات محیطی.

۱۱(۲). صص ۲۱-۱

<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.69988.1048>

نتایج با بررسی رابطه مساحت پهنه‌های خطر و مساحت سطوح لغزشی و R^2 بیش از ۰/۹۳ در سطح خوبی مورد تأیید قرار گرفت؛ بنابراین، نتایج مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در این نوع مناطق مناسب بوده و نقشه حاصل از آن همراه با شرح تفصیلی می‌تواند به‌عنوان ابزاری ارزشمند در برنامه‌ریزی محیطی و کاهش هزینه‌های رخ داد زمین لغزش مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مخاطرات محیطی، زمین لغزش، قضیه بیز، ANP، کلور.

۱- مقدمه

پدیده زمین لغزش از جمله انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای است که هر ساله خسارات مالی و جانی بسیاری را بر زندگی انسان‌ها وارد می‌کند. زمین لغزش به‌عنوان پدیده‌ای طبیعی، عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها (براب^۱، ۱۹۸۴؛ محمودی، ۱۳۸۲). این پدیده از جمله فرایندهای ژئومورفیک عمده در چشم‌انداز مناطق کوهستانی است (هاتانچی و موراواکی^۲، ۲۰۰۹) که مطابق با گزارش‌های جهانی مخاطرات طبیعی در سال ۲۰۱۲، در میان هفت بلای طبیعی خطرناک جهان قرار گرفته است (فتیحی و همکاران، ۲۰۱۵)؛ به‌طوری‌که سالانه منجر به میلیاردها دلار خسارت اقتصادی در کشورهایی همچون ژاپن، هند، ایتالیا و ایالات متحده آمریکا می‌شود (باسو و سادس^۳، ۲۰۱۹). در ایران نیز خسارات ناشی از زمین لغزش‌ها آمار و ارقام قابل توجهی را به خود اختصاص داده‌اند (فرجی سبکبار و همکاران، ۲۰۱۴). زمین لغزش تحت مجموعه‌ای از شرایط روی می‌دهد و ممکن است به‌واسطه فاکتورهای زمین محیطی همچون شیب، ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی و غیره تحت تأثیر قرار گیرد. علاوه بر این عوامل خارجی مانند بارندگی، زلزله و فعالیت‌های انسانی مانند ایجاد ترانشه برای ساخت‌وساز جاده‌ها و شهرسازی بر فراوانی وقوع زمین لغزش تأثیرگذار است (برا و همکاران^۴، ۲۰۱۹؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ به‌عبارت‌دیگر روابط فضایی موجود بین منطقه وقوع زمین لغزش و عوامل مؤثر محیطی، عناصر کلیدی در بررسی حساسیت زمین لغزش می‌باشند (سامودرا و همکاران^۵، ۲۰۱۸). با توجه به اینکه زمین لغزش‌ها نسبت به سایر بلایای طبیعی مدیریت‌پذیرتر هستند، شناخت این پدیده در جهت جلوگیری از خسارات ناشی از آن از اهمیت زیادی برخوردار است (لانتادا و همکاران^۶، ۲۰۰۹). از این‌رو شناخت نواحی مستعد وقوع زمین لغزش و

1. Brabb
2. Hattanji and Moriwaki
3. Basu and Swades
4. Bera et al.
5. Samodra et al.
6. Lantada et al.

حرکات توده‌ای از ضروریات مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توسعه‌ای و عمرانی است (یامین و همکاران، ۲۰۰۵).

کشور ایران با توجه به شرایط آب‌وهوایی و توپوگرافی از جمله کشورهای است که وقوع زمین‌لغزش در مناطق مختلف آن باعث به وجود آمدن خسارات انسانی و مالی زیادی می‌شود. به دلیل تعدد، تنوع، تکرار و شدت رخداد خطرات طبیعی و ناآرامی محیط، ایران در ردیف کشورهای بلاخیز جهان قرار گرفته است (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱). تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش، برای طراحان و مهندسان در راستای انتخاب مکان مناسب اجرای طرح‌ها و همچنین برای مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی بسیار حائز اهمیت است (پرادهان^۲، ۲۰۱۱؛ نفسلیوگلو و همکاران^۳، ۲۰۰۸). محققان زیادی از دهه‌های گذشته با به‌کارگیری روش‌های مختلف نسبت به ارزیابی خطرات زمین‌لغزش و تهیه نقشه توزیع فضایی این پدیده اقدام نموده‌اند. در سطح بین‌المللی، چن و همکاران^۴ (۲۰۱۲)، دینامیک حرکات توده‌ای پیچیده ناشی از بارش سنگین در ناحیه داگوی ترکیه را مطالعه نمودند. تحلیل داده‌های بارش برای دوره‌های زمانی مختلف حاکی از این است که بارش سنگین در زمین‌لغزش به‌عنوان یک عامل محرک نقش دارد. دی‌اریکو و مورو^۵ (۲۰۱۲)، با استفاده از مدل قضیه بیز جنوب منطقه تیرول در ایتالیا را به لحاظ وقوع زمین‌لغزش پهنه‌بندی نمود. نتایج نشان داد که نقشه حساسیت به‌دست‌آمده با بیش از ۷۵ درصد لغزش‌ها انطباق دارد. شادمان و همکاران (۲۰۱۳)، با رویکرد تلفیقی FAHP و PROMETHEE II و با استفاده از ۸ لایه، حساسیت زمین‌لغزش منطقه مینودشت در شرق استان گلستان را پهنه‌بندی نمودند. نتایج نشان داد که ۱۱ درصد زمین‌لغزش‌ها در کلاس با حساسیت خیلی زیاد رخ داده‌اند. ژو و همکاران^۶ (۲۰۱۴)، با استفاده از منطق فازی، خطر زمین‌لغزش در منطقه کایژیان واقع در چین را پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که منطق فازی توانایی بالایی در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه را داشته است. روستایی و همکاران (۱۳۹۳)، به ارزیابی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه سد مخزنی قلعه چای عجب‌شیر با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و روش چندمعیاره مکانی پرداختند. نتایج نشان داد که کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی و جهت دامنه نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارد. شنکاری بادی (۱۳۹۴)، با تلفیق روش‌های فرایند تحلیل شبکه و شاخص آنتروپی شانون عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه فاروب نیشابور را شناسایی و ارزیابی نمود. نتایج نشان داد که عامل فاصله از آبراهه به‌عنوان مؤثرترین عامل بوده است. نظم‌فر و بهشتی جاوید (۱۳۹۵)، با استفاده از مدل ترکیبی فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی حوضه آبریز چلی‌چای را به لحاظ حساسیت وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفته‌اند که مدل مذکور برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش

1. Yamin et al.
2. Pradhan
3. Nefeslioglu et al.
4. Chen et al.
5. D'Errico and Murru
6. Zho et al.

مناسب است. **عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)**، بخشی از حوضه آبریز اهرچای را با استفاده از فرایند تحلیل شبکه و قضیه بیز به لحاظ وقوع زمین لغزش مورد بررسی قرار داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که دقت ترکیب این دو روش برای پهنه‌بندی زمین لغزش بسیار خوب و به میزان ۷۱ درصد بوده است. **رنجبری و همکاران (۱۳۹۸)**، خطر وقوع زمین لغزش پهنه گسلی قوشاداغ- ارسباران در آذربایجان شرقی را با استفاده از مدل ANP و LR پهنه‌بندی نموده‌اند. نتایج نشان داد که عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین نقش و کاربری زمین کمترین نقش را در وقوع زمین لغزش‌ها داشته‌اند. بالاین‌حال، تاکنون مطالعات زیادی در خصوص زمین لغزش انجام شده است که هرکدام جنبه‌های مختلف این پدیده را بررسی نموده و پهنه‌های خطر را برای مناطق مورد مطالعه مشخص نموده‌اند (برای مثال: **میلچوری و ترینگواسون^۱**، ۲۰۱۵؛ **چن و همکاران^۲**، ۲۰۱۶؛ **باسو و سادس**، ۲۰۱۹؛ **محمدخان و همکاران**، ۱۳۹۳؛ **روستایی و همکاران**، ۱۳۹۴؛ **مقصودی و همکاران**، ۱۳۹۴؛ **صفاری و هاشمی**، ۱۳۹۵؛ **پیش‌نماز احمدی و همکاران**، ۱۳۹۷؛ **شاهکوثی و همکاران**، ۱۳۹۸؛ **مجد باوی و مومی پور**، ۱۴۰۰).

در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل شبکه^۳ و احتمالات شرطی (قضیه بیز)^۴، عرصه‌های آسیب‌پذیر و بخش‌های حساس منطقه کلور که بیشترین احتمال خطر وقوع زمین لغزش در آن‌ها وجود دارد، شناسایی و بررسی گردد. منطقه کوهستانی کلور در شهرستان خلخال (بخش علیای رودخانه شاهرود) قرار دارد و با توجه به شرایط زمین‌شناسی، نئوتکتونیک، اقلیمی و توپوگرافی مستعد وقوع انواع مختلفی از حرکات دامنه‌ای است. در این منطقه که یکی از چشم‌اندازهای قابل توجه آن بقایای سولیفلوکسیون‌های قدیمی است، بر اساس بررسی‌های میدانی به عمل آمده، در زمان حاضر نیز زمین لغزش‌های متعددی به وقوع پیوسته است. مطالعه این زمین لغزش‌ها و پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع آن در منطقه برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری اصولی از اراضی و کاهش مخاطرات محیطی بسیار ضروری و حائز اهمیت است که هدف اصلی این تحقیق می‌باشد.

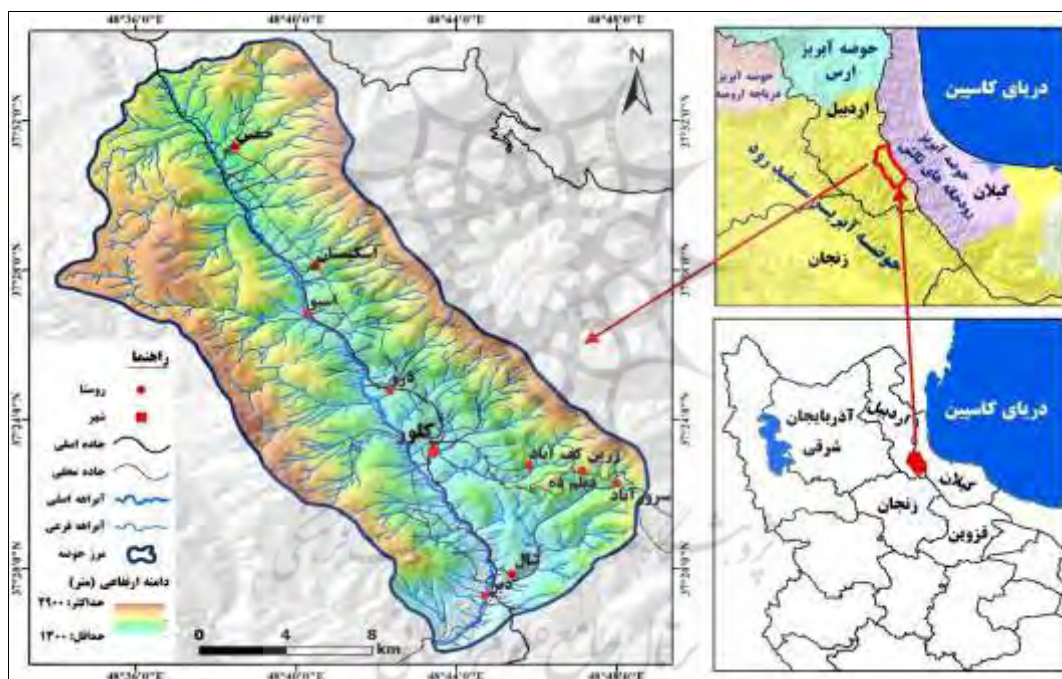
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش غربی رشته‌کوه البرز و جنوب شرقی شهرستان خلخال واقع شده است. مرز منطقه مورد مطالعه منطبق با مرز حوضه آبریز بالادست رودخانه شاهرود به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه سفیدرود است که در نهایت به دریای مازندران ختم می‌شود (**شکل ۱**). کمینه و بیشینه ارتفاعی منطقه به ترتیب ۱۳۰۰ و ۲۹۰۰

1. Melchiorre & Tryggvason
2. Chen et al.
3. Analysis Network Process
4. Conditional probabilities (Bayes theorem)

متر و همچنین میانگین ارتفاعی آن از سطح دریا ۲۰۸۸ متر است که از سمت شرق به ارتفاعات تالش، از سمت غرب به کوه آق‌داغ و از سمت شمال به کوه دره‌دران منتهی می‌شود. آب‌وهوای منطقه مورد مطالعه در تابستان معتدل و در زمستان سرد است. به‌طور کلی رژیم بارش در منطقه کلور مدیترانه‌ای است و میانگین بارش سالانه آن (بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی کشور) در حدود ۳۵۰ میلی‌متر است (کمینه ۳۲۰ و بیشینه ۳۸۰ میلی‌متر). توپوگرافی منطقه بیانگر قرارگیری آن در منطقه‌ای کوهستانی و پرشیب است. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی، شیت‌های خلخال و ماسوله) لیتولوژی غالب منطقه شامل انواع لایه‌های آهکی همراه با سیلت و ماسه‌سنگ است که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی دارای درز و شکستگی‌های زیاد و تحت تأثیر نوسانات دمایی توأم با رطوبت، تخریب مکانیکی شدیدی را متحمل شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- داده‌های پژوهش

در این پژوهش، ابتدا زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه کلور با استفاده عکس‌های هوایی تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات میدانی و تعیین موقعیت با استفاده از GPS، شناسایی گردید. در ادامه، با توجه به ویژگی‌های زمین‌لغزش‌ها، شرایط طبیعی و مورفومتری حوضه، نتایج پژوهش‌های گذشته و روش‌های مورد استفاده در تحقیق، ۹ عامل مؤثر در

رخداد زمین لغزش‌های حوضه کلور شناسایی شد و داده‌های مربوطه شامل لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه و ارتفاع تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های لیتولوژیکی و گسل از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ برگ‌های ماسوله و خلخال (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی) تهیه گردید. داده‌های شیب و جهت شیب منطقه با استفاده از DEM ده متر (سازمان نقشه‌برداری کشور) در نرم‌افزار ArcGIS و با استفاده از ابزارهای Slope و Aspect در Spatial Analyst تهیه شده است. جهت بررسی پارامترهای مربوط به بارندگی از دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۷ (سازمان هواشناسی کشور) استفاده گردید. با استفاده از ارقام میانگین سالانه بارندگی و ارتفاع ایستگاه‌های منطقه، متوسط بارندگی در کل منطقه محاسبه و نقشه هم بارش کلور در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. داده‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و پردازش داده‌های چندطیفی تصاویر ماهواره‌ای سپس با انجام پیمایش‌های میدانی و استفاده از اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات و منابع طبیعی اردبیل تهیه گردید. شبکه زهکشی منطقه از طریق مدل‌سازی هیدرولوژیکی و با استفاده از DEM ده متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. جاده‌های منطقه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور) استخراج و ترسیم شد.

۲-۳- روش‌های پژوهش

پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های تحقیق، هر یک از عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش‌های منطقه به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم و بر اساس مدل‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و قضیه بیز، پارامترهای هرکدام از عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، ارزش‌گذاری و برای مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های فضایی پردازش شدند.

در این پژوهش، برای مقایسه زوجی و تعیین ضریب پارامترها از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP) و برای تعیین سطح تأثیر کلاس‌های هر پارامتر از مدل احتمالات شرطی (قضیه بیز) استفاده شده است. برای اجرای مدل ANP ابتدا بر اساس ماهیت داده‌ها و ارتباطات موجود بین آن‌ها، پارامترها در چهار خوشه اصلی (۱) پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی؛ (۲) پارامترهای زمین‌شناسی؛ (۳) پارامترهای انسانی و پوشش زمین و (۴) پارامترهای ژئومورفولوژیکی دسته‌بندی شدند. در ادامه با مشخص شدن خوشه‌ها، ساختار شبکه‌ای بین خوشه‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده، تشکیل شد. تمامی مراحل مربوط به مقایسه‌های زوجی بین خوشه‌ها معیارها و روابط درونی آن‌ها در محیط نرم‌افزار Super Decision صورت گرفته و نتایج کار به‌صورت جدول ابرماتریس غیر وزنی؛ ابرماتریس وزنی و ابرماتریس حدی مشخص شده است. پس از محاسبه وزن پارامترها و تشکیل ابرماتریس‌های سه‌گانه (ابرماتریس غیر وزنی، ابرماتریس وزنی و ابرماتریس حدی) وزن کلاس‌های مختلف هر پارامتر با استفاده از قضیه بیز محاسبه گردید. برای این منظور از اطلاعات مربوط به زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه و پارامترهای کلاس‌بندی استفاده شده است.

در نهایت با اعمال وزن‌های مربوط به کلاس‌های پارامترهای مختلف که با استفاده از قضیه بیز حاصل شده و نیز اعمال ضرایب حاصل از ANP، در محیط نرم‌افزار ArcGIS این وزن‌ها بر روی پارامترها و کلاس‌های مربوط به هرکدام از پارامترها اعمال گردید. در این پژوهش جهت ارائه مدل نهایی از عملگر Raster Calculator به دلیل دقت بیشتر استفاده گردیده و خروجی به دست آمده بر اساس شکست‌های طبیعی، نمودار فراوانی پیکسل‌ها و با هدف مقایسه نتایج به ۵ کلاس خطر (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم گردید و نقشه نهایی پهنه‌بندی زمین‌لغزش منطقه کلور ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

به منظور تخمین میزان دقت و صحت سنجی نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر، پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی تطبیق و روی هم گذاری شد و درصد رخداد زمین‌لغزش در هرکدام از پهنه‌ها به دست آمد. در نهایت، با استفاده از رگرسیون خطی، نتایج مورد صحت سنجی قرار گرفت.

۲-۳-۱- فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

فرایند تحلیل شبکه‌ای از مجموعه مدل‌ها و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. کار اصلی این مدل، تعیین ارزش و اهمیت معیارها و شاخص‌ها و در نهایت ارزش نهایی گزینه‌های تصمیم‌گیری است. فرایند تحلیل شبکه‌ای به این منظور توسعه یافته است که بدون در نظر گرفتن فرضیه‌هایی درباره رابطه سلسله مراتبی یک‌طرفه بین سطوح تصمیم، شرایط واقعی تری را برای تصمیم‌گیری فراهم آورد (نیایان و پیانتانکولچی^۱، ۲۰۰۶). این مدل توسط ال‌ساعتی در سال ۱۹۹۶ به دنبال محدودیت‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در حل مسائل و ارزیابی اهمیت تجمعی کلی شاخص‌های درون یک مدل ارزیابی با ترکیب ارتباطات و بازخوردها موجود در یک سیستم تصمیم‌گیری ارائه شد (روستایی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۳-۲- مدل قضیه بیز یا وزن شواهد^۲

مدل وزن شواهد به‌عنوان مدلی سودمند بر پایه یک روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است (دنسون^۳، ۲۰۰۲). این مدل برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش، اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ون و سترن مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل بر اساس دو دسته اطلاعات شامل (۱) پارامترهای مؤثر در وقوع یک پدیده (زمین‌لغزش) یا عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین‌لغزش)؛ (۲) سطح وقوع پدیده در گذشته (زمین‌لغزش‌های رخ داده) کار مدل‌سازی و پیش‌بینی صورت می‌گیرد. در این حالت احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده بستگی به شرایطی دارد که هنگام وقوع آن در گذشته وجود داشته است. در این پژوهش از مدل قضیه بیز برای پیدا کردن سطح تأثیر و وزن

1. Neaupane & Piantanakulchai
2. Weight of evidence (WofE)
3. Denison

هرکدام از کلاس‌های پارامترهای مستعد کننده زمین لغزش استفاده شده است. با توجه به مطالب فوق، فرمول قضیه بیز بر اساس رابطه زیر (رابطه ۱) تعریف می‌شود.

$$P(s | B_i) = \frac{P(B_i | S) \times P(s)}{P(B_i)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه‌ی فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه $P(B_i)$ و (AS) احتمال وقوع کلاس B در محدوده‌ی مورد مطالعه، (AS) ، $P(B_i | s)$ احتمال وقوع پیشامد B_i به شرطی که پیشامد S اتفاق افتاده باشد، $(S || S)$ $P(B_i)$ احتمال وقوع پیشامد S به شرطی که پیشامد B اتفاق افتاده باشد. احتمال شرطی وقوع زمین لغزش زمانی که کلاس B_i اتفاق نیفتاده باشد نیز به صورت **رابطه زیر** تعریف می‌شود:

$$P(s | B_i^c) = \frac{P(B_i^c | S) \times P(s)}{P(B_i^c)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در معادله‌ی فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه $P(B_i^c | s)$ احتمال شرطی نبود کلاس B_i به شرطی که S اتفاق افتاده باشد، احتمال اولیه نبود کلاس B_i در محدوده مورد مطالعه (AS) . در این مدل، وزن کلاس‌های هر پارامتر به وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی (W^+ و W^-) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آن‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت با استفاده از روابط ۳ تا ۶ وزن نهایی کلاس‌های مربوط به هر پارامتر محاسبه می‌شود.

$$W^+ = \text{LN}(P(B_i | s) / P(B_i)) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$W^- = \text{LN}(P(B_i^c | s) / P(B_i^c)) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$C = W^+ \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$W_{final} = C / S_c \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن LN لگاریتم بر مبنای عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده و S_c انحراف استاندارد است (جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی) (پور قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱).

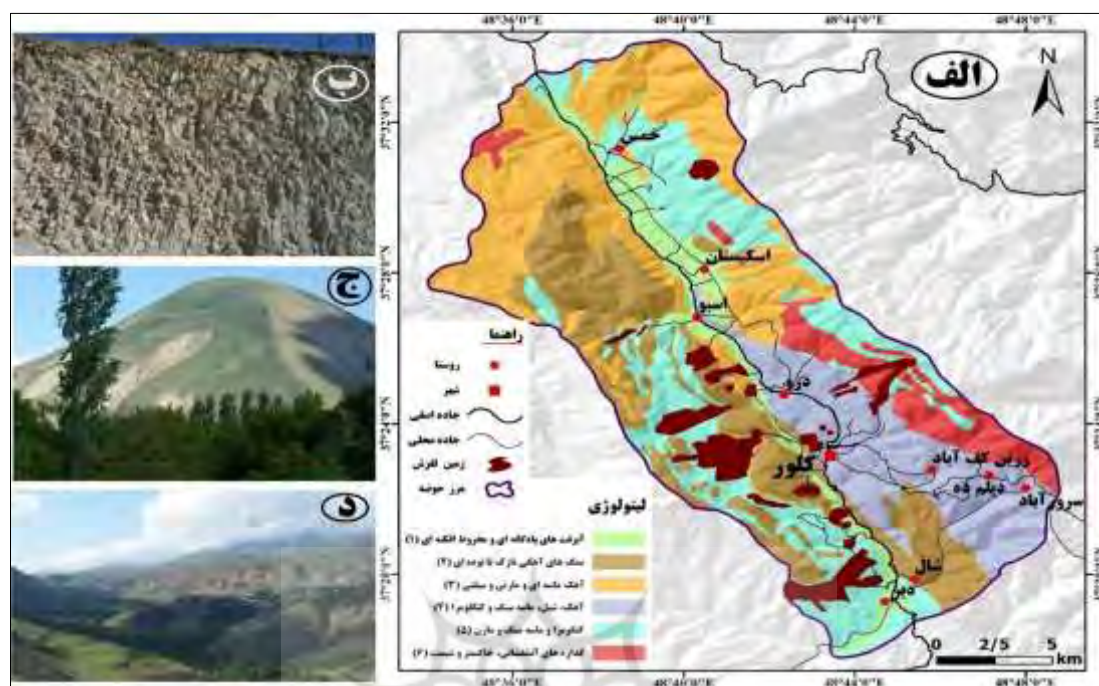
جهت بررسی و تحلیل پراکنش زمین لغزش‌ها نسبت به عوامل مؤثر و هر یک از رده‌های این عوامل، ابتدا مساحت کل منطقه مورد مطالعه، مساحت کل پهنه‌های لغزش یافته و مساحت هر یک از کلاس‌ها برای تمامی عوامل مؤثر محاسبه گردید. سپس با تلاقی نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با عوامل، مساحت پهنه‌های لغزش یافته برای تمامی کلاس‌ها محاسبه گردید. لازم به ذکر است که تمام محاسبات فوق در محیط نرم‌افزار ArcGIS و بر روی لایه‌های کلاس‌بندی شده عوامل مؤثر صورت گرفته است. در مرحله بعد، درصد مساحت کلاس‌های هر عامل و درصد سطح لغزش یافته آن‌ها به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\text{رابطه (۷)} \quad 100 * \frac{\text{مساحت کلاس}}{\text{مساحت کل منطقه}} = \text{درصد مساحت هر کلاس}$$

$$\text{رابطه (۸)} \quad 100 * \frac{\text{مساحت لغزش‌های کلاس}}{\text{مساحت کل لغزش‌ها}} = \text{درصد لغزش‌ها در هر کلاس}$$

۳- نتایج و بحث

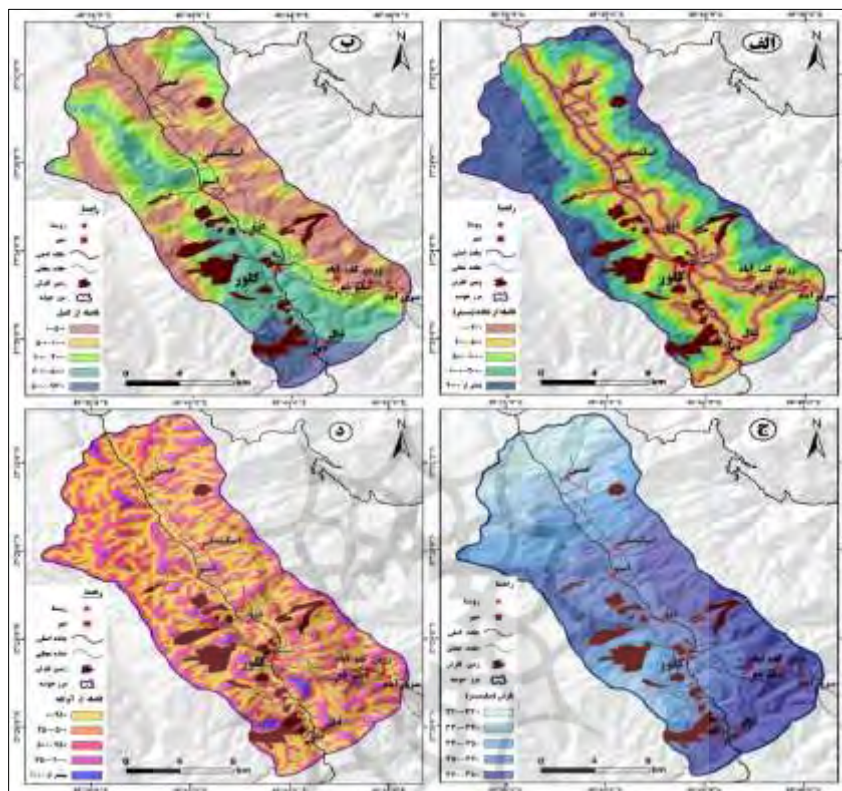
نتایج حاصل از کار میدانی، بررسی الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های رخ داده، وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از مدل ANP و قضیه بیز در شکل‌های ۲ الی ۴ و جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. بر اساس شکل ۲ بیشترین مساحت واحدهای سنگ‌شناسی آهک ماسه‌ای و مارنی و سیلتی و همچنین سنگ‌های آهکی نازک تا توده‌ای با مساحت ۱۳۱/۱۶ کیلومتر مربع (۴۴/۸۵ درصد از منطقه)؛ شیل و ماسه‌سنگ سازند شمشک با مساحت ۷۲/۴۴ کیلومتر مربع (۲۴/۶ درصد مساحت منطقه)؛ کنگلومرا و ماسه‌سنگ و مارن با مساحت ۵۸/۹۳ کیلومتر مربع (۲۰/۰۸ درصد از منطقه) و واحد آهک، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا با مساحت ۴۷/۱۵ کیلومتر مربع (۱۶/۰۷ درصد از منطقه) گسترده‌ترین سازندهای موجود هستند. مقایسه سازندهای زمین‌شناسی نسبت به وقوع زمین‌لغزش نشان می‌دهد، دو سازند اولی که دارای مارن و سیلت هستند، بیشترین رخداد زمین‌لغزش را داشته‌اند. باین‌حال، در سایر سازندها مانند سازندهای آتشفشانی نیز سطوح لغزشی مشاهده می‌شود که به دلیل وجود رسوبات آواری و شیب زیاد منطقه است. در مجموع، توده‌های آهکی مارنی و ماسه‌ای و همچنین ماسه‌سنگ و مارن در جنوب غرب منطقه بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش داشته‌اند (شکل ۲ - الف تا د). نتایج تعیین وزن کلاس‌های عامل سنگ‌شناسی بر اساس قضیه بیز نیز نشان داد که سازندهای طبقه ۵ و ۳ (شکل ۲ و جدول ۱) به ترتیب با ۲۰/۸۸ و ۱۹/۷ بیشترین وزن را دریافت کردند و در مقابل سازندهای آبرفتی (طبقه ۱) کمترین وزن را کسب کردند.



شکل ۲- الف) الگوی مکانی زمین لغزش های منطقه کلور در ارتباط با واحدهای لیتولوژیکی؛ ب) لایه های آهک ماسه ای و سیلتی خرد شده و درز و شکاف دار در انتهای دره کلور؛ ج) لغزش در دامنه پرشیب در منطقه کلور؛ د) نمایی از دره کلور و دامنه های لغزشی آن

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیشترین زمین لغزش های اتفاق افتاده در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر (کلاس های ۰ تا ۲۰۰ متر و ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر) جاده ها واقع هستند (شکل ۳-الف). گرچه در وقوع زمین لغزش های بزرگ قبلی جاده سازی نقش کمتری داشته ولی به علت نزدیکی این جاده ها با دامنه های مستعد لغزش اغلب در معرض تهدید هستند و توسعه غیراصولی آن ها سبب تشدید لغزش در آینده خواهد شد. علاوه بر این، از نظر فاصله از گسل، بیشترین زمین لغزش ها در فاصله کمتر از ۵۰۰۰ متر و عمدتاً در فاصله ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر رخ داده اند. نزدیک ترین گسل موجود در محدوده مورد مطالعه، گسل کلور با سازوکار معکوس است. گسل مذکور در قسمت های جنوبی و غربی منطقه باعث راندگی سازند شمشک نیز شده است (شکل ۳-ب). همچنین از نظر میزان بارش بیشترین زمین لغزش ها در دامنه بارشی ۳۳۰ تا ۳۵۰ میلی متر واقع هستند (شکل ۳-ج). در نهایت، از نظر فاصله از رودخانه نیز بیشترین سطوح لغزشی در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر آبراه ها به وقوع پیوسته اند (شکل ۳-د). نتایج تعیین وزن کلاس های عوامل فاصله از جاده، فاصله از گسل، میزان بارش و فاصله از آبراه ها بر اساس قضیه بیز نیز نشان داد که فاصله ۰ تا ۲۰۰ متر از جاده با وزن ۲۳/۲۴، فاصله ۰ تا ۵۰۰ متر از گسل با وزن ۴۷/۱۳، میزان بارش ۳۶۰ تا

۳۸۰ با وزن ۱۸/۶۵ و فاصله ۰ تا ۲۵۰ متر از آبراهه با وزن ۲۶/۸ بیشترین وزن را در میان کلاس‌های هر عامل به خود اختصاص دادند (جدول ۱).



شکل ۳- الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه کلور در ارتباط با عوامل مؤثر: الف) فاصله از جاده؛ ب) فاصله از گسل؛ ج) بارش؛ د) فاصله از آبراهه

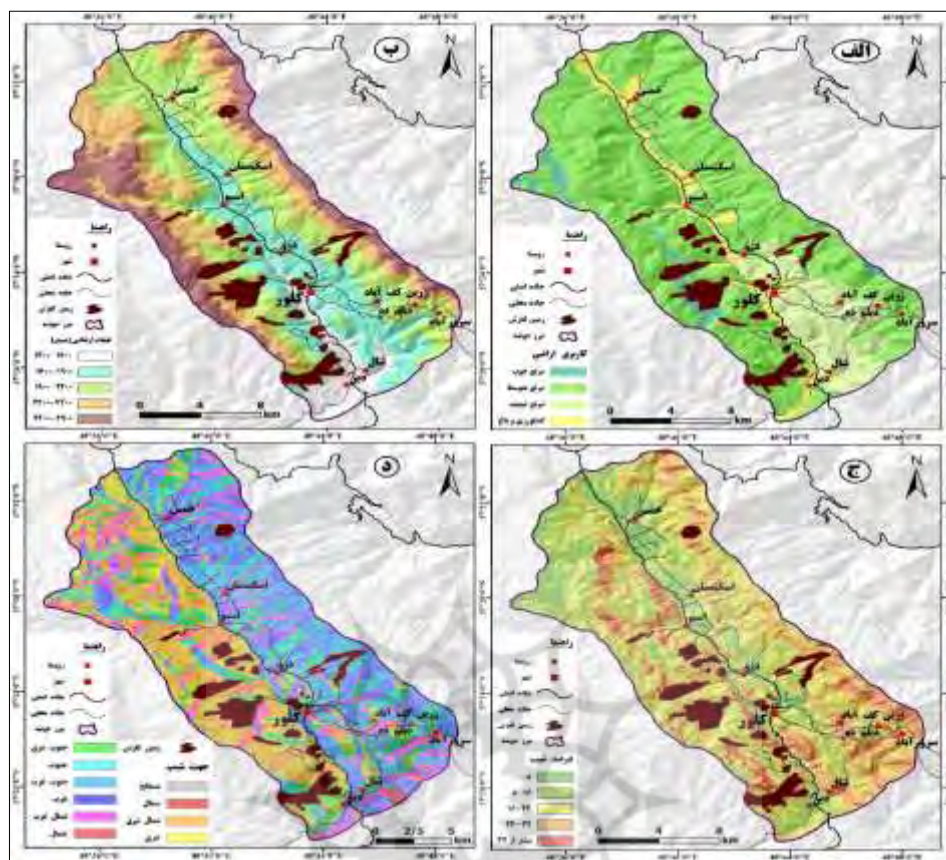
جدول ۱- اطلاعات مربوط به وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از قضیه بیز

پارامتر	طبقه	W^+	W^-	C	$S2(W^+)$	$S2(W^-)$	Sc	W_{final}
سنگ شناسی	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲	۱/۰۰۳۲	-۰/۰۹۸۵	۱/۱۰۱۷	۰/۰۰۸۵۲	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۹۳۶	۱۱/۸۷
	۳	۰/۹۹۸	-۱/۰۳۶	۲/۰۳۴	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۸۷۴	۰/۱۰۳۳	۱۹/۷
	۴	۰/۸۷۴	-۰/۰۰۹۸۵	۰/۸۸۳۸۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۷۷۸۴	۱۱/۳۵
	۵	۰/۸۵۷	-۰/۰۴۷۱	۰/۹۰۴۱	۰/۰۰۱۲۵	۰/۰۰۰۶۲۵	۰/۰۴۳۳	۲۰/۸۸
	۶	۰/۷۴۱	-۰/۰۵۸۹	۰/۰۷۹۹۹	۰/۰۰۴۳۲	۰/۰۰۲۳۶	۰/۰۶۲۵	۱/۲۸۸
فاصله از آبراهه (متر)	۰ - ۲۵۰	۰/۳۸۷	-۱/۰۲۵	۱/۴۱۲	۰/۰۰۲۲۲	۰/۰۰۰۵۵۵	۰/۰۵۲۶۷	۲۶/۸
	۲۵۰ - ۵۰۰	۰/۳۸۵	-۰/۰۹۵	۰/۴۸	۰/۰۰۴۲۳	۰/۰۰۰۷۶۶	۰/۰۷۰۶	۶/۸

پارامتر	طبقه	W ⁺	W ⁻	C	S2(W ⁺)	S2(W ⁻)	Sc	W _{final}
	۵۰۰ - ۷۵۰	۰/۴۹۹	-۰/۲۰۲	۰/۶۵۱	۰/۰۰۹۱۷	۰/۰۰۲۳۷	۰/۱۰۷۴	۶/۰۶
	۷۵۰ - ۱۰۰۰	۰/۶۸۴	-۰/۰۹۵	۰/۸۷۹	۰/۰۸۳۳	۰/۰۰۳۳۹	۰/۲۹۴۴	۲/۶۴
	بیشتر از ۱۰۰۰	۰/۸۱۱	-۰/۰۶۲۵	۰/۸۷۳۵	۰/۶۷۲	۰/۰۳۶۷	۰/۸۴۲	۱/۰۳
فاصله از جاده (متر)	۰ - ۲۰۰	۰/۹۶۵	-۱/۰۰۲۵	۱/۹۶	۰/۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۷۳۳	۰/۰۸۴۳۳	۲۳/۲۴
	۲۰۰ - ۵۰۰	۰/۲۵۸	-۰/۰۳۵۷	۰/۲۹۳۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۰۲۵۵	۱۱/۵۱
	۵۰۰ - ۱۵۰۰	۰/۵۲۴	-۰/۰۰۸۵۲	۰/۵۳۲۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۸۳۱	۰/۰۷۶۷	۶/۹۴
	۱۵۰۰ - ۲۰۰۰	۱/۰۱۲۴	-۰/۳۵۱	۱/۳۷۵	۰/۰۷۸۹	۰/۰۰۷۷۷۱	۰/۲۹۴۴	۴/۶۷
	بیشتر از ۲۰۰۰	۰/۹۸۷۵	-۰/۰۸۹۴	۱/۰۷۷	۰/۰۵۵۵	۰/۰۰۴۶۷	۰/۲۴۵۳	۴/۴
فاصله از گسل (متر)	۰ - ۵۰۰	۰/۸۸۱	-۰/۱۲۸۵	۱/۰۱۲	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۲۱۴۷	۴۷/۱۳
	۵۰۰ - ۱۰۰۰	۰/۸۱۵	-۰/۰۹۸	۰/۸۱۳	۰/۰۰۰۷۳۴	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۲۸۶۷	۲۸/۳۵
	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰	۱/۰۰۰۳	-۰/۶۶۶	۱/۶۶۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۶۷۶	۲۴/۶۴
	۲۰۰۰ - ۵۰۰۰	۰/۶۵۰	-۰/۰۸۵۶۲	۰/۸۳۵۶	۰/۰۰۴۴۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۳۱۶	۲۲/۸
	۵۰۰۰ - ۹۷۰۰	۰/۶۸۷۴	-۰/۰۹۸۵۴	۰/۸۸۶	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۰۵۴۳	۱۴/۴۷
بارش	۳۲۰ - ۳۳۰	۰/۰۵۶	-۰/۰۰۴۱	۰/۰۶۰۱	۰/۰۰۰۳۷۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۲۰۴۴	۲/۹۴
	۳۳۰ - ۳۴۰	۰/۰۷۶	-۰/۰۰۹۵۱	۰/۰۸۵۵۱	۰/۰۰۷۴۳	۰/۰۰۰۰۶۲۷	۰/۰۲۸۳۸	۳/۰۱
	۳۴۰ - ۳۵۰	۱/۰۲۵	-۰/۱۱۱	۱/۱۳۶	۰/۰۰۵۱۴	۰/۰۰۰۰۹۸۳	۰/۰۷۲۳۷	۱۵/۷
	۳۵۰ - ۳۶۰	۱/۲۳	-۰/۱۶۵	۱/۳۹۵	۰/۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۰۷۵۱	۰/۰۸۵۲	۱۶/۳۷
	۳۶۰ - ۳۸۰	۰/۹۵۲	-۰/۰۸۵۲	۱/۰۳۷۲	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۰۰۰۶۴۳	۰/۰۵۵۶۱	۱۸/۶۵

نتایج همچنین نشان داد که از نظر کاربری اراضی بیشترین سطوح لغزشی در مراتع با پوشش متوسط و فقیر رخ داده است (شکل ۴-الف). علاوه بر این، از نظر ارتفاع، بیشترین زمین لغزشها در دامنه ارتفاعی ۱۶۰۰ الی ۱۹۰۰ متر اتفاق افتاده است (شکل ۴-ب). همچنین از نظر میزان شیب بیشترین زمین لغزشها در کلاسهای شیب ۲۴ تا ۳۲ درجه و بیشتر از ۳۲ درجه به وقوع پیوسته‌اند (شکل ۴-ج). در نهایت، از نظر جهات شیب نیز بیشترین سطوح لغزشی در دامنه‌های با جهت شمالی و شمال شرقی رخ داده‌اند (شکل ۴-د).

نتایج تعیین وزن کلاس‌های عوامل کاربری اراضی، ارتفاع، شیب و جهت شیب بر اساس قضیه بیز نیز نشان داد که مراتع فقیر با وزن ۲۴/۳۴، دامنه ارتفاعی ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ با وزن ۱۸/۱۲، کلاس شیب ۲۴ تا ۳۲ درجه با وزن ۴۳/۷ و دامنه‌های با جهت شمال شرقی با وزن ۴۸/۷ بیشترین وزن را در میان کلاس‌های هر عامل را به خود اختصاص دادند (جدول ۲).



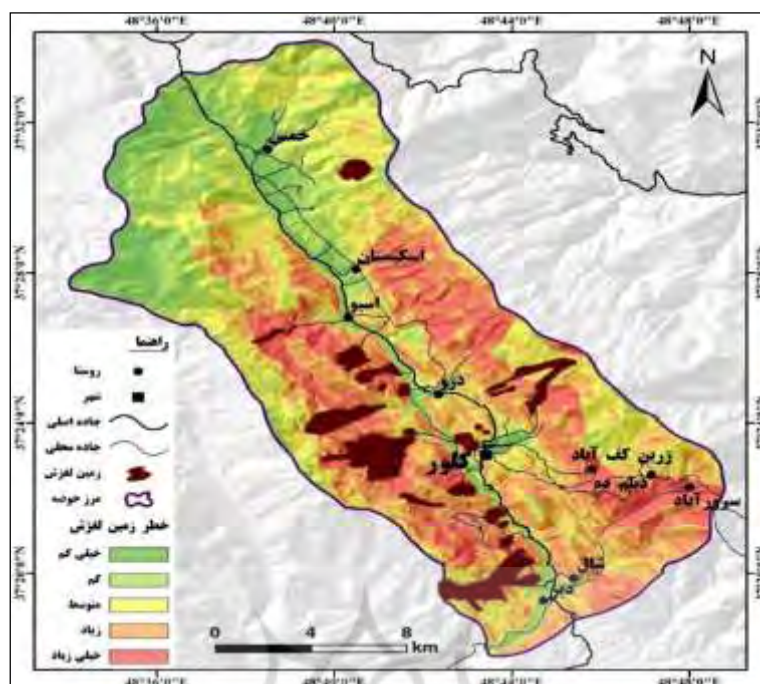
شکل ۴- الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه کلور در ارتباط با عوامل مؤثر: الف) کاربری اراضی، ب) ارتفاع، ج) شیب، د) جهت شیب

جدول ۲- اطلاعات مربوط به وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از قضیه بیز (ادامه جدول ۱)

W _{final}	Sc	S2(W ⁻)	S2(W ⁺)	C	W ⁻	W ⁺	طبقه	پارامتر
۲۴/۳۴	۰/۰۶۲۹۴	۰/۰۰۰۶۳۲	۰/۰۰۱۳۳	۱/۵۳۲	-۰/۰۰۹۵	۱/۵۲۳	مراتع فقیر	کاربری اراضی
۶/۶۱	۰/۱۶۰۳	۰/۰۰۰۶۲۱	۰/۰۱۹۴۹	۱/۰۶۱	-۰/۰۵۴۷	۱/۰۰۰۶۳	مراتع متوسط	
۲/۲	۰/۴۵۰۶	۰/۰۰۰۷۹۱	۰/۰۱۹۵۲	۱/۰۰۲	-۰/۰۰۲۵۷	۱	مراتع خوب	
۲	۰/۰۳۵۴	۰/۰۰۰۰۵۳۷	۰/۰۰۱۱۲	۰/۰۷۱۵	-۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۶۷	باغ	
۱۸/۱۲	۰/۱۰۹۶	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۷۸۲	۱/۹۸۷	-۱/۰۰۲۵	۰/۹۸۵	۱۳۰۰ - ۱۶۶۰	ارتفاع (متر)
۱۳/۸	۰/۰۶۴۲	۰/۰۰۰۶۷۱	۰/۰۰۰۳۴۵	۰/۸۸۶	-۰/۰۴۴۳	۰/۸۴۲۰	۱۶۶۰ - ۱۹۰۰	
۳/۴	۰/۰۲۳۵۷	۰/۰۰۰۰۴۳۹	۰/۰۰۰۵۱۲	۰/۰۸	-۰/۰۲۸	۰/۰۵۲	۱۹۰۰ - ۲۱۵۰	
۰/۶۹۴	۰/۰۹۷۸	۰/۰۰۰۴۴۴	۰/۰۰۰۹۱۳	۰/۰۶۷۹	-۰/۰۰۳۹	۰/۰۶۴	۲۱۵۰ - ۲۴۰۰	
۰/۰۳۰۸	۰/۴۱۲۵	۰/۰۰۰۳۶۲	۰/۰۰۰۸۱۱	۰/۰۷۴۷	-۰/۰۰۳۵	۰/۰۷۱۲	۲۴۰۰ - ۲۹۰۰	
۱۹/۷۹	۰/۰۳۸۴۵	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۰۰۰۱۴	۰/۷۶۱	-۰/۲۲۳	۰/۵۳۸	۰ - ۸	

پارامتر	طبقه	W ⁺	W ⁻	C	S2(W ⁺)	S2(W ⁻)	Sc	W _{final}
	۸- ۱۶	۰/۶۱۲	-۰/۱۶۲۳	۰/۷۷۵۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۶۸۲	۱۱/۳۷
	۱۶- ۲۴	۰/۵۸۶	-۰/۱۱۲۵	۰/۶۹۸۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۵۶۱۲	۱۲/۴۴
	۲۴- ۳۲	۰/۵۱۰	-۰/۱۸۷۵	۰/۶۹۷۵	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۰۱۵۹۶	۴۳/۷
	بیشتر از ۳۲	۰/۶۲۱۴	-۰/۱۴۵۲	۰/۷۶۶۶	۰/۰۰۳۴۱	۰/۰۰۰۴۵۲	۰/۰۷۸۵۲	۸/۹۹۷
خطر	N	۰/۴۵۲	-۰/۵۲۷	۰/۹۷۹	۰/۰۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۲۱۷	۴۵/۱۱
	NE	۰/۶۸۳	-۰/۰۴۳۹	۰/۷۲۶۹	۰/۰۰۰۱۲۴	۰/۰۰۰۰۹۸۷	۰/۰۱۴۹۲	۴۸/۷
	E	۰/۷۰۸	۰/۰۴۶۲	۰/۷۵۴۲	۰/۰۰۹۸۲	۰/۰۰۰۰۹۲۵	۰/۰۹۹۵۶	۷/۵۷
	SE	۰/۶۵۲	-۰/۴۰۱	۱/۰۵۳	۰/۰۰۰۸۳۱	۰/۰۰۰۰۷۱۳	۰/۰۳	۳۵/۱
	S	۰/۸۵۷	-۰/۳۶۱	۰/۸۹۳۱	۰/۰۲۵۴	۰/۰۰۲۳	۰/۱۶۶۴	۵/۳۶
	SW	۰/۵۲۷	-۰/۰۲۹۷	۰/۵۵۶۷	۰/۰۰۸۵۴	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۹۴۳۴	۵/۹
	NW	۰/۲۵۸	-۰/۰۳۵۷	۰/۲۹۳۷	۰/۰۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۴۵۸	۰/۰۱۷۹۹	۱۶/۳۲
	W	۰/۳۲۵	-۰/۰۹۸۵۲	۰/۴۲۳۵	۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۲۶۸۷	۱۵/۷۶
	Flat	۰/۹۴۸	-۰/۰۵۳۲	۱/۰۰۱۲	۰/۰۳۴۵	۰/۰۰۳۱۴	۰/۱۹۴۶	۵/۱۴

نتایج نهایی تعیین مناطق با خطر وقوع زمین‌لغزش در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس شکل مذکور، پهنه‌های با خطر خیلی زیاد (۸۴/۱۹ کیلومتر مربع) و زیاد (۷۴/۵۱ کیلومتر مربع) به ترتیب حدود ۲۸/۶۹ و ۲۵/۴۰ درصد از منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند. علاوه بر این، پهنه‌های با خطر متوسط حدود ۶۳/۲۹ کیلومتر مربع برابر با ۲۱/۵۷ درصد از منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته‌اند. در نهایت، پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم نیز به ترتیب با مساحت ۲۹/۷۳ (۱۴/۲۱ درصد) و ۴۱/۶۸ کیلومتر مربع (۱۰/۱۳ درصد)، دربرگیرنده کمترین سطح از منطقه مورد مطالعه هستند؛ بنابراین، بیش از ۵۴ درصد از منطقه کلور (حوضه آبریز بالادست رودخانه شاهرود) دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش است که نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های محیطی و توسعه‌ای است.

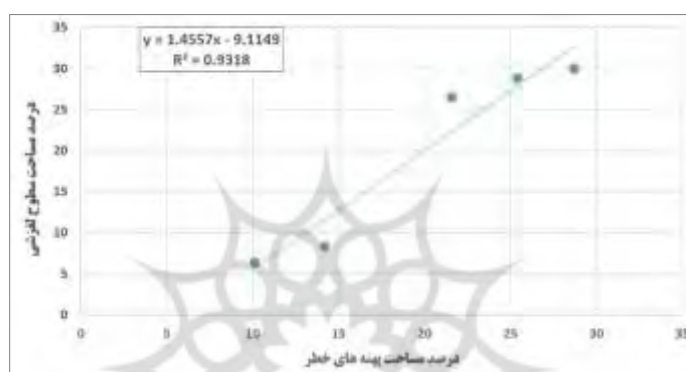


شکل ۵- نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور

نتایج صحت سنجی تعیین مناطق خطر رخ داد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ و شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد بیش از ۵۴ درصد منطقه را شامل می‌شوند و حدود ۶۵ درصد از سطوح لغزشی موجود در این پهنه‌ها واقع هستند که دلیل اصلی آن شیب زیاد و لیتولوژی سست است. علاوه بر این، حدود ۲۶/۵ درصد از سطوح لغزشی در پهنه‌های با خطر متوسط که ۲۱/۵۷ درصد منطقه را در بر گرفته، واقع هستند. در نهایت، حدود ۱۴/۷۰ درصد از سطوح لغزشی نیز در پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم که ۲۴/۳۴ درصد منطقه را شامل می‌شوند، گسترده شده است. با توجه به بررسی‌های میدانی انجام شده دلیل وجود سطوح لغزشی در پهنه‌های خطر کم و خیلی کم عمدتاً حرکت و گسترش زبانه‌های لغزشی بزرگ در پای دامنه‌های پر شیب و کف دره‌ها است که روی سازندهای آبرفتی و اراضی کم شیب را پوشانده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده و رابطه درصد مساحت پهنه‌های خطر و درصد سطح لغزشی (شکل ۶) با R^2 بیش از ۰/۹۳، صحت نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای و قضیه بیز قابل قبول است. همچنین یافته مذکور با نتایج پژوهش‌های قبلی از جمله روستایی و همکاران (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴)، اسفندیاری درآباد و بهشتی جاوید (۱۳۹۵)، شمس و عزیزاده (۱۳۹۷)، رنجبری و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد. به طوری که این مطالعات نیز نشان دادند که مدل‌های تحلیل شبکه‌ای و قضیه بیز برای مناطق مورد مطالعه آنان نتایج قابل قبولی ارائه کرده است.

جدول ۳- پهنه‌های خطر زمین لغزش و درصد سطوح لغزشی

خطر زمین لغزش	مساحت پهنه خطر (km ²)	درصد پهنه خطر	مساحت زمین لغزش (km ²)	درصد زمین لغزش
خیلی کم	۲۹/۷۳	۱۰/۱۳	۰/۹۲	۶/۲
کم	۴۱/۶۸	۱۴/۲۱	۱/۲۰	۸/۱
متوسط	۶۳/۲۹	۲۱/۵۷	۳/۰۵	۲۰/۷
زیاد	۷۴/۵۱	۲۵/۴۰	۴/۱۲	۲۸
خیلی زیاد	۸۴/۱۹	۲۸/۶۹	۵/۴۵	۳۷
جمع	۲۹۳/۴	۱۰۰	۱۴/۷۴	۱۰۰



شکل ۶- رابطه درصد مساحت پهنه‌های خطر و درصد سطح لغزشی

۴- جمع‌بندی

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های موجود در یک منطقه و پهنه‌بندی آن یکی از فاکتورهای اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینه مؤثر است. ارزیابی حساسیت زمین لغزش، فرآیندی پیچیده و چند مرحله‌ای است که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. هراندازه انتخاب عوامل مؤثر و کلاس‌بندی آن‌ها دقیق‌تر باشد، نتیجه به‌دست‌آمده نیز به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. نقشه‌های مناطق مستعد زمین لغزش، همان‌طور که از ابتدا برنکنف و همکاران^۱ (۱۹۹۸)، بر آن تأکید کردند، ابزاری ارزشمند برای برنامه‌ریزی زمین و کاهش هزینه‌های رخ داد زمین لغزش هستند. باین حال، نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش برای اهداف برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری چشم‌انداز آن‌طور که توسط محققان اولیه (براب، ۱۹۹۱)، پیش‌بینی شده بود، رایج نشده است. باوجوداین، استانداردهای مشترک و افزایش دسترسی به داده‌های زمین لغزش و اطلاعات موضوعی به گسترش ارزیابی‌های حساسیت زمین و به‌ویژه برنامه‌ریزی‌های محیطی و آمایش سرزمین در آینده کمک می‌کند. این نکته را نیز باید در نظر گرفت که نتایج حاصل از تعیین پهنه‌های خطر زمین لغزش

1. Bernknopf et al.

ممکن است برای کاربردهای مختلف تغییر کند (به‌عنوان مثال استفاده از آن در سیستم‌های هشدار اولیه یا استفاده از آن در آمایش سرزمین و مدیریت محیطی).

در پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و احتمالات شرطی (قضیه بیز)، عرصه‌های آسیب‌پذیر و مناطق حساس نسبت به احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش شناسایی و معرفی گردید که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آتی مورد توجه مسئولان امر قرار گیرد و از خسارت‌های مربوطه جلوگیری به عمل آید. در این منطقه شیب زیاد و وجود سازندهای آهکی مارنی، شیلی آهکی و ماسه‌سنگ‌های مارن‌دار ژوراسیک تا کرتاسه که بر اثر نئوتکتونیک فعال منطقه درز و شکاف‌دار شده و بر اثر عوامل تخریب مکانیکی به‌شدت خرد شده هستند، زمینه را برای ناپایداری دامنه‌های این منطقه فراهم کرده است. شواهد متعددی از زمین‌لغزش‌های پلیستوسن تا عهدحاضر در محدوده مطالعاتی قابل تشخیص است. زمین‌لغزش‌های بزرگ منطقه عمدتاً در دامنه‌های آهکی مارنی و شیلی قرار دارند و پهنه‌های سولیفلوکسیونی در سنگ‌های آهکی نازک لایه و ماسه‌سنگ‌های مارن‌دار ایجاد شده‌اند، پهنه‌های سولیفلوکسیونی دامنه‌های جنوب شهر کلور با اینکه حرکت نسبتاً کندی دارند ولی از نظر تعادل حدی قابلیت آن را دارند که در هنگام وقوع زمین‌لرزه یا بارش‌های مداوم و شدید به زمین‌لغزش‌های بزرگ تبدیل شوند. در این صورت، به علت قرار داشتن سطوح لغزش در بخش‌های میانی و مرتفع دامنه‌ها، محدوده بزرگ‌تری را در معرض تهدید قرار داده و شدت تخریب آن‌ها در بخش پایین‌دست دامنه زیاد خواهد بود؛ بنابراین، انتخاب روش‌های مناسب پایدارسازی نظیر زهکشی زیرسطحی می‌تواند در کاهش مخاطرات ناشی از این پدیده مؤثر باشد. در دامنه‌های این منطقه باید از ایجاد ترانشه‌های غیر اصولی عمود بر شیب و حفاری و خاک‌برداری‌های پای دامنه‌ها پرهیز شود. همچنین احداث دیواره‌های حائل در بخش‌هایی از ساحل رودخانه‌های اصلی بخصوص در امتداد دره کلور از حفر و زیرشویی پای دامنه‌های لغزشی جلوگیری نموده و شدت لغزش‌ها را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، در مناطقی که با خطر خیلی زیاد و زیاد مشخص شده‌اند، بهتر است مطالعات پایداری شیب‌ها متناسب با شرایط ویژه هر دامنه انجام شود؛ زیرا مکانیسم لغزشی دامنه‌ها در این منطقه یکسان نیست. درنهایت با توجه به هزینه‌بر بودن و کارایی ضعیف روش‌های سازه‌ای برای تثبیت دامنه‌های جنوبی نقاط مسکونی منطقه کلور، بهتر است محدودیت‌های لازم برای احداث تأسیسات در ساحل جنوبی رودخانه و پای دامنه‌ها اعمال گردد.

کتابنامه

- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ ابراهیم، بهشتی جاوید؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز ANP (مطالعه موردی: گردنه حیران). نشریه هیدروژئومورفولوژی. شماره ۸، ۹۳-۱۱۱. DOI: 20.1001.1.23833254.1395.3.8.5.3
- پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ گلی جیرنده، عباس؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. شماره ۶۲، ۱۰۹-۱۲۱. DOI: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.10.9
- پیش‌نماز احمدی، مجید؛ محمد زاده، کیوان؛ تقی، مهدی؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش و خطرپذیری سکونتگاه‌های روستایی در زیرحوضه رودبار با استفاده از روش تحلیل شبکه (ANP). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۱، ۲۱۱-۲۲۵. DOI: 20.1001.1.22519424.1397.7.1.14.8
- رنجبری، احد؛ عابدینی، موسی؛ مختاری، داود؛ ۱۳۹۸. تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در محیط GIS (مطالعه موردی: پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجان شرقی). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۱، ۷۰-۸۸.
- http://www.geomorphologyjournal.ir/article_91726.html
- روستایی، شهرام؛ خدائی، لیلا؛ مختاری، داود؛ رضا طبع، خدیجه؛ خدائی، فاطمه؛ ۱۳۹۴. کاربرد تحلیل شبکه‌ای (ANP) در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده سد قلعه چای. مجله مخاطرات محیط طبیعی. شماره ۵، ۵۹-۷۴. DOI: 10.22111/JNEH.2015.2475
- روستایی، شهرام؛ مختاری، داود؛ حسینی، زهرا؛ اطمانی حقویران، مهدی؛ ۱۳۹۴. بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز رودخانه میمه به روش تحلیل شبکه. مجله هیدروژئومورفولوژی. شماره ۴، ۱۰۱-۱۲۳. DOI: 20.1001.1.23833254.1394.2.4.6.9
- شاهکوئی، اسماعیل؛ سارلی، رضا؛ درویشی، یوسف؛ امان‌پور قرائی، سمانه؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی عرصه‌های آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات طبیعی با تأکید بر زمین‌لغزش مطالعه موردی: زیر حوضه گرگان رود شهرستان گرگان. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۲، ۵۲-۷۰. <http://noo.rs/VdIKD>
- شکاری‌بادی، علی؛ معتمدی راد، علی؛ محمدی نیا، ملیحه؛ ۱۳۹۴. تلفیق مدل ANP و شاخص آنتروپی شانون در برآورد عوامل مؤثر در وقوع و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه فاروبرومان نیشابور). مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. شماره ۲۲، ۸۹-۱۰۳.
- <http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-1001-fa.html>
- شمس، جلیل؛ علیزاده، البروس؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالات شرطی (قضیه بیز)، مطالعه موردی: قاراداغ (ارسباران، از قره‌سو تا دره دیز). نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی. شماره ۶۳، ۱۶۱-۱۸۲. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=527864>

صفری، امیر؛ هاشمی، معصومه؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با مدل آنتروپی و منطق فازی (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). *فصلنامه جغرافیای طبیعی*. شماره ۳۴. ۶۲-۴۳. [DOI:10.20085656.1395.9.34.3.1](https://doi.org/10.20085656.1395.9.34.3.1)

عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ فتحی، محمد حسین؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز و ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان). *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. شماره ۱. ۱۵۹-۱۴۲.

[DOI:10.22519424.1395.5.1.10.0](https://doi.org/10.22519424.1395.5.1.10.0)

مجد باوی، اکبر؛ مومی پور، مهدی؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در محدوده سد شهید عباسپور. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. شماره ۱۰. ۸۰-۶۵. [DOI: 10.22067/GEOEH.2021.67029.0](https://doi.org/10.22067/GEOEH.2021.67029.0)

محمدخان شیرین؛ ویسی، عبدالکریم؛ باقری، کیوان؛ ۱۳۹۳. پتانسیل سنجی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (منطقه کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه). *مجله جغرافیایی سرزمین*. شماره ۴. ۱۰۳-۸۹.

محمودی، فرج اله؛ ۱۳۸۲. ژئومورفولوژی دینامیک. انتشارات دانشگاه تهران.

https://sarzamin.srbiau.ac.ir/article_7991.html

مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ یمانی، مجتبی؛ مقدم، عباس و زمانزاده، سید محمد؛ ۱۳۹۴. تغییرات محیطی بعد از رخداد زمین‌لغزش کبیرکوه و تأثیر آن در شکل‌گیری محوطه‌های باستانی محدوده دریاچه جایدرد. *فصلنامه کواترنری ایران*. شماره ۱. ۱۴-۱.

<http://journal.iranqua.ir/article-1-322-fa.html>

مقیم، ابراهیم؛ باقری سید شکری، سجاد؛ صفراد، طاهر؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاقدیس نثار زاگرس شمال غربی). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. شماره ۷۹. ۷۹-۹۰.

[DOI:10.22059/JPHGR.2012.24735](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2012.24735)

نظم‌فر، حسین؛ بهستی، ابراهیم؛ ۱۳۹۵. کاربرد مدل ترکیبی فرآیند تحلیل شبکه و منطق فازی در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. شماره ۱. ۶۸-۵۳.

[DOI:10.22108/GEP.2016.20793](https://doi.org/10.22108/GEP.2016.20793)

یمانی، مجتبی؛ خداپور، سیروس؛ مصطفایی، ابولفضل؛ شادمان رود پستی، مجید؛ ۱۳۹۱. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محی GIS. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. شماره ۴. ۵۶-۳۹.

[DOI: 10.20085362.1391.23.4.3.7](https://doi.org/10.20085362.1391.23.4.3.7)

Basu T, Pal S., 2019. RS-GIS based morphometrical and geological multi- criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal India. *Advances in Space Research* 3: 1253-1269. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.033>

Bera S, Guru B, Ramesh V., 2019. Evaluation of landslide susceptibility models: a comparative study on the part of Western Ghat Region, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 17: 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.010>

Bernknopf RL, Cambell RH, Brookshire DS, Shapiro CD., 1998. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 25: 39-56.

<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxv.1.39>

- Brabb EE., 1991. The world landslide problem. *Episodes Journal of International Geoscience* 14: 52-61. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70197558>
- Chen K, Blong R, Jacobson C., 2012. MCE-Risk: Integrating Multicriteria Evolution and GIS for Risk Decision-Making in Natural Hazards. *Environmental Modeling & Software* 16: 387-397. DOI:10.1016/S1364-8152(01)00006-8
- Chen W, He B, Zhang L, Nover D., 2016. Developing an integrated 2D and 3D WebGIS based platform for effective landslide hazard management. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 20: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.003>
- D'Errico G E, Murru, N., 2012. Fuzzy Treatment of Candidate Outliers in Measurements. *Advances in Fuzzy Systems* 1-6. DOI:10.1155/2012/783843
- Denison DGT, Holmes CC, Mallick BK, Smith AFM., 2002. *Bayesian Methods for Nonlinear Classification and Regression*. John Wiley & Sons, Chichester, west Sussex. <https://www.wiley.com/en-us/Bayesian+Methods+for+Nonlinear+Classification+and+Regression-p-9780471490364>
- Faraji Sabokbar H, Shadman Roodposhti M, Tazik E., 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis. *Journal of Geomorphology* 226: 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.026>
- Fathi M H, Khohdel K, Kandi Shoreh A, Ashrafi feini Z, Khaliji M A., 2015. The combination of spectral and spatial data in zoning of landslide susceptibility (Case study: Sangorchay reservoir). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 2: 515-527. <http://www.innspub.net/wp-content/upl...>
- Hattanji T, Moriwaki H., 2009. Morphometric Analysis of Relic Landslides Using Detailed Landslide Distribution Maps: Implications for Forecasting Travel Distance of Future Landslides. *Journal of Geomorphology* 3: 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.009>
- Lantada N, Pujades L, Barbat A., 2009. Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, *Natural Hazards* 51:501-524. DOI:10.1007/s11069-007-9212-4
- Melchiorre C, Tryggvason A., 2015. Application of a fast and efficient algorithm to assess landslide-prone areas in sensitive clays in Sweden. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12: 2703-2713. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2703-2015>
- Neaupane KM, Piantanakulchai M., 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation, *Engineering Geology* 85: 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.003>
- Nefeslioglu HA, Duman TY, Durmaz S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Journal of Geomorphology* 94: 401-418. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.036>
- Piacentinia D, Troiani F, Soldati M, Notarnicola C, Savelli D, Schneiderbauer S, Strada C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Journal of Geomorphology* 151-152: 196-206. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.02.003
- Pradhan B., 2011. An Assessment of the Use of an Advanced Neural Network Model with Five Different Training Strategies for the Preparation of Landslide Susceptibility Maps. *Journal of Data Science* 9: 65-81. DOI:10.6339/JDS.201101_09(1).0006
- Samodra G, Chen G, Sartohadi J, Kasama K., 2018. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta Java. *Journal of Geomorphology* 306: 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.035>

- Shadman Roodposhti M, Rahimi S, Jafarbeglou M., 2013. PROMETHEE II and fuzzy AHP: an enhanced GIS-based landslide susceptibility mapping. *Journal of Nat Hazards* 1: 95-77. DOI: [10.1007/s11069-012-0523-8](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0523-8)
- Yamin F, Rahman A, Huq S., 2005. Vulnerability, Adaptation and Climate Disasters: A Conceptual overview. *Institute of Development Studies Bulletin* 4: 1-14. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2005.tb00231.x>
- Zhu A-X, Wang R, Qiao J, Qin C-Z, Chen Y, Liu J, Du F, Lin Y, Zhu T., 2014. An expert knowledge- based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Journal of Geomorphology* 214: 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.003>

