

پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه بالخلو)

موسوی عابدینی: دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران*
ابراهیم بهشتی جاوید: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
محمدحسین فتحی: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

وصول: ۱۳۹۲/۷/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۲، صص ۶۰-۴۳

چکیده

هدف این پژوهش تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش برای حوضه آبخیز بالخلو در استان اردبیل و ارائه مدل مناسب برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. برای انجام این کار از مدل‌های آماری دومتغیره و عملگر گامای فازی استفاده شده است. جهت اجرای مدل از دو دسته اطلاعات (۱) لایه زمین لغزش‌های رخ داده و (۲) پارامترهای مستعد کننده زمین لغزش (سنگ-شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، شیب زمین، جهت دامنه‌ها، کاربری زمین، فاصله از جاده، تراکم پوشش گیاهی (NDVI) و ارتفاع) استفاده شده است. در روش‌های آماری دومتغیره از دو مدل ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح استفاده شد. همچنین از بین مقادیر مختلف گاما در نهایت با ارزیابی‌های انجام شده گامای ۰/۸ انتخاب شده و نقشه حساسیت زمین لغزش منطقه تهیه شد. نقشه‌های بدست آمده از سه مدل با شاخص زمین لغزش مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت مشخص شد که مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و منطق فازی به ترتیب بیشترین قابلیت را برای پهنه‌بندی زمین لغزش در منطقه دارند. همچنین نقشه‌های به دست آمده نشان داد که نواحی غربی و جنوب غربی حوضه به دلیل وجود سازندهای رسوبی، پادگانه‌های قدیمی و انواع ترکیباتی از رس، مازن، آهک و لاهار، کاربری کشاورزی و جهت شیب شمالی و شمال غربی، بیشترین حساسیت را برای وقوع لغزش دارا هستند.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، مدل آماری دومتغیره، منطق فازی، حوضه آبخیز بالخلو

۱- مقدمه

می‌پیوندد (شریعت جعفری، ۱۳۷۵: ۷). حساسیت وقوع زمین لغزش (LS) (landslide Susceptibility) در واقع احتمال رخداد زمین لغزش در یک ناحیه بر اساس وضعیت محلی زمین است (Brabb, 1984: 308). زمین لغزش پدیده‌ای است که به عوامل مختلفی چون شیب، زمین شناسی،

۱-۱ مساله پژوهش

زمین لغزش (landslide) شامل کلیه حرکات و گسیختگی‌های دامنه‌ای نسبتاً سریع، که در اثر کاهش ضریب اطمینان، تحت تأثیر غلبه نیروهای مخرب، محرک بر نیروهای مقاوم در سطوح شیب‌دار بوقوع

اکتشافی^۴ (۳) تحلیل‌های آماری (۴) نگرش‌های قطعی یا جبری^۵ (Carrara et al., 1995; Soeters and Van Westen, 1996; Guzzetti et al., 1999; Ermini et al., 2005). انتخاب مناسب‌ترین نگرش و مدل بر اساس نوع داده‌ها، مقیاس منطقه مورد مطالعه و مقیاس تحلیل‌ها صورت می‌گیرد. تحقیقاتی که بر اساس نگرش زمین‌لغزش‌های ثبت شده و مدل‌های اکتشافی انجام می‌شود بر مبنای ارزیابی‌های ذهنی متخصص صورت گرفته و عموماً برای مطالعات ابتدایی در مورد یک منطقه وسیع است. روش‌های آماری مناسب برای مطالعات در سطح منطقه هستند و ارتباط بین زمین‌لغزش و فاکتورهای مورد استفاده را با روشی دقیق‌تر و علمی‌تر مورد ارزیابی قرار می‌دهند. نگرش‌های قطعی یا جبری بر مبنای الگوهای ریاضی انجام گرفته و تنها در مقیاس‌های محلی کاربرد دارند چون نیازمند اطلاعات جزئی‌تری از منطقه مورد مطالعه هستند (Piacentini et al., 2012:196).

۱-۲ اهداف و ضرورت تحقیق

حوضه آبخیز رودخانه مهم بالخو با مساحت ۱۰۹۳ کیلومتر مربع یکی از مهمترین حوضه‌های آبخیز شهر اردبیل می‌باشد. بدلیل وجود سد یامچی در این حوضه و عبور رودخانه از وسط شهر اردبیل، بررسی حساسیت وقوع زمین‌لغزش و تعیین مناطق بحرانی جهت اعمال روشهای آبخیزداری مناسب و روشهای محافظت شیب‌های مستعد زمین‌لغزش در این حوضه امری بسیار مهم و ضروری می‌باشد. لذا این تحقیق

بارندگی، پوشش گیاهی، زلزله و ... بستگی دارد (Xillinliu et al, 1990; 18). در دهه‌های اخیر تعداد انواع مخاطرات به خاطر فعالیت‌های گسترده انسان و دست‌اندازی‌های آن در محیط طبیعی بسیار افزایش یافته است. در مقایسه با انواع مخاطرات طبیعی همچون آتشفشان و سیل، زمین‌لغزش آسیب‌های قابل توجهی را به جهت مالی و جانی منجر شده است (Guzzetti, 2005:408). بر اساس برآوردهای اولیه در ایران سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش وارد می‌شود (حسین زاده و دیگران، ۱۳۸۸: ۲۷). طبق بررسی‌های وزارت جهاد سازندگی تا سال ۱۳۸۵ حدود ۱۵ هزار زمین‌لغزش در ایران رخ داده است (کمک-پناه، ۱۳۸۳: ۵). امروزه به واسطه توسعه سریع قدرت پردازش کامپیوترها و تکنولوژی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تعداد وسیعی از روش کمی و آماری در ارزیابی حساسیت رخداد زمین‌لغزش گسترش یافته است (Wang, 2013:81). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌هایی مثل رگرسیون لجستیک، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱، فرآیندها تحلیل شبکه (ANP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۲، انواع مدل‌های دو متغیره آماری، مدل LNRF و مدل منطق فازی و غیره اشاره کرد. به طور کلی مدل‌های ارزیابی حساسیت رخداد زمین‌لغزش را می‌توان در چهار طبقه تقسیم بندی کرد: (۱) ارزیابی بر اساس زمین-لغزش‌های موجود^۳ (۲) ارزیابی بر اساس مدل‌های

1 - Analytical Hierarchical Process

2 - artificial neural network

3 -landslides inventories

4 - heuristic methods

5 - deterministic methods

البرز را با استفاده از مدل‌های دومتغیره آماری و AHP انجام دادند، نتایج کار نشان داد که روش شاخص آماری تصویر واقعی‌تری از پراکنندگی حساسیت زمین لغزش نسبت به روش وزن‌دهی به عامل‌ها دارد.

امیراحمدی و همکاران (۱۳۸۹) پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی برای حوضه آبخیز چلاو آمل انجام دادند. آنها با در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، عناصرخطی، شیب، بارش، کاربری اراضی و ارتفاع به این نتیجه رسیدند که وضعیت زمین‌شناسی بالاترین اثر را در وقوع زمین لغزش‌های منطقه داشته است. عابدینی (۱۳۹۱) اقدام به پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه گیوی‌چای با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی AHP نموده و در نهایت بعد از تلفیق وزنی ۹ عامل موثر کل حوضه را به چهار قسمت با خطر وقوع بسیار بالا، بالا، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی نمود که در آن عامل شیب و لیتولوژی به ترتیب بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش داشته‌اند. محققین خارجی نیز نظیر یاکلین^۱ (۲۰۰۸) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بر مبنای GIS به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با توجه به ویژگی سازندهای زمین‌شناسی در ترکیه پرداخته و به این نتیجه رسیده است که در منطقه مورد مطالعه (Ardesen) ۹۸٪ از لغزش‌های رخ داده در واحدهایی با سازندهای زمین‌شناسی حساس به هوازدگی، زمین بدون پوشش و شیب بالا رخ داده

در صدد آن است با روش‌های مناسب اقدام به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در این حوضه مهم استان بنماید و مناطق مستعد برای این پدیده را شناسایی نماید.

۳-۱ پیشینه مطالعات

از جمله کارهای انجام شده در داخل و خارج کشور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: حسین‌زاده و دیگران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک محدوده مسیر سندیج-دهگلان را بر اساس پتانسیل وقوع زمین لغزش پهنه‌بندی کرده و در ۵ کلاس نهایی طبقه‌بندی کردند. نتایج بدست آمده از پژوهش نشان داد که مدل، قابلیت مناسبی در ارزیابی پتانسیل زمین لغزش را دارد. عبادی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۶) حوضه آبخیز شیروود را با استفاده از مدل منطق فازی و انواع عملگر گامای آن به جهت پهنه‌بندی پتانسیل زمین لغزش مورد ارزیابی قرار دادند، نتایج پژوهش نشان داد که عملگر گامای ۰/۸ بهترین نتیجه را در پهنه بندی زمین لغزش در منطقه دارد. فیض‌نیا و همکاران (۱۳۸۳) با استفاده از چهار مدل پهنه‌بندی زمین لغزش را برای حوضه آبخیز شیرین‌رود انجام دادند که نتایج پژوهش نشان داد مدل ارزش اطلاعاتی نسبت به سه مدل AHP، تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی نتایج بهتری را ارائه داده است. نیازی و همکاران (۱۳۸۹) حوضه سد ایلام را با استفاده از مدل آماری دومتغیره پهنه‌بندی کردند نتایج کار نشان داد که روش تراکم سطح، وزن متغیرها و ارزش اطلاعاتی به ترتیب بیش‌ترین دقت را در تفکیک کلاس‌های خطر زمین لغزش داشته‌اند. قرهی و همکاران (۱۳۹۰) پهنه‌بندی زمین لغزش مخزن سد

نواحی مستعد وقوع حرکت‌های توده‌ای یکی از اقدامات اولیه در مدیریت اولیه منابع طبیعی و کاهش آسیب‌های ناشی از این پدیده محسوب می‌شود (بهشتی‌راد و همکاران، ۱۳۹۱: ۶۳). عابدینی (۱۳۹۳) اقدام به بررسی کمی در علل وقوع زمین‌لغزش‌های ارتفاعات غربی قره‌داغ (جنوب‌هادی شهر آذربایجان- شرقی) با مورفومتری ابعاد مختلف آنها و تعیین روابط همبستگی بین متغیرهای مختلف را از ریاضی و تجزیه و تحلیل نموده است.

۱-۴ منطقه مورد مطالعه

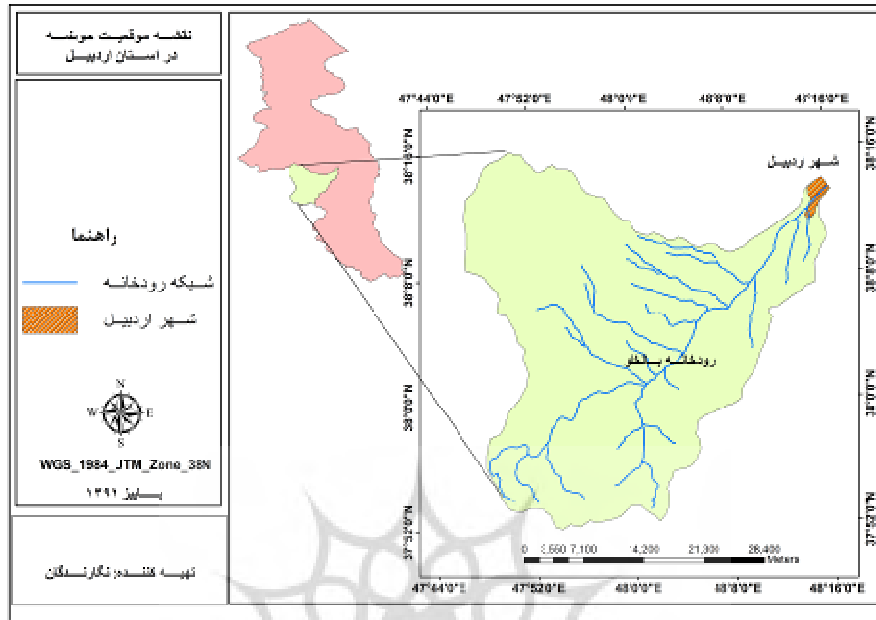
در این پژوهش حوضه رودخانه بالخلوچای برای پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. حوضه مورد مطالعه با مساحت ۱۰۹۳ کیلومتر مربع بخش‌هایی از شهرستان نیر و اردبیل را در بر می‌گیرد. رودخانه بالخلوچای شاخه اصلی این حوضه در جهت غرب به شرق جریان داشته و پس از عبور از شهر اردبیل به رودخانه قره‌سو می‌پیوندد (شکل ۱).

بخش وسیعی از این حوضه را ارتفاعات سبلان در شمال و ارتفاعات بزغوش در جنوب و جنوب‌غرب در بر می‌گیرند. در منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود سازندهای سست مثل مارن و رس، تراس‌ها و مخروط افکنه‌های قدیمی و جدید و هوازدگی شدید سنگ‌های آتشفشانی بویژه در نیمه جنوبی باعث شده که پدیده زمین‌لغزش در منطقه زیاد باشد. از جمله زمین‌لغزش‌های مهم و جدید منطقه زمین‌لغزشی است که در مسیر جاده اردبیل- تبریز در خرداد سال ۱۳۸۴ در ابعاد ۱۰۰*۴۰۰ متر و ارتفاع پرتگاه ۲۰ متر رخ داد (شکل ۱) که یک نفر کشته و تلفات مالی زیادی را

است. سابویا^۱ و همکاران (۲۰۰۶) برای ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها در ریودوژانیروی برزیل از مدل منطق فازی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که چون در این مدل کارشناس می‌تواند بین صفر تا یک طبقات عوامل مختلف را وزن دهی کند بنابراین نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. نادری و همکاران (۲۰۱۰) کارایی چهار روش ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح، AHP و روش گوپتا و جوشی را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز زنگوان استان ایلام انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که روش ارزش اطلاعاتی کارایی بهتری نسبت به سایر روشها دارد. از جمله کارهای دیگری که با استفاده از مدل منطق فازی انجام شده می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط تنگستانی (۲۰۰۳)، شرن تانر (۲۰۰۵) و گورسوسکی (۲۰۰۶) اشاره کرد. بررسی پدیده زمین‌لغزش جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از یک سو به منظور شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش در محدوده فعالیت‌های بشری حائز اهمیت بوده و از سویی دیگر جهت شناسایی مکان‌های امن برای توسعه زیستگاه‌ها و سکونتگاه‌های جدید و سایر کاربری‌های آتی انسان نظیر جاده، مسیرهای انتقال نیرو، نیروگاه و غیره در مقیاس‌های مختلف مورد توجه برنامه‌ریزان قرار دارد، (سفیدگری و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۷۴-۵۸۰). تفکیک مناطق از لحاظ پایداری و ناپایداری به لحاظ مخاطرات طبیعی و استعداد اراضی به زمین‌لغزش در اجرای پروژه‌های عمرانی بویژه برای ساخت و ساز- های شهری مهم است (عابدینی، ۱۳۹۰، ۶۹). شناسایی

^۱ - Sabuya

به بار آورد و منجر به تخریب جاده در منطقه مربوطه شد (هاشمی طباطبایی، ۱۳۸۴).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان اردبیل شکل ۲- منبع گزارش مقدماتی زمین لغزش مسیر مواصلاتی اردبیل- تبریز- سال ۱۳۸۴

ادامه به تشریح هر کدام از مدل‌ها و آماده‌سازی داده-ها پرداخته شده است.

۱-۶ داده‌ها

داده‌های فضایی مورد استفاده در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: (۱)

۱-۵ داده‌ها و روش پژوهش

در این پژوهش با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی حساسیت رخداد زمین لغزش مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای اجرای مدل از ۱۰ پارامتر طبیعی و انسانی استفاده شده است که در

آن رخ داده بود به صورت یک لایه سطحی برای استفاده در مدل استخراج شد. در این پژوهش از ۱۰ پارامتر برای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش استفاده شده است که می‌توان در چهار گروه (۱) زمین شناسی (۲) توپوگرافی (۳) هیدرولوژی (۴) پوشش زمین و کاربری دسته‌بندی کرد. در شکل ۳ نمودار خوشه‌ای این معیارها نشان داده شده است.

زمین لغزش‌های رخ داده و (۲) پارامترهای مستعد کننده زمین لغزش برای بدست آوردن نقشه زمین لغزش‌های اتفاق افتاده از داده‌های سازمان منابع طبیعی استفاده شده است اما از آنجایی که این داده‌ها به صورت نقطه‌ای هستند با روی هم‌گذاری لایه فوق با تصاویر ماهواره لندست و Google Earth پهنه‌هایی که زمین لغزش در



شکل ۳ - نمودار خوشه‌ای لایه‌های مورد استفاده در مدل (نگارنده‌گان)

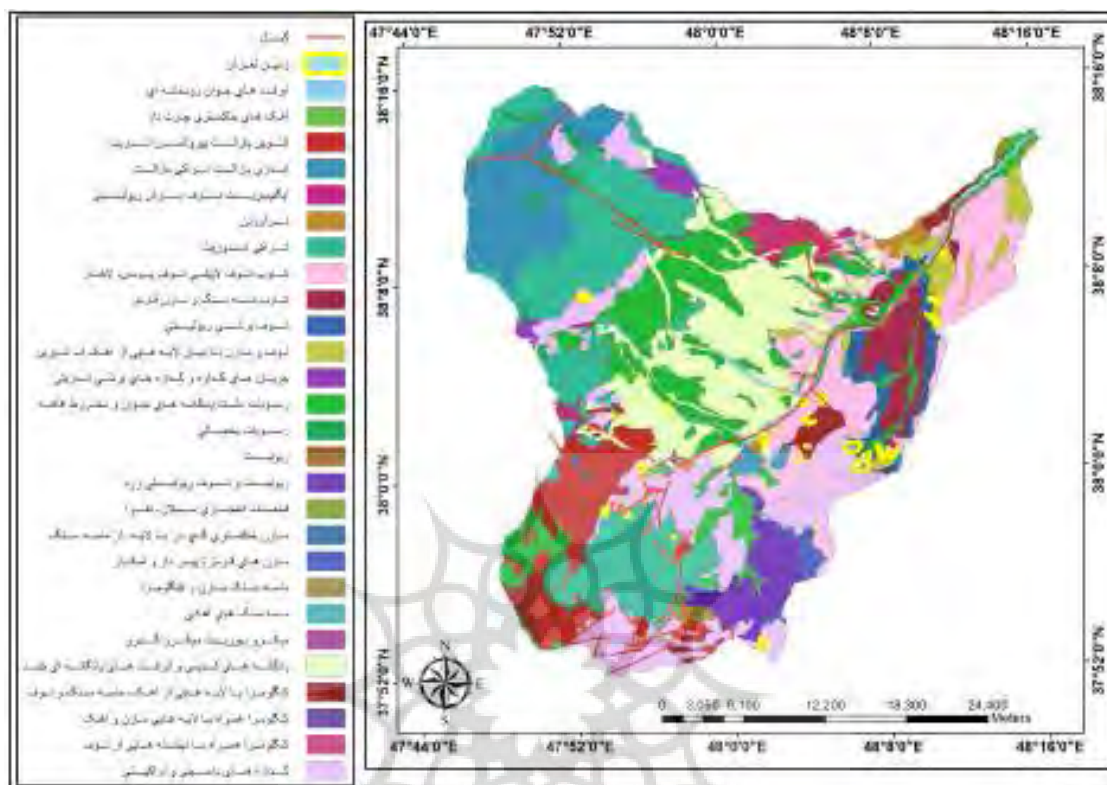
پارامترهای موثر در وقوع زمین لغزش

۱- زمین شناسی

نواحی شمالی، غربی و جنوب غربی حوضه را انواع سنگ‌های آذرین تشکیل داده‌اند. اما بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه بیشتر از مواد رسوبی رودخانه‌ای و سنگ‌های رسوبی مثل ماسه سنگ، کنگلومرا، مارن، آهک و رس است. لایه گسل نیز از دیگر پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش است که از نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج شده است. لایه گسل به صورت فاصله از گسل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. گسل‌ها با تخریب و خوردن سنگ‌ها در محل و نیز حرکت‌شان باعث تشدید زمین لغزش در یک منطقه می‌شوند که با افزایش فاصله از آن تاثیرش کمتر می‌شود. شکل ۴ نقشه سنگ‌شناسی

از جمله مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در وقوع زمین لغزش، عامل سنگ‌شناسی است. واحدهای مختلف سنگ‌شناسی دارای درجه حساسیت متفاوتی در ایجاد زمین لغزش هستند (Nefeslioglu et al., 2008:176). وجود سازندهای عمدتاً سست و حساس نظیر مارن، رس و مواد هوازده عمیق، درصد وقوع زمین لغزش را در یک منطقه خاص افزایش می‌دهد. لایه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردبیل، سراب، مشگین‌شهر و گیوی تهیه شده است. بیشتر

منطقه را به همراه زمین‌لغزش‌های رخ داده و گسل‌ها، نشان می‌دهد.



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی به همراه زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه (منبع: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردبیل، گیوی، مشگین‌شهر و سراب)

۲- توپوگرافی

سازندهای سخت در نواحی مرتفع پدیده زمین لغزش را کنترل می‌کند ارتفاع منطقه مورد مطالعه بین ۱۳۵۰ تا ۴۷۶۰ متر در نوسان است. در رابطه با شیب باید گفت معمولاً دامنه‌هایی با شیب بیشتر در شرایط یکسان آمادگی بیشتری برای لغزش دارند. چرا که بالا رفتن شیب باعث افزایش حجم و وزن نسبی توده لغزشی بر واحد سطح صفحه لغزش می‌شود (قرهی، ۱۳۹۰: ۹۴). البته باید توجه داشت که افزایش شیب تا مقدار خاصی باعث افزایش زمین

توپوگرافی از موارد مهمی است که در ایجاد و تشدید زمین‌لغزش تاثیرگذار است. در رابطه با توپوگرافی زمین از سه لایه ارتفاع، جهت و میزان شیب استفاده شده است که با استفاده از لایه DEM منطقه با پیکسل سایز ۲۸ متری در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شده است. ارتفاع زمین با کنترل نوع فرسایش، تمرکز فعالیت‌های انسانی در ارتفاعات پایین و میانی، تمرکز رسوبات در بخش‌های پایینی و

پوشش زمین و کاربری

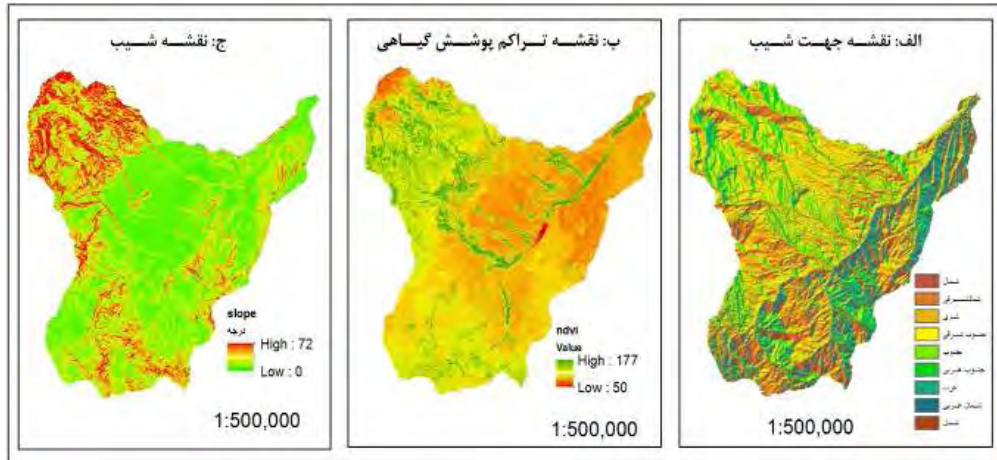
پوشش و کاربری زمین با تنظیم نفوذپذیری سطوح، جریان آب، تحریک دامنه‌ها و مواردی از این قبیل باعث تشدید و یا کاهش زمین‌لغزش در منطقه‌ای خاص می‌شوند. فعالیت‌های عمرانی که در حریم جاده‌ها صورت می‌گیرد با تحریک دامنه‌ها و خالی کردن بخش پایینی دامنه باعث تشدید عمل زمین-لغزش در محل می‌شود. این لایه به صورت فاصله از جاده مورد استفاده قرار گرفته است که هر چه فاصله بیشتر می‌شود از حساسیت لغزش کم می‌شود.

کاربری زمین و تراکم پوشش گیاهی (شاخص NDVI) از دیگر لایه‌های مورد استفاده در این بخش می‌باشند. شاخص NDVI با استفاده از باندهای ۳ و ۴ تصاویر ماهواره‌ای لندست به دست آمد. لایه کاربری زمین نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و روش طبقه‌بندی نظارت شده (Supervised Classification method) در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد (اشکال شماره ۵، ۶، و ۷ نقشه لایه‌های مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد).

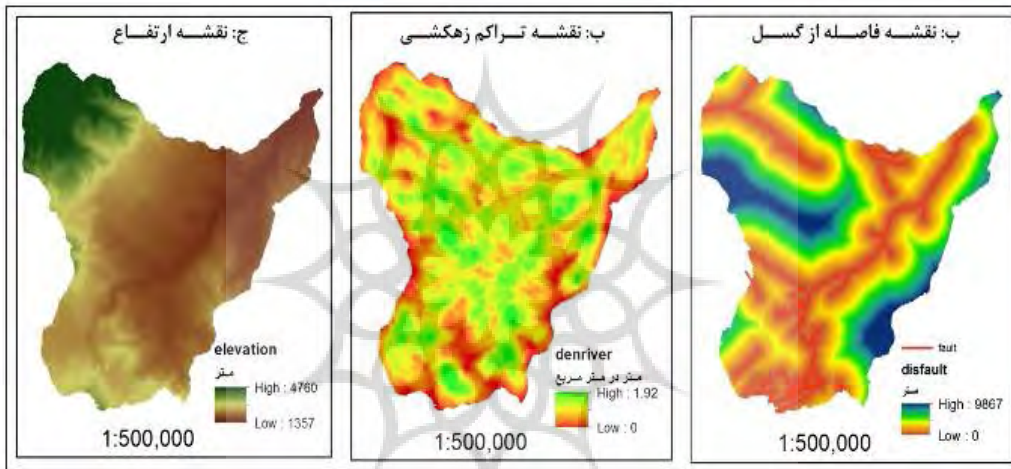
لغزش شده و بعد از آن به دلیل کاهش حجم مواد در شیب‌های تندتر و نیز تغییر نوع حرکات از درصد زمین لغزش‌ها کم می‌شود. شیب منطقه مورد مطالعه بین ۰ تا ۷۲ درجه است. بیشتر منطقه را شیب‌های ۰ تا ۵ درجه (۴۵٪ منطقه) تشکیل می‌دهند. جهت شیب از دیگر پارامترهای تاثیر گذار در زمین‌لغزش است چرا که با کنترل مواردی همچون میزان بارش، رطوبت، تراکم پوشش گیاهی و تابش آفتاب بر رخداد زمین‌لغزش اثر می‌گذارد (Suzen and Doyuran 2004; Komac, 2006).

۳- هیدرولوژی

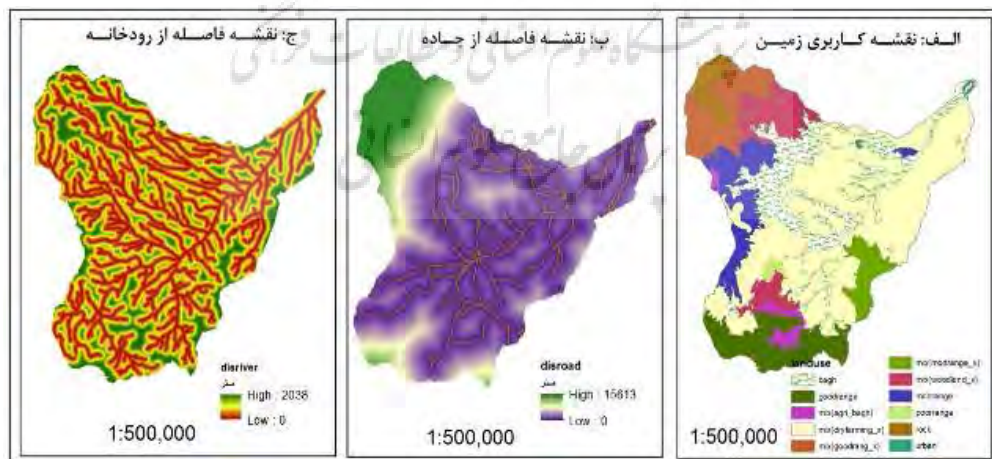
در بخش هیدرولوژی از دو لایه تراکم شبکه زهکشی و فاصله از رودخانه‌های اصلی استفاده شده است. تراکم زهکشی در واقع نسبت طول آبراهه به مساحت حوضه است که با افزایش تراکم در یک منطقه نفوذپذیری کاهش یافته و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد. آبراهه‌ها نیز به صورت قابل توجهی پایداری دامنه را از طریق فرسایش و اشباع بخش‌های پایینی دامنه تحت تاثیر قرار می‌دهند (Dai et al., 2001). با توجه به این امر با افزایش فاصله از آبراهه، پتانسیل زمین لغزش کاهش می‌یابد.



شکل ۵- نقشه لایه‌ها الف) جهت شیب. ب) تراکم پوشش گیاهی. ج) شیب



شکل ۶- نقشه لایه‌ها الف) فاصله از گسل. ب) تراکم زهکشی. ج) ارتفاع



شکل ۷- نقشه لایه‌ها الف) کاربری زمین (منبع نگارندگان: استخراج از تصویر ماهواره‌ای). ب) فاصله از جاده. ج) فاصله از رودخانه

فاصله از رودخانه

۲ روش‌شناسی

مدل‌های آماری دومتغیره مبتنی بر هم‌پوشانی پارامترها و تراکم زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده هستند. در این مدل‌ها اهمیت کلاس‌های هر پارامتر با استفاده از محاسبه تراکم زمین‌لغزش در آن با استفاده از فرمول‌های مربوطه صورت می‌گیرد. با به دست آوردن وزن کلاس‌های هر پارامتر و اعمال آن بر روی لایه مربوط و روی هم‌گذاری لایه، نقشه پهنه‌بندی حساسیت لغزش بدست خواهد آمد. در این روش زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و پارامترها به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های آماری متعددی برای محاسبه ارزش‌های وزنی وجود دارد که در اینجا از دو روش آماری ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح استفاده شده است.

۱-۲ روش ارزش اطلاعاتی

روی هم رفته ترکیبی از متغیرهای کمی (مثل شیب) و متغیرهای کیفی (مثل کاربری) در آنالیزهای آماری اشکال دارد. این مشکل می‌تواند به وسیله تلقی کردن هر کلاس متغیر جداگانه که می‌تواند تنها، یکی از دو حالت حاضر (۱) یا غایب (۰) را داشته باشد، حل شود. این روش می‌تواند تعیین کند که آیا کلاس متغیر حاضر است یا غایب (نیازی یعقوب و دیگران ۱۳۸۹: ۱۲). روش فوق با استفاده از فرمول ۱ اجرا می‌شود (نادری و کریمی ۱۳۹۰: ۹۸).

رابطه شماره (۱) $I_i = LN \left(\frac{S_i}{\frac{N_i}{S}} \right)$ S_i مساحت

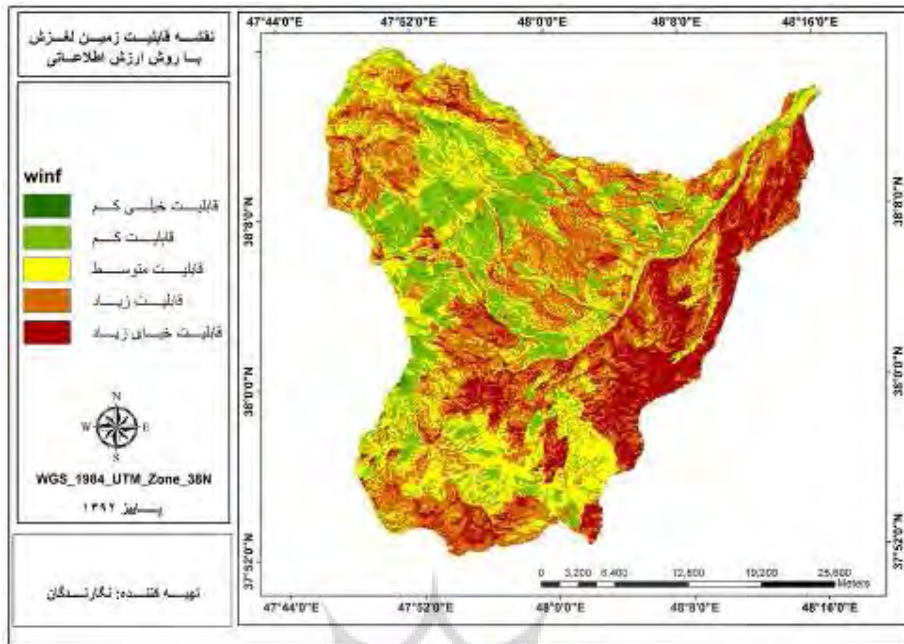
زمین لغزش اتفاق افتاده در کلاس متغیره مربوطه، N_i مساحت کلاس متغیر، S مساحت کل زمین-لغزش‌های منطقه، N مساحت کل منطقه مورد مطالعه. LN لگاریتم بر پایه عدد نپر. پس از به دست آوردن وزن کلاس‌های هر متغیر، در محیط نرم افزار Arc Map وزن‌های بدست آمده اعمال و لایه‌ها روی هم‌گذاری شده و نقشه پهنه‌بندی در پنج کلاس بدست آمد (شکل ۸).

۲-۲ روش تراکم سطح

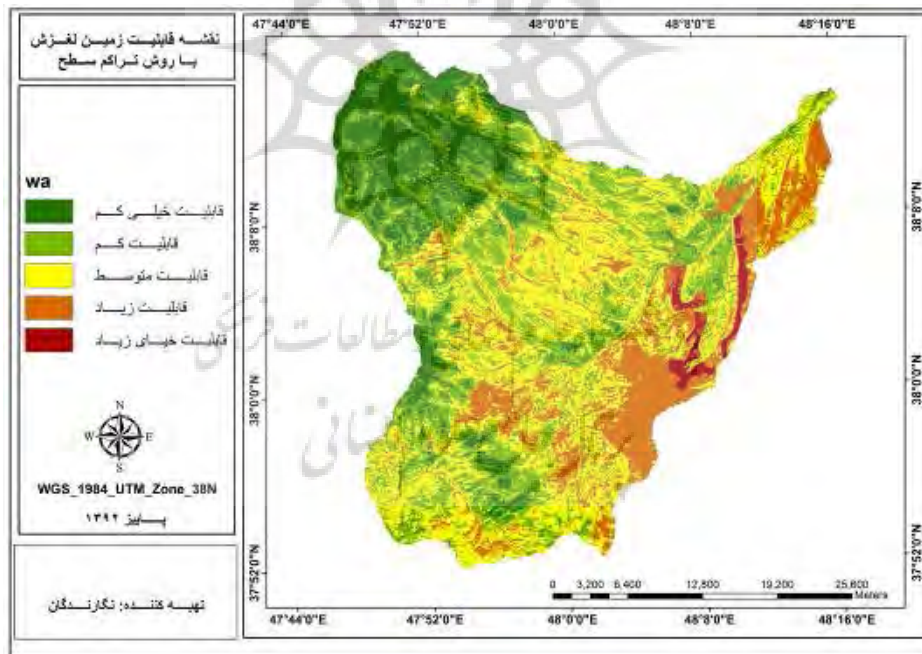
در روش تراکم سطح وزن هر کلاس متغیر با استفاده از فرمول (۲) محاسبه می‌شود که در آن A مساحت زمین‌لغزش اتفاق افتاده در هر کلاس متغیر، B مساحت هر کلاس، C مساحت کل زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه، D مساحت کل منطقه مورد مطالعه (افجه نصرآبادی و دیگران، ۱۳۸۷).

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

با به دست آوردن وزن کلاس‌های هر متغیر وزن کلاس‌ها در محیط نرم‌افزار اعمال شده و نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش در پنج کلاس تهیه شد (شکل شماره ۹).



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل ارزش اطلاعاتی



شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تراکم سطح

۳-۲ مدل منطق فازی (عملگر گاما)

برای اولین بار پرفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی را در رساله‌ای به نام (مجموعه‌های فازی - اطلاعات و کنترل) معرفی نمود.

در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر یا عضو مجموعه است یا نیست (صفر و یک). تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را گسترش داده و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی، و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. به بیان دیگر یک مجموعه فازی، مجموع‌ای از آلمان‌ها^۱ با ویژگی‌های مشابه است که در آن، مجموعه درجه‌ای مشخص از صفر تا یک دارد. صفر به معنی عدم عضویت و یک به معنی عضویت کامل است (Duman et al. 2006). در هر مجموعه از منطق فازی مانند A وابستگی یک عضو (X) از مجموعه مرجع به آن، از طریق تابع عضویت آن بصورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (مهدویفر و فاطمی عقدا، ۱۳۷۶).

رابطه (۳) $A = \{\mu_A(X)\}$ در رابطه فوق X عضوی از مجموعه مرجع و $\mu_A(X)$ درجه وابستگی به مجموعه فازی A می‌باشد.

۲-۴ آماده‌سازی داده

برای اینکه بتوانیم لایه‌ها را در مدل فازی مورد استفاده قرار دهیم لازم است ابتدا تک‌تک لایه‌ها با

توجه به هدف مورد نظر بر اساس تابع عضویت، فازی‌سازی شوند. با داشتن توابع فازی می‌توان با استفاده از برخی از توابع موجود در نسخه ۱۰ نرم افزار ARC GIS و یا به صورت فرمول‌نویسی در تحلیل‌گر Raster Calculator لایه‌ها را به صورت لایه‌های استاندارد شده در بازه ارزشی صفر تا ۱ درآورد. لایه‌های وکتوری پلی‌گونی نیز بدون نیاز به تابع با دادن کدهای بین ۰ تا ۱ و تبدیل به لایه رستری به حالت فازی تبدیل می‌شوند. هر کدام از این لایه‌ها به تنهایی با توجه به ضابطه و نوع تابعی که برای آن در نظر گرفته شده است محدودیت و امکان ایجاد زمین‌لغزش را تعیین می‌کنند. در این پژوهش از عملگر گامای فازی استفاده شده است که نقش تعدیلی نسبت به نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیکتر می‌کند. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه (۱) تعریف می‌شود.

رابطه (۱)

$$\mu_{combination} =$$

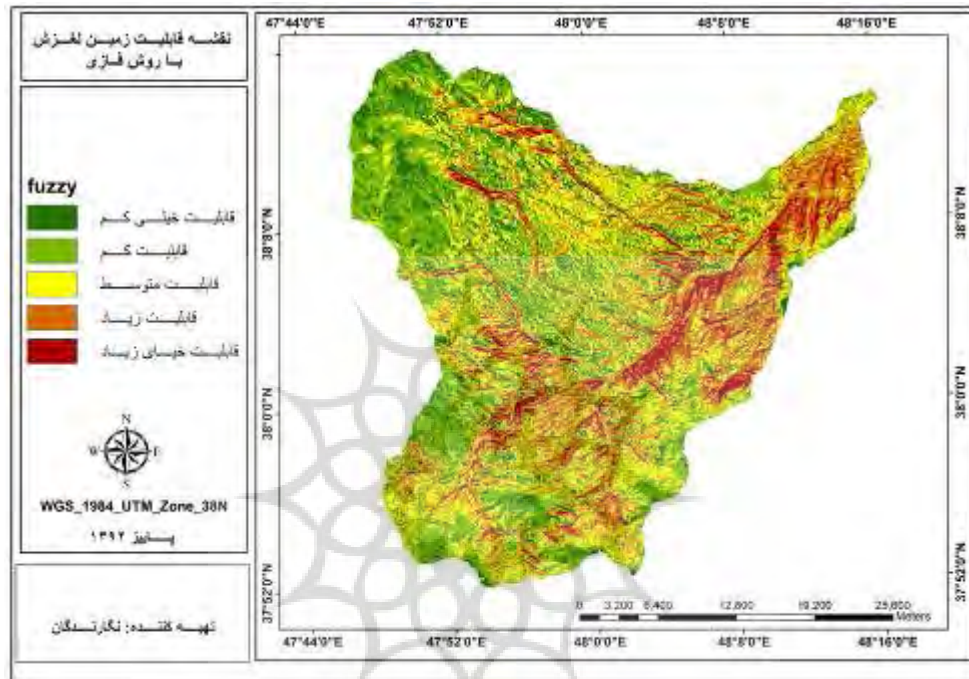
$$((Fuzzy Algebraic sum)(Fuzzy Algebraic product))^{1-\gamma}$$

که در آن $\mu_{combination}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ را برابر ۱ قرار دهیم ترکیبی که اعمال می‌شود همان جمع جبری فازی و زمانی که γ

^۱ -Elements

بالا بردن دقت کار بسیار مفید است. با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج آنها و نیز اجرا و مقایسه مقادیر مختلف گاما، در نهایت از گامای ۰/۸ استفاده شد. نهایتاً با اجرای مدل، نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در پنج کلاس تهیه شد (شکل ۱۰).

برابر صفر باشد ترکیب، برابر با ضرب جبری فازی است. مقدار در نظر گرفته شده برای ۷ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهش ضرب جبری فازی سازگاری دارد. پس باید در نظر داشت که انتخاب صحیح مقدار گاما در



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از عملگر گامای ۰/۸

۳- ارزیابی و مقایسه مدل‌ها

$$Li = \frac{\left(\frac{Si}{Ai}\right)}{\left(\sum_n \left(\frac{Si}{Ai}\right)\right)} * 100$$

برای مقایسه سه مدل مورد استفاده از شاخص زمین لغزش استفاده شد (رابطه ۵) به این صورت که با استفاده از نقشه زمین لغزش‌های صورت گرفته، نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در هر سه مدل قطع داده شد و با استفاده از رابطه فوق تمامی رده‌های خطر مورد ارزیابی قرار گرفت.

رابطه (۵)

اجرای شاخص برای هر سه مدل در جدول شماره (۱) آمده است.

جدول (۱): مقادیر محاسبه شده شاخص زمین لغزش برای مدل‌ها

Li	$\sum(Si/Ai)$	Si/Ai	Ai متر مربع	تعداد Si پیکسل	رده‌های خطر	روشنه بندی
۰	۰/۰۲۳۰۲	۰	۴۴۰۳۷۰۰	۰	خیلی کم	روش ارزش اطلاعاتی
۰/۱۱	۰/۰۲۳۰۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۲۰۴۸۳۰۱۰۰	۵۴۰۰	کم	
۱/۶۹	۰/۰۲۳۰۲	۰/۰۰۰۰۳۹	۳۱۵۹۱۶۲۰۰	۱۲۳۳۰۰	متوسط	
۱۰/۵۷	۰/۰۲۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴	۳۶۷۹۱۰۱۰۰	۸۹۵۵۰۰	زیاد	
۸۷/۶۳	۰/۰۲۳۰۲	۰/۰۲۰۲	۱۸۹۱۷۶۴۰۰	۳۸۱۶۹۰۰	خیلی زیاد	
۰	۰/۰۸۵	۰	۱۹۴۰۴۱۸۰۰	۰	خیلی کم	روش تراکم سطح
۰/۳۴	۰/۰۸۵	۰/۰۰۰۳	۳۷۷۹۶۹۴۰۰	۱۰۹۸۰۰	کم	
۲/۴	۰/۰۸۵	۰/۰۰۰۲	۲۷۰۷۴۱۶۰۰	۵۵۳۵۰۰	متوسط	
۹/۵۷	۰/۰۸۵	۰/۰۰۰۸	۲۰۶۹۰۸۲۰۰	۱۶۸۳۹۰۰	زیاد	
۸۷/۷	۰/۰۸۵	۰/۰۷۴	۳۳۳۸۹۱۰۰	۲۴۸۹۴۰۰	خیلی زیاد	
۲/۷	۰/۰۳۳۴	۰/۰۰۰۹	۱۷۱۳۵۴۶۰۰	۱۵۴۸۰۰	خیلی کم	روش منطق فازی گامای ۰/۸
۳/۰۸۴	۰/۰۳۳۴	۰/۰۰۱۰۳	۲۶۷۵۰۱۶۰۰	۲۷۶۳۰۰	کم	
۹/۷۹۲۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۰۰۳۳	۳۵۶۸۴۸۲۰۰	۱۱۸۶۲۰۰	متوسط	
۲۴/۶۲	۰/۰۳۳۴	۰/۰۰۰۸۲۴	۲۱۶۵۶۶۱۰۰	۱۷۸۵۶۰۰	زیاد	
۵۹/۶۷	۰/۰۳۳۴	۰/۰۲	۷۱۹۷۸۴۰۰	۱۴۳۸۲۰۰	خیلی زیاد	

۴- بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌های به کار رفته در پژوهش با توجه به ارزیابی صورت گرفته با شاخص زمین لغزش نتایج قابل قبولی را ارائه داده‌اند. همانطور که جدول شماره یک نشان می‌دهد مدل ارزش اطلاعاتی در کلاس‌های خطر بالا و خیلی بالا با مقادیر ۱۰ و ۸۷ درصد نسبت به دو مدل دیگر ارزیابی بهتری را داشته و مدل تراکم سطح با مقادیر ۹ و ۸۷ و مدل منطق فازی با مقادیر ۲۴ و ۶۰ در کلاس‌های خطر بالا و خیلی بالا به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. نتایج ارزیابی مدل نشان می‌دهد که در مدل ارزش اطلاعاتی حدود ۹۸ درصد زمین لغزش‌ها در کلاس‌هایی با خطر بالا و خیلی بالا رخ داده است. این مقدار برای مدل تراکم سطح و منطق فازی به ترتیب ۹۷ و ۸۴ درصد برآورد شده است. نتایج به دست آمده از هر سه مدل نشان‌گر پتانسیل بالای نواحی غربی و جنوب غربی حوضه برای رخ داد زمین لغزش است. این مناطق از لحاظ سنگ‌شناسی بیشتر از سنگ‌های رسوبی، پادگانه‌های قدیمی و انواع ترکیباتی از رس، مارن، آهک و لاهار تشکیل شده‌اند این امر نشانگر نقش بالای سنگ‌شناسی و جنس سازندها در ایجاد زمین لغزش می‌باشد. تراکم بالای زمین لغزش‌های رخ داده نیز گویای همین امر است و این مناطق را به عنوان پهنه‌های حساس و پرخطر از لحاظ ناپایداری دامنه‌ها مطرح می‌کند. این مناطق از نظر شیب زمین نیز درجه بالایی دارند و اغلب مناطق کوهستانی را شامل می‌شوند که بالای ۱۵ درجه شیب دارند. همچنین جهت دامنه‌ها نیز از جمله موارد تاثیرگذار در لغزش‌های منطقه هستند. چنانچه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و جهت شیب نشان می‌دهد اغلب لغزش‌های رخ داده در منطقه

در نیمه‌جنوبی حوضه قرار دارند که جهت غالب دامنه‌ها در این بخش از حوضه از نوع دامنه‌های با جهت شمالی و شمال غربی است. این دامنه‌ها به دلیل دریافت کمتر از تابش خورشید و نیز قرار گرفتن در برابر سامانه‌های بارش‌زای منطقه رطوبت بیشتری نسبت به سایر دامنه‌ها دریافت کرده و مساعد لغزش و حرکات توده‌ای هستند. با توجه به این امر به نظر میرسد که باید در برنامه‌ریزی‌های محیطی تمهیدات لازم برای مقابله با این امر و کاهش خسارت‌های جانی و مالی آن در مناطق حساس دیده شود.

در مقابل مناطق نیمه شمالی و به خصوص شمال غربی حوضه از نظر پتانسیل زمین لغزش حساسیت کمتری دارند و به عنوان مناطقی با حساسیت خیلی کم و کم پهنه‌بندی شده‌اند.

منابع

- افجه نصرآبادی، حامد، شتابی، شعبان، رافت‌نیا، نصرت‌اله، شریعت‌جعفری، محسن، (۱۳۸۷)، ارزیابی کارایی مدل‌های آماری ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مناطق جنگلی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد پانزدهم، شماره ششم ۱۳۸۷. صص ۲۱-۱۰.
- امیر احمدی، ابوالقاسم، کامرانی دلیر، حمید، صادقی، محسن، (۱۳۸۹)، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مطالعه موردی حوضه آبخیز چلاو آمل، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، شماره ۲۷، صص ۲۰۳-۱۸۱.
- بیدار، زینب (۱۳۹۱) پهنه بندی حرکات توده ای در مسیر جاده مشگین شهر- مویل با استفاده مندی از

عبادی‌نژاد، سید علی، یمانی، مجتبی، مقصودی، مهران، شادفر، صمد، (۱۳۸۶)، ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین لغزش، مجله علوم مهندسی آبخیزداری ایران، سال اول، شماره ۲، پاییز ۱۳۸۶.

فیض نیا، سادات، ع کلارستانی، حسن احمدی، م صفایی، (۱۳۸۳)، بررسی عوامل موثر در وقوع زمین لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شیرین رود - سد تجن)، مجله منابع طبیعی ایران، ۵۷ (۱): ۳ - ۲۰.

قرهی، حمیدرضا. بهمن بهلولی، امیر سیار، محسن شریعت جعفری، (۱۳۹۰) تهیه نقشه حساسیت پدیده زمین لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدل آماری دومتغیره در مخزن سد البرز. مجله علوم زمین، پاییز ۱۳۹۰ سال ۲۱ شماره ۸۱ صفحات ۹۳-۱۰۰

کمک‌پناه، علی. (۱۳۸۳)، بروشور اطلاعاتی در مورد زمین لغزش‌های کشور، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری کشور، دفتر مطالعات و ارزیابی آبخیزها، گروه مطالعه‌ی امور زمین لغزش‌ها

مهدویفر، محمدرضا. سید محمود. فاطمی عقدا، ۱۳۷۶. کاربرد تحلیل مجموعه‌های فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش و شرح سامانه کامپیوتری تهیه شده. مجموعه مقالات دومین سمینار زمین لغزه و کاهش خسارت‌های آن، انتشارات موسسه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جلد اول. نادری، فتح الله. حاجی کریمی (۱۳۹۰). ارزیابی کارایی دو روش ارزش اطلاعاتی و گوپتا و جوش در

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). پایان نامه کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا. دانشکده علوم انسانی محقق اردبیلی.

حسین زاده، محمدمهدی، ثروتی، مجمدرضا، منصور، عادل، میرباقری، بابک، خضری، سعید، (۱۳۸۸)، پهنه بندی ریسک وقوع حرکات توده ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، پاییز ۱۳۸۸، صفحات ۲۷-۳۷.

سفیدگری، ر (۱۳۸۴)، ارزیابی روش های پهنه بندی خطر زمین لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، مطالعه موردی حوضه آخیز دماوند. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، ص ۵۸۰-۵۷۴.

شریعت جعفری، محسن (۱۳۷۵). زمین لغزشها) مبانی و اصول پایداری شیبهای طبیعی). ناشر سازه. ص ۲۹-۴۸.

عابدینی، موسی (۱۳۹۱)، پهنه بندی خطر زمین لغزشهای حوضه گیوی چای بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، طرح پژوهشی گروه جغرافیای دانشگاه محقق اردبیلی

عابدینی، موسی (۱۳۹۳). پژوهشی کمی در علل وقوع زمین لغزش‌های ارتفاعات غربی قره داغ (جنوب‌هادیشهر آذربایجان شرقی). جغرافیا و چشم انداز، شماره ۱۹ تابستان.

عابدینی، موسی (۱۳۸۹). پژوهشی در مخاطرات محیطی (هیدروژئومورفولوژی شهر گرمی و اثرات آن بر ساخت و سازها. گزارش نهائی طرح انجام شده با دانشگاه محقق اردبیلی.

- Gorsevski, P.V., Jankowski, P. and Gessler, P.E.(2006). Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process, *Control and Cybernetics*, 35: 1-26
- Guzzetti, Fausto, (2005). Landslide hazard and risk assessment. Dissertation. Kanungo, D.P., Arora, M.K., Gupta, R.P., Sarkar, S., (2008). Landslide risk assessment using concepts of danger pixels and fuzzy set theory in Darjeeling Himalayas. *Landslides* 5, 407-416
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., (1999). Landslide hazard evaluation: An aid to a sustainable development. *Geomorphology* 31, 181-216.
- Komac, M., (2006). A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74(1-4), 17-28.
- Naderi, F. Naseri, B. Karimi, H. and Habibi Bibalani, Gh. (2010). Efficiency evaluation of different landslide susceptibility mapping methods (Case study: Zangvan watershed, Ilam province): First international conference of soil and roots engineering relationship (LANDCON1005), Ardebil Province, Iran. Archive 29-
- Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., (2008). An assessment on the use of logistic Regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the Preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology* 97(3-4), 171-191.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Schneiderbauer, C., (2012). Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Geomorphology* 151-152(2012)196-206.
- Sabuya, F, M. G. Alves and Pinto, W. D. 2006. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic, *Engineering Geology*, pp14.
- Schern thanner. H. (2005). Fuzzy logic approach for landslide susceptibility
- پهنه‌بندی خط زمین لغزش در حوضه آبخیز تلخاب ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۲، پاییز ۱۳۹۰
- نیازی، یعقوب. اختصاصی، محمدرضا، طالبی، صالح آرخی، علی، مختاری، محمدحسین، (۱۴۸۹)، ارزیابی کارایی مدل آماری دومتغیره در پیش بینی خطر زمین لغزش در حوضه سد ایلام، مجله علوم مهندسی آبخیزداری ایران، سال چهارم، شماره ۱۰، بهار ۱۳۸۹، صص ۲۰-۹.
- هاشمی طباطبایی، سعید. (۱۳۸۴)، گزارش مقدماتی زمین لغزش مسیر موصلاتی اردبیل-تبریز، بخش ژئوتکنیک، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- Brabb, E.E., (1984). Innovative approaches to landslide hazard mapping: Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, vol. 1, pp. 307-324.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., (1995). GIS technology in mapping Landslide hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 135-175.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J. & Xu, Z. W., (2001) Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology* 43 (3), 381-391.
- Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. and Sonmez, H. (2006). Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey, *Environmental Geology*, 51: 241-256.
- Ermini, L., Catani, F., Casagli, N., (2005). Artificial Neural Networks applied to landslide Susceptibility assessment. *Geomorphology* 66, 327-343.

- Conference, copyright GIS Development .net.
- Wang, L.j., Kazuhide,S., Shuji, M., (2013). Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based On FCM sampling strategy. *Computers & Geosciences* 57(2013)81–92.
- Xilinliuand et all, (1990) »influence of geologic factor on landslides in Zaatong China enr. *Geol .water sci»vole* 19, no .1, 17 – 20 pp
- Yalcin, A., (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and conformations” *CATENA*, Volume 72 Pages 1-12.
- mapping (Rio Blanco, Nicaragua). Msc Thesis, Institute of Geography, NAWI, Paris Lodron University Salzburg, PP. 94.
- Soeters, R., Van Westen, C.J., (1996). Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report, 247. National Academy Press,WA, pp.129–177.
- Suzen, M.L., Doyuran, V., (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng. Geol.* 71, 303–321.
- Tangestani, M.H. (2003). Landslide susceptibility mapping using fuzzy gamma operation in GIS, Kakan catchment area, Iran, *Proceedings of the Map India 2003*

