



دوره‌ی ۳۵، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۶، پاییز ۱۴۰۱، صفحه‌های ۲۷-۴۳

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmrj.2022.356296.1436

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

تعیین مناسب‌ترین ضریب گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در آبخیز قزل‌اوزن

جمال مصفايي

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

امین صالح‌پورجم

دانشیار پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: jamalmosaffaie@gmail.com

تاریخ دریافت: ۲۵ آبان ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۹ بهمن ۱۴۰۰

چکیده

زمین لغزش یکی از نوع‌های مخرب فرسایش در دامنه‌ها است که موجب زیان‌های مالی و جانی فراوانی می‌شود. شناسایی عامل‌های مؤثر در بروز زمین لغزش و تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت آن، یکی از ابزارهای پایه‌ی برای مدیریت کردن و کاستن از زیان‌های احتمالی است. هدف این پژوهش تعیین مناسب‌ترین ضریب گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در آبخیز قزل‌اوزن استان قزوین است. ابتدا نقشه‌ی رقومی عامل‌های مؤثر شامل سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، شتاب زمین لرزه، درجه‌ی شیب، جهت شیب، بلندی، کاربری زمین، فاصله از جاده، فاصله از آبراه، اندازه‌ی بارش، بیشینه‌ی بارش روزانه و نقشه‌ی رقومی پراکنش زمین لغزش‌ها تهیه شد. اندازه‌های نسبت فراوانی و عضویت فازی برای هر رده از نقشه‌های عامل‌های مؤثر محاسبه شد، و نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش با اندازه‌های گوناگون گامای فازی تهیه و رده‌بندی شد. به‌طور کلی در این حوزه ۱۷ زمین لغزش با مجموع مساحت ۲۱۳ هکتار ثبت شد که ۷۰٪ آن‌ها برای پهنه‌بندی (۱۱ زمین لغزش با مساحت ۱۵۳ هکتار) و ۳۰٪ مانده (۶ زمین لغزش با مساحت ۶۰ هکتار) برای ارزیابی دقت نقشه‌های خطر به‌کار برده شد. نتیجه‌ی ارزیابی نشان داد که بیش‌ترین اندازه‌ی شاخص مجموع پسندیدگی (۲/۳۷) در عمل‌گر فازی با گامای ۰/۹۶ است. بنابراین دقت این مدل از دیگر اندازه‌های گاما بیش‌تر است. نتیجه‌ی این پژوهش کاربرد مهمی در فرآیند آمایش کاربری‌های زمین و مدیریت منطقه‌های حساس به زمین لغزش خواهد داشت.

واژگان کلیدی: آبخیز قزل‌اوزن، حساسیت زمین لغزش، پهنه‌بندی خطر، نسبت فراوانی، منطق فازی

مقدمه

زمین‌لغزش همه‌ی جابه‌جایی‌ها و جداشدگی‌های خاک و مواد سنگی به پایین دامنه است که بر پایه‌ی تلفیقی از فرآیندهای گوناگون در منطقه‌های کوهستانی رخ می‌دهد (جویباری و همکاران ۲۰۱۷). این پدیده موجب زیان به سازه‌های مهندسی، منطقه‌های مسکونی، زمین‌های کشاورزی و در پی آن، ایجاد بار معلق و سیلاب‌های گل‌آلود و سرانجام پرشدن مخزن سدها می‌شود. افزون بر این، اثرهای اجتماعی و زیست‌محیطی این پدیده مانند مهاجرت و بیکاری را نباید نادیده گرفت (صالح پورجم و همکاران ۲۰۱۹؛ رشوند و همکاران ۲۰۱۳). از ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ در مجموع ۵۵۹۹۷ نفر در ۴۸۶۲ روی داد لغزش در سراسر جهان کشته شدند (هی و همکاران ۲۰۱۹). در ایران نیز پژوهش‌هایی درباره‌ی زیان‌های ناشی از حرکت‌های توده‌یی و زمین‌لغزش انجام شده است. بر پایه‌ی گزارش جمع‌بندی داده و زیان‌های ۴۹۰۰ زمین‌لغزش، اندازه‌ی زیان ناشی از زمین‌لغزش حدود ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد شد (رشوند و مصفایی ۲۰۱۳).

تعیین احتمال روی داد زمین‌لغزش نیازمند کاربرد مدل‌های پیچیده و تحلیل همه‌ی عامل‌های مؤثر در آن است. پیچیدگی و مرکب بودن عامل‌های مؤثر در زمین‌لغزش باعث مشکل‌شدن تعیین احتمال روی داد آن است (جویباری و همکاران ۲۰۱۶). از جمله عامل‌های طبیعی مؤثر در روی داد زمین‌لغزش‌ها بارش، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، گسل، اندازه‌ی رطوبت و مانند آن است (مصفایی و همکاران ۲۰۱۷). پهنه‌بندی تقسیم‌بندی سطح زمین به منطقه‌های مجزا و رتبه‌بندی آن‌ها بر پایه‌ی احتمال خطر بروز زمین‌لغزش است (شعاعی ۲۰۱۶). از آن‌جا که پیش‌بینی زمان روی داد زمین‌لغزش‌ها مشکل است، شناسایی منطقه‌های حساس به زمین‌لغزش و پهنه‌بندی آن‌ها بر پایه‌ی احتمال خطر بروز آن اهمیت فراوانی دارد.

پیشینه‌ی کاربرد نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دهه‌ی ۱۹۷۰ می‌رسد و روش‌های پرشماری نیز برای آن هست (پرادهان و لی ۲۰۱۰). روش‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را می‌توان بر پایه‌ی ماهیت به دو دسته‌ی کلی تجربی و آماری تقسیم کرد. مدل‌های تجربی در شرایط جغرافیایی ویژه‌یی داده می‌شود، به طوری که عامل‌های هر مدل متناسب با شرایط خاص آن منطقه است، یا بر بعضی عامل‌ها تأکید بیش‌تری شده است، و ممکن است برای منطقه‌ی دیگر چندان مناسب نباشد، مانند کاربرد مدل‌های حائری-سمیعی (سرفراز و همکاران

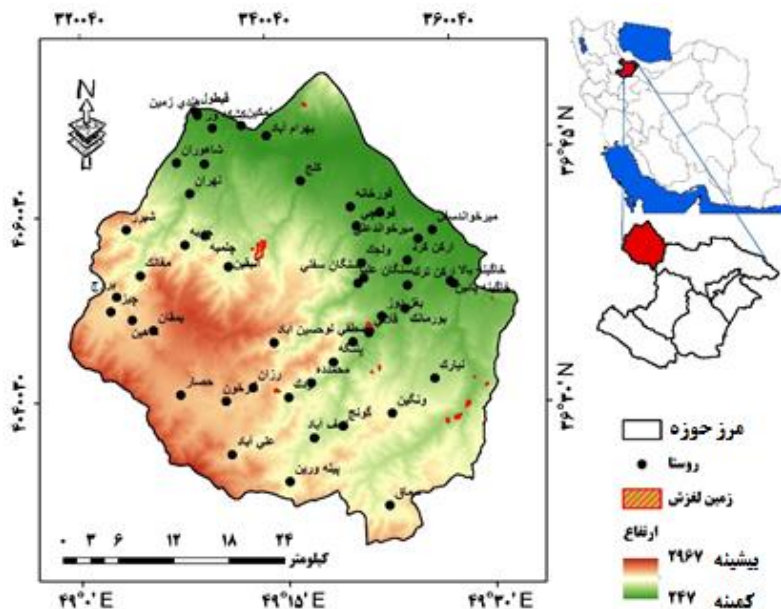
۲۰۲۱؛ آرمین و همکاران ۲۰۱۹)، و تحلیل سلسله‌مراتبی (یوشیماتسو و آبه ۲۰۰۶؛ یالسین و همکاران ۲۰۱۱؛ هاسکیو گالری و ارکان اوغلو ۲۰۱۲؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ کریمی سنگچینی و همکاران ۲۰۱۶؛ کومار و آنبالاگان ۲۰۱۶؛ استنلی و کریشباوم ۲۰۱۷؛ آبی و همکاران ۲۰۱۹؛ هی و همکاران ۲۰۱۹؛ نگوین و لیو ۲۰۱۹). در مدل‌های آماری اندازه‌ی اهمیت رده‌های گوناگون عامل‌های مؤثر در ناپایداری دامنه مطابق با زمین‌لغزش‌های روی داده محاسبه می‌شود، و از روی هم‌گذاری لایه‌های عامل‌های مؤثر، نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش تهیه و رده‌بندی می‌شود، مانند روش وایازی چندمتغیره و پشتیبان (مصفایی و همکاران ۲۰۰۹؛ مصفایی و اونق ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ آلتواینی و همکاران ۲۰۱۴)، منطق فازی و گامای فازی (تنگستانی ۲۰۰۴؛ لی ۲۰۰۷؛ بوی و همکاران ۲۰۱۵؛ مرادی و همکاران ۲۰۱۰)، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (کانیانی و همکاران ۲۰۰۸؛ کانفورتی و همکاران ۲۰۱۴؛ دو و همکاران ۲۰۱۵)، مدل نسبت فراوانی (یالسین و همکاران ۲۰۱۱؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ و خشوری و زارع ۲۰۱۶)، و روش جنگل تصادفی (کاتانی و همکاران ۲۰۱۳؛ چن و همکاران ۲۰۱۴؛ یوسف و همکاران ۲۰۱۵).

روش گرداننده‌های فازی گاما نیز از روش‌های مرسوم و کمابیش جدید پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش است که به دلیل کاربرد منطق فازی، محدودیت‌های عمل‌گرهای جمع و ضرب جبری لایه‌ها در آن نیست. در پژوهش‌های گذشته اندازه‌های گوناگونی از گاما برای بهترین نقشه‌ی پهنه‌بندی معرفی شد، مانند گامای ۰/۹۷۵ در آبخیز هراز (مرادی و همکاران ۲۰۱۰)، گامای ۰/۷ در لاجیم مازندران و طالقان استان تهران (متکان و همکاران ۲۰۰۹؛ متولی و اسماعیلی ۲۰۱۳)، گامای ۰/۹ در بخش مرکزی شهرستان جم بوشهر (صفاری و همکاران ۲۰۱۵)، گامای ۰/۹۴ در آبخیز کلان استان فارس (تنگستانی ۲۰۰۴)، گامای ۰/۹۷۵ در منطقه‌ی در کره (لی ۲۰۰۷)، و گامای ۰/۹۷۵ در ناگلند هندوستان (هینوتولی‌سما و همکاران ۲۰۱۷). شریعت جعفری (۲۰۰۸) نیز برای تبیین تأثیر عمل‌گرهای گاما در ارزیابی توان زمین در برابر لغزش در البرز مرکزی، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را بررسی کرد و نتیجه گرفت که با افزایش اندازه‌ی گاما در عمل‌گر گامای فازی، درصدهای بیش‌تری از سطح منطقه در رده‌های خطر بیش‌تر جا می‌گیرند، و براین‌پایه برای کاربری‌های گوناگون اندازه‌های گوناگونی از گاما را برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر پیشنهاد کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی پژوهش بخشی از آبخیز رود قزل‌اوزن در استان قزوین با وسعت ۱۵۱۷ کیلومترمربع میان مختصات‌های ۵۹' ۴۸° تا ۳۰' ۴۹° طول شرقی و ۲۲' ۳۶° تا ۴۹' ۳۶° عرض شمالی، در فاصله‌ی حدود ۱۱۰ کیلومتر شمال غرب شهر قزوین است، که از شمال به استان گیلان (دریاچه‌ی سد سفیدرود)، از جنوب و غرب به استان زنجان، و از شرق به حوزه‌ی شاهرود محدود می‌شود. آبخیز قزل‌اوزن از سرشاخه‌های اصلی رود سفیدرود است که بلندی کمینه‌ی آن ۲۴۷ متر، بلندی بیشینه ۲۹۶۷ متر، و میانگین بلندی آن ۱۳۵۰ متر از تراز دریای آزاد است. رود اصلی و دائمی قزل‌اوزن از میان این حوزه می‌گذرد، که به دلیل شرایط مناسب در حاشیه‌ی آن کشاورزی، باغداری، به‌ویژه کشت زیتون، در سطح گسترده‌ی رواج دارد (شکل ۱).

بر پایه‌ی زیان‌های ناشی از این روی‌داد لازم است که نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت روی‌داد زمین‌لغزش در منطقه‌های حساس با روش مناسبی تهیه شود. آبخیز قزل‌اوزن از بخش‌های کوهستانی و مستعد به زمین‌لغزش در استان قزوین است. به دلیل زیان‌های فراوان جانی و مالی، اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین در تفاهم‌نامه‌ی با پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، خواستار انجام پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این حوزه شد. هدف از این پژوهش تعیین مناسب‌ترین ضریب گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه‌ی قزل‌اوزن استان قزوین است. نتیجه‌ی این پژوهش کاربرد مهمی در فرآیند آمایش کاربری‌های زمین و مدیریت منطقه‌های حساس به زمین‌لغزش خواهد داشت.



شکل ۱- موقعیت مکانی آبخیز قزل‌اوزن.

پراکنش زمین‌لغزش سازمان جنگل‌ها و مراتع (کاربرگ‌های تک‌صفحه‌ی و چهارصفحه‌ی) به کار برده شد. در این مرحله نقشه‌ی رقومی هر نوع برهم‌خوردگی سطح دامنه که شبیه به زمین‌لغزش است، تهیه شد. پس از شناسایی همه‌ی زمین‌لغزش‌ها در بازدیدهای صحرائی در گام اول، و اطمینان‌یافتن از بروز زمین‌لغزش در آن منطقه، نقشه‌ی نهایی پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه شد.

نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها در دو مرحله‌ی بررسی‌های کتابخانه‌ی و بازدیدهای میدانی تهیه شد. تنها لغزش‌های جریان‌ی ۱ و چرخشی ۲ به کار برده شد. در بررسی‌های کتابخانه‌ی منبع‌های اطلاعاتی گوناگون مانند تفسیر برجسته‌نمایی (استریوسکوپی) عکس‌های هوایی با مقیاس‌های ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۴۰۰۰۰، نقشه‌های پستی‌بلندی ۱:۲۵۰۰۰، تصویرهای ماهواره‌ی گوگل‌ارث، و نقشه‌های

- 1- Flows
- 2- Rotational landslide

عمل‌گرهای گامای فازی برای روی هم‌گذاری نقشه‌ها بر پایه‌ی نسبت فراوانی (اهمیت) به کار برده شد. از آن‌جا که برای کاربرد عمل‌گرهای گامای فازی ضروری است که اندازه‌ی لایه‌های ورودی ۰ تا ۱ باشد؛ اندازه‌های نسبت فراوانی لایه‌ها با تابع خطی (رابطه‌ی ۲) به این دامنه‌ی عددی تبدیل شد، و اندازه‌های به‌دست‌آمده همچون اندازه‌های عضویت فازی رده‌های عامل‌های مؤثر (که عددی است میان ۰ و ۱) در نظر گرفته شد.

$$2 \quad X = (X - \text{Min}_x) / (\text{Max}_x - \text{Min}_x) = \text{عضویت فازی}$$

X : اندازه‌ی نسبت فراوانی، و Max_x و Min_x کمینه و بیشینه‌ی اندازه‌های نسبت فراوانی رده‌های هر عامل مؤثر است.

برای تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش لایه‌های فازی روی هم گذاشته شد. روش‌های تلفیق داده‌های فازی که اندازه‌های آن ۰ تا ۱ است بر پایه‌ی تحلیل نظری مجموعه‌ها است، مانند fuzzy And, fuzzy Or, fuzzy Product, fuzzy Sum, fuzzy Gamma و هر روش جنبه‌های گوناگونی را برای عضویت هر یاخته نسبت به لایه‌های ورودی چندگانه می‌دهد.

روش تلفیق Fuzzy And اندازه‌ی کمینه را برای مجموعه‌ی یاخته‌های مربوط به مکان می‌دهد. این روش هنگامی مفید است که تعیین کم‌ترین اندازه‌های عضویت در میان همه‌ی لایه‌های ورودی لازم است (رابطه‌ی ۳).

$$3 \quad \text{Fuzzy And Value} = \min(\text{arg}1, \dots, \text{arg}n)$$

روش تلفیق Fuzzy Or اندازه‌ی بیشینه را برای مجموعه‌ی یاخته‌های مربوط به مکان می‌دهد، و هنگامی مفید است که به تعیین بیش‌ترین اندازه‌های عضویت در میان همه‌ی لایه‌های ورودی نیاز است (رابطه‌ی ۴).

$$4 \quad \text{Fuzzy Or Value} = \max(\text{arg}1, \dots, \text{arg}n)$$

روش تلفیق Fuzzy Product اندازه‌ی ضرب فازی را برای مجموعه‌ی یاخته‌های مربوط به مکان می‌دهد، که تعیین ارتباط نسبی اندازه‌های لایه‌ی خروجی با اندازه‌های لایه‌های ورودی نیز به‌طور معمول مشکل است (رابطه‌ی ۵).

عامل‌های گوناگونی مانند بلندی، اندازه‌ی شیب، جهت شیب، کاربری زمین، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراه، فاصله از جاده، متوسط بارش سالانه و احتمال لرزه‌خیزی در جایگاه عامل‌های مؤثر بر زمین‌لغزش به کار برده شد. منبع‌های اطلاعاتی برای تهیه‌ی نقشه‌ی این عامل‌های مؤثر شامل نقشه‌های پستی‌بلندی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، مدل رقومی بلندی با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر، نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌ی پوشش گیاهی سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، و تصویرهای گوگل‌ارث بود.

برای تعیین ضریب عامل شدت زمین‌لرزه نقشه‌ی رقومی شتاب افقی زمین‌لرزه در محدوده‌ی قزوین به کار برده شد (بربریان و همکاران ۱۹۹۳). داده‌های رقومی شتاب بیشینه‌ی زمین از موسوی بفرئی و همکاران (۲۰۱۴) برای دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال تهیه شد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی بیشینه‌ی بارش روزانه، ابتدا اندازه‌های بیشینه‌ی بارش روزانه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی (پنج ایستگاه در منطقه و ۱۰ ایستگاه بیرون از منطقه) برای سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۷ در هر سال استخراج شد، و بهترین توزیع برای برازش به داده‌های هر ایستگاه در نرم‌افزار ایزی‌فیت^۳، انتخاب و آماره‌های مربوط به آن استخراج شد. در هر ایستگاه اندازه‌های بیشینه‌ی بارش روزانه با بهترین توزیع برای دوره‌ی بازگشت ۲۵ سال برآورد شد، و نقشه‌ی بیشینه‌ی بارش روزانه با دوره‌ی بازگشت ۲۵ سال از اندازه‌های نقطه‌ی ایستگاه‌های گوناگون تهیه شد.

برای تعیین حساسیت زمین‌لغزش، مساحت زمین‌لغزش در هر رده از نقشه‌ی عامل‌های مؤثر مشخص شد. نقشه‌ی هر عامل مؤثر با نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش قطع داده شد، و اندازه‌های نسبت فراوانی هر یک از رده‌های عامل‌های مؤثر با رابطه‌ی نسبت فراوانی (رابطه‌ی ۱) محاسبه شد (لی ۲۰۰۷؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ کریمی‌سنگچینی و همکاران ۲۰۱۶).

$$1 \quad Fr = \frac{L_i / \sum_{i=1}^n L_i}{C_i / \sum_{i=1}^n C_i}$$

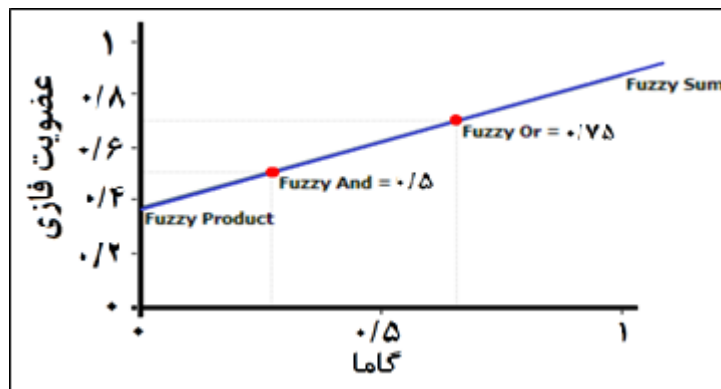
L_i مساحت زمین‌لغزش در رده‌ی i ام هر یک از عامل‌های مؤثر، C_i مساحت رده‌ی i ام هر عامل مؤثر، و n تعداد رده‌های عامل مؤثر است. به‌دلیل محدودیت‌های عمل‌گرهای جمع و ضرب جبری،

در روش گامای فازی اثرهای افزایشی جمع فازی و اثرهای کاهش‌ی ضرب فازی هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که گاما ۱ باشد، خروجی برابر با همان جمع فازی است، و در حالتی که گاما ۰ باشد، خروجی برابر با همان ضرب فازی است (رابطه‌ی ۸).

۸

$$\text{Fuzzy Gamma Value} = \text{pow}(1 - ((1 - \text{arg1}) * (1 - \text{arg2}) * \dots), \text{Gamma}) * \text{pow}(\text{arg1} * \text{arg2} * \dots, 1 - \text{Gamma})$$

این تابع در هنگامی که نیاز به اندازه‌هایی بزرگ‌تر از ضرب، اما کوچک‌تر از جمع باشد به کار برده می‌شود. رابطه‌ی اندازه‌های گوناگون گاما با تابع‌های Product, Sum, And, Or در شکل ۲ به شیوه‌ی تصویری نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار رابطه‌ی تابع‌های فازی با اندازه‌های گوناگون گاما.

پهنه‌بندی به کار برده نشدند ارزیابی شد. برای مقایسه‌ی رده‌های گوناگون خطر تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر رده، یا نسبت تراکمی خطر به کار برده می‌شود (یالسین ۲۰۱۱). در روش نقشه‌ی پهنه‌بندی تراکم لغزش در رده‌ی خطری که نسبت تراکم آن ۱ است، معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه، و تراکم لغزش در رده‌ی خطری که نسبت تراکم آن ۲ است، معادل با دوبرابر متوسط تراکم لغزش در کل منطقه است. بنابراین تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به‌درستی تهیه شدند از رده‌ی کم‌خطر تا رده‌های پرخطر افزایشی است (جی ۱۹۹۲).

$$Dr = \frac{Si/Ai}{\sum_1^n Si / \sum_1^n Ai} * 100 \quad 9$$

$$\text{Fuzzy Product Value} = \text{product}(\text{arg1}, \dots, \text{argn}) \quad 5$$

روش تلفیق Fuzzy Sum اندازه‌ی جمع فازی را برای مجموعه‌ی یاخته‌های مربوط به مکان می‌دهد (جمع فازی متفاوت از جمع جبری لایه‌ها است) (رابطه‌ی ۶).

$$\text{FuzzySumValue} = 1 - \text{product}(1 - \text{arg1}, \dots, 1 - \text{argn}) \quad 6$$

روش تلفیق Fuzzy Gamma اندازه‌ی حاصل ضرب جبری جمع فازی و ضرب فازی، که هر دو بخش به توان گاما (عددی میان ۰ تا ۱) رسیده‌اند را برای مجموعه‌ی یاخته‌های مربوط به مکان می‌دهد (رابطه‌ی ۷).

$$\mu(x) = (\text{FuzzySum})^\gamma * (\text{FuzzyProduct})^{1-\gamma} \quad 7$$

با روش‌های تلفیق فازی Sum, Product, Gamma (۰,۹۹, ..., ۰,۹۱, ۰,۹, ..., ۰,۱) حساسیت به روی‌داد زمین‌لغزش شناسایی، و بر پایه‌ی نقطه‌های عطف منحنی فراوانی تجمعی نقطه‌ها رده‌بندی شد. همه‌ی محاسبه‌های روی هم‌گذاری لایه‌ها با عمل‌گرهای گامای فازی در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس با به‌کارگیری دستور هم‌پوشانی فازی^۴ انجام شد.

برای ارزیابی کارایی و صحت‌سنجی مدل‌ها شاخص‌های نسبت تراکم (رابطه‌ی ۹) و مجموع پسندیدگی (مطلوبیت) به کار برده شد (جی ۱۹۹۲). نقشه‌ی خطر مناسب نقشه‌ی است که بهترین جداکنش را میان منطقه‌های با تراکم بسیار زمین‌لغزش، و منطقه‌های با تراکم کم ایجاد کند. مدل برتر پهنه‌بندی خطر روی‌داد زمین‌لغزش بر پایه‌ی ۳۰٪ از مساحت زمین‌لغزش‌های روی‌داده که در تهیه‌ی نقشه‌ی

پسندیدگی بیشتر باشد درستی آن روش بیشتر، و برای منطقه مناسب‌تر است (متولی و اسماعیلی ۲۰۱۳).

$$Qs = \sum_{i=1}^n [(Dr - 1)^2 \times S] \quad 10$$

QS: شاخص جمع پسندیدگی، S: نسبت مساحت رده خطر به مساحت منطقه است.

نتایج

در این حوزه در مجموع ۱۷ زمین لغزش با مساحت مجموع ۲۱۳۱۲۱۴ مترمربع ثبت شد که مساحت کمینه‌ی آن‌ها ۶۷۳۰ مترمربع، بیشینه ۱۰۸۸۴۷۷ مترمربع، میانگین مساحت هر یک ۱۲۵۳۶۵ مترمربع، و انحراف معیار از مساحت آن‌ها ۲۴۴۷۶۶ مترمربع است (شکل ۱).

خلاصه‌ی آماری زمین لغزش‌های روی داده‌ی آبخیز قزل‌اوزن (جدول ۱) بیان‌گر آن است که زمین لغزش‌های روی داده به دو بخش تقسیم شد، ۷۰٪ آن‌ها برای تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین لغزش، و ۳۰٪ آن‌ها برای ارزیابی نقشه‌های خطر به کار برده شد.

Dr: شاخص تراکم لغزش در هر رده‌ی خطر، Ai: مساحت هر رده‌ی خطر، Si: مساحت زمین لغزش‌ها در هر رده‌ی خطر، و n: تعداد رده‌های خطر است.

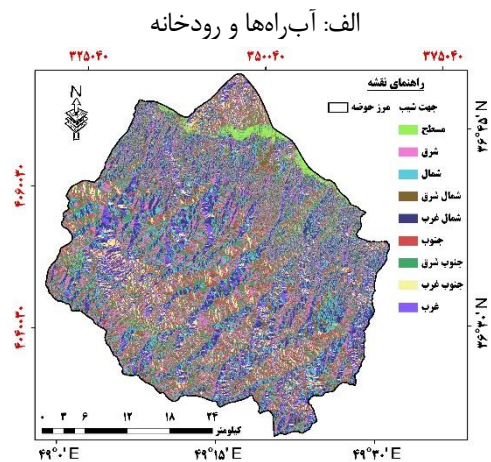
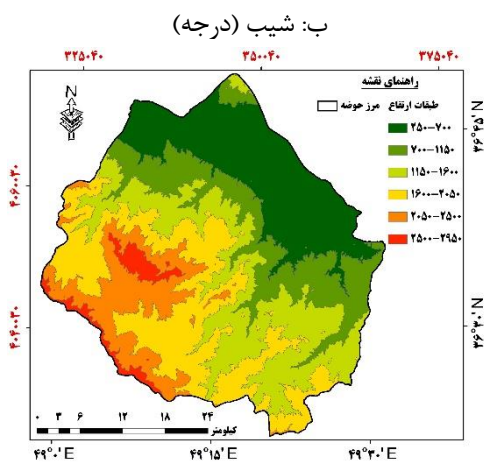
هرچه تفکیک میان رده‌های خطر با شاخص نسبت تراکم بهتر انجام شده باشد دقت یا پسندیدگی آن روش (نقشه) بیشتر است. اندازه‌ی مجموع کیفیت (رابطه‌ی ۱۰) نشان‌دهنده‌ی درستی یا پسندیدگی کارکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین لغزش برای کل منطقه است (متولی و اسماعیلی ۲۰۱۳). از دید نظری، حدی برای اندازه‌ی این شاخص نیست؛ اختلاف میان اندازه‌های شاخص جمع پسندیدگی کم‌تر از ۰/۱ در نظر گرفته نمی‌شود و مدل‌ها یکسان فرض می‌شوند. شاخص نسبت تراکم از جنس پراش است، و اگر انحراف اندازه‌های شاخص نسبت تراکم از میانگین پهنه‌های گوناگون به هم نزدیک باشد نشان‌دهنده‌ی آن است که تراکم زمین لغزش‌ها در رده‌های گوناگون نزدیک به هم است، و اندازه‌ی شاخص جمع پسندیدگی نیز کم است، و برعکس، هرچه انحراف اندازه‌های شاخص نسبت تراکم از میانگین پهنه‌های گوناگون بیشتر باشد، تراکم زمین لغزش‌ها با هم تفاوت دارد و اندازه‌ی شاخص جمع پسندیدگی نیز بزرگ‌تر است. بنابراین به‌طور کلی هرچه اندازه‌ی شاخص جمع

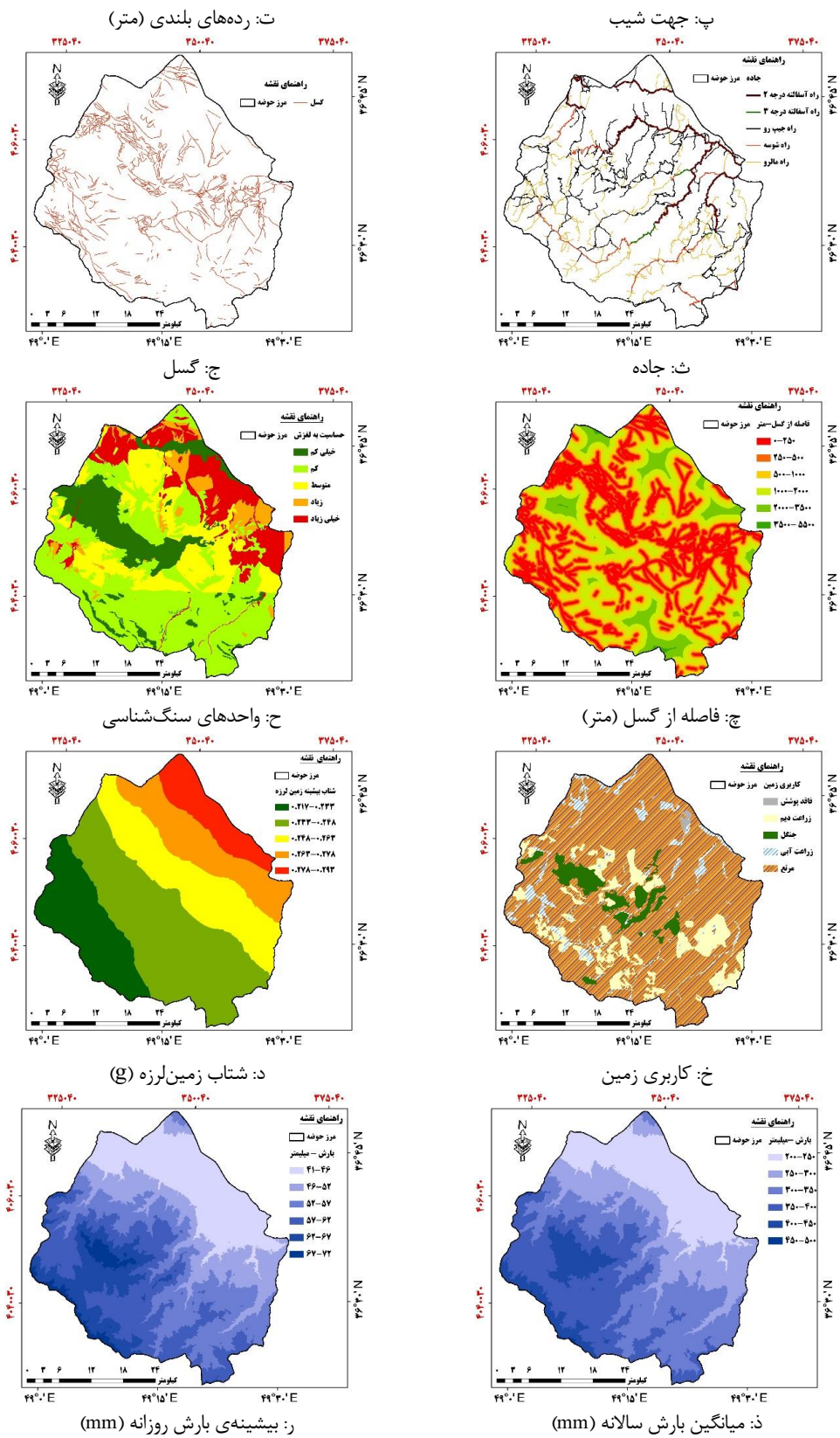
جدول ۱- تفکیک زمین لغزش‌های آبخیز قزل‌اوزن برای مرحله‌های ساخت و ارزیابی مدل‌ها.

کلی		ساخت مدل (۷۰٪)		صحت‌سنجی (۳۰٪)	
تعداد	مجموع سطح (m ²)	تعداد	مجموع سطح (m ²)	تعداد	مجموع سطح (m ²)
۱۷	۲۱۳۱۲۱۴	۱۱	۱۵۳۲۴۲۵	۶	۵۹۸۷۸۹

بلندی، کاربری زمین، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراه، فاصله از گسل، شتاب زمین‌لرزه، اندازه‌ی بارش و بیشینه‌ی بارش روزانه تهیه شد (شکل ۳).

از آن‌جا که برای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش به لایه‌های اطلاعاتی عامل‌های مؤثر بر آن نیاز است؛ نقشه‌های رقومی آن‌ها شامل درجه‌ی شیب، جهت شیب،





شکل ۳- نقشه‌های عامل‌های مؤثر بر روی داد زمین‌لغزش در آبخیز قزل‌اوزن.

تعیین مناسب‌ترین گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت...

در جدول ۲ مساحت رده‌های نقشه‌ی عامل‌ها، مساحت زمین لغزش در هر رده، و نسبت فراوانی محاسبه شده برای هر رده از نقشه‌های عامل‌ها در آبخیز قزل‌اوزن داده شده است.

جدول ۲- مساحت رده‌های نقشه‌ی عامل‌ها، زمین لغزش و نسبت فراوانی هر رده در آبخیز قزل‌اوزن.

عامل	رده‌ها	مساحت (ha)	مساحت زمین لغزش (ha)	نسبت فراوانی	عضویت فازی
شیب (°)	۰-۵	۱۸۸۹۶/۳	۰	۰	۰
	۵-۱۵	۴۱۶۵۰/۵	۵۴/۲۴	۱/۲۹	۰/۸۵۹
	۱۵-۲۵	۴۰۵۴۸/۶	۶۱/۳۸	۱/۵۰	۱
	۲۵-۳۵	۳۶۴۲۴/۱	۲۶/۱۶	۰/۷۱	۰/۴۷۴
	۳۵-۴۵	۱۲۲۶۲/۴	۹/۹۹	۰/۸۱	۰/۵۳۸
	۴۵<	۲۳۹۴/۶	۱/۹۲	۰/۷۹	۰/۵۲۹
جهت شیب	مسطح	۳۹۱۷/۲	۰	۰	۰
	شمال	۲۱۲۰۹/۱	۴۵/۴۵	۲/۱۲	۰/۹۴۲
	شمال شرق	۲۳۹۹۲/۳	۲۵/۳۷	۱/۰۵	۰/۴۶۵
	شرق	۲۳۲۲۲/۰	۱۵/۰۹	۰/۶۴	۰/۲۸۶
	جنوب شرق	۱۸۹۹۵/۱	۵/۱۸	۰/۲۷	۰/۱۲۰
	جنوب	۱۳۰۶۲/۷	۰/۸۳	۰/۰۶	۰/۰۲۸
	جنوب غرب	۱۱۸۶۸/۲	۱/۵۳	۰/۱۳	۰/۰۵۷
	غرب	۱۴۶۴۵/۲	۱۲/۰۴	۰/۸۱	۰/۳۶۱
	شمال غرب	۲۲۲۷۵/۳	۴۸/۱۹	۲/۲۵	۱
	بلندی از تراز دریا (m)	۲۵۰-۷۰۰	۳۴۰۴۶/۸	۰/۶۷	۰/۰۲
۷۰۰-۱۱۵۰	۲۴۴۹۰/۹	۴۷/۷۷	۱/۹۳	۰/۷۴۴	
۱۱۵۰-۱۶۰۰	۳۴۹۹۴/۹	۹۱/۵۱	۲/۶۰	۱	
۱۶۰۰-۲۰۵۰	۳۶۴۰۵/۳	۱۳/۷۴	۰/۳۷	۰/۱۴۴	
۲۰۵۰-۲۵۰۰	۱۷۸۳۳/۲	۰	۰	۰	
۲۵۰۰-۲۹۵۰	۴۴۲۴/۹	۰	۰	۰	
بارش (mm)	۲۰۰-۲۵۰	۳۰۵۷۳/۶	۰/۶۷	۰/۰۲	۰/۰۱۱
	۲۵۰-۳۰۰	۲۹۳۹۳/۰	۵۳/۸۰	۱/۸۱	۰/۸۷۶
	۳۰۰-۳۵۰	۴۲۱۰۸/۶	۸۷/۷۹	۲/۰۷	۱
	۳۵۰-۴۰۰	۳۷۹۱۱/۷	۱۱/۴۲	۰/۳۰	۰/۱۴۴
	۴۰۰-۴۵۰	۱۲۰۲۷/۹	۰	۰	۰
	۴۵۰-۵۰۰	۱۸۰/۴	۰	۰	۰
بیشینه‌ی بارش روزانه (mm)	۴۱-۴۶	۳۴۰۴۶/۸	۰/۶۷	۰/۰۲	۰/۰۸
	۴۶-۵۲	۲۴۴۹۰/۹	۴۷/۷۷	۱/۹۳	۰/۷۴۵
	۵۲-۵۷	۳۵۰۸۲/۶	۹۱/۵۱	۲/۵۹	۱
	۵۷-۶۲	۳۶۳۱۷/۵	۱۳/۷۴	۰/۳۷	۰/۱۴۵
	۶۲-۶۷	۱۷۸۳۳/۲	۰	۰	۰
	۶۷-۷۲	۴۴۲۴/۹	۰	۰	۰

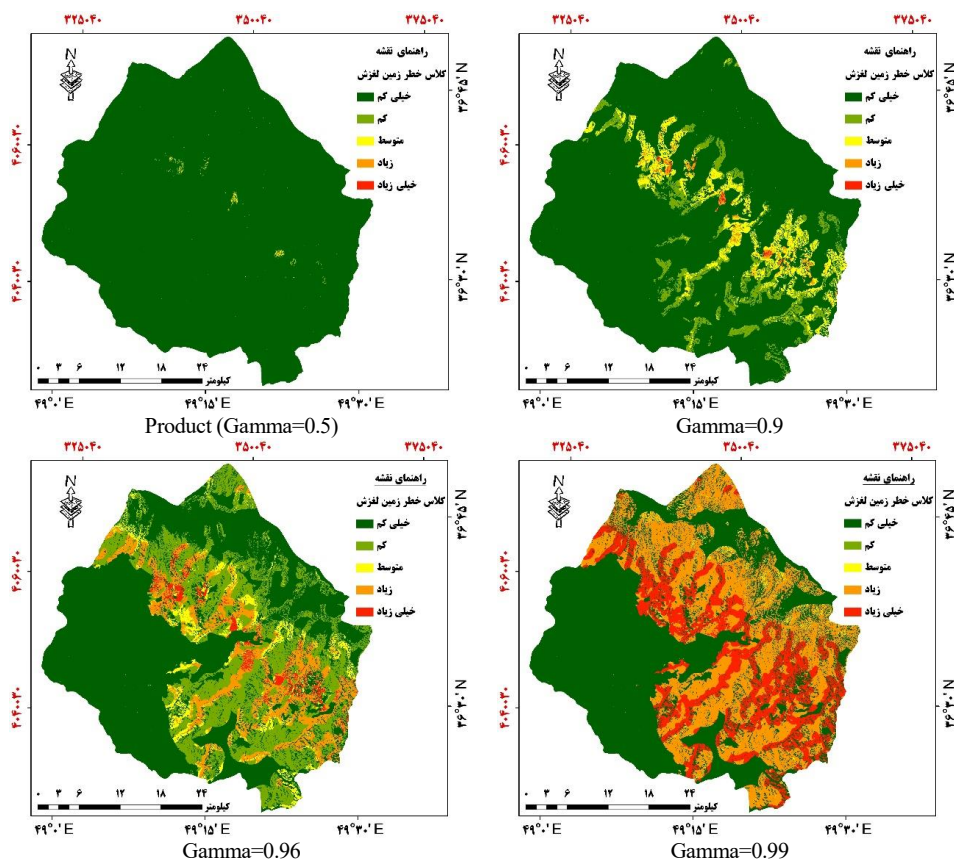
ادامه‌ی جدول ۲- مساحت رده‌های نقشه‌ی عامل‌ها، زمین‌لغزش و نسبت فراوانی هر رده در آبخیز قزل‌اوزن.

عامل	رده‌ها	مساحت (ha)	مساحت زمین‌لغزش (ha)	نسبت فراوانی	عضویت فازی
شتاب زمین (g)	۰-۲۳۳	۲۶۷۸۹/۳	۰	۰	۰
	۰/۲۳۳-۰/۲۴۸	۵۶۳۷۷/۵	۱۴/۹۳	۰/۲۶	۰/۰۶۶
	۰/۲۴۸-۰/۲۶۳	۳۲۳۶۷/۶	۱۳۰/۶۸	۴/۰۰	۱
	۰/۲۶۳-۰/۲۷۸	۲۲۵۵۱/۴	۰/۶۷	۰/۰۳	۰/۰۷
	۰/۲۷۸-۰/۲۹۳	۱۳۷۰۱/۸	۶/۹۶	۰/۵۰	۰/۱۲۶
فاصله از گسل (m)	۰-۲۵۰	۴۴۴۷۳/۱	۹۳/۴۸	۲/۰۸	۱
	۲۵۰-۵۰۰	۲۸۱۷۲/۲	۳۳/۱۵	۱/۱۷	۰/۵۶۰
	۵۰۰-۱۰۰۰	۳۵۱۱۷/۵	۲۰/۰۴	۰/۵۷	۰/۲۷۲
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۳۲۶۸۲/۵	۶/۵۸	۰/۲۰	۰/۰۹۶
	۲۰۰۰-۳۵۰۰	۱۱۰۱۸/۴	۰	۰	۰
فاصله از آبراه (m)	۰-۲۵	۴۱۰۲۶/۳	۳۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۰۸۹
	۲۵-۵۰	۳۴۸۵۴/۸	۳۰/۵۴	۰/۸۷	۰/۲۳۴
	۵۰-۱۰۰	۴۱۸۸۰/۰	۴۶/۱۷	۱/۰۹	۰/۴۸۷
	۱۰۰-۲۰۰	۲۵۹۴۷/۷	۴۰/۴۷	۱/۵۴	۱
	۲۰۰<	۸۰۹۲/۹	۵/۴۱	۰/۶۶	۰
فاصله از جاده (m)	۰-۲۵	۶۲۱۲/۱	۱۰/۷۳	۱/۷۱۲	۰/۷۶۷
	۲۵-۵۰	۵۸۷۳/۲	۱۱/۴۱	۱/۹۲۵	۰/۸۷۷
	۵۰-۱۰۰	۱۰۸۵۶/۵	۲۳/۷۱	۲/۱۶۳	۱
	۱۰۰-۲۰۰	۱۹۰۶۴/۳	۳۷/۵۲	۱/۹۴۹	۰/۸۹۰
	۲۰۰-۴۰۰	۳۰۳۶۱/۰	۵۱/۹۳	۰/۶۹۴	۰/۷۵۸
کاربری زمین	فی پوشش	۵۸۸/۵	۰	۰	۰
	زراعت دیم	۱۸۰۶۸/۷	۹۷/۸۰	۵/۳۶۲	۱
	جنگل	۹۲۷۹/۹	۱/۹۵	۰/۲۰۸	۰/۰۳۹
	زراعت آبی	۹۴۵۰/۸	۵/۲۹	۰/۵۵۴	۰/۱۰۳
	مرتع	۱۱۴۴۱۳/۸	۴۸/۲۱	۰/۴۱۷	۰/۰۷۸
سنگ‌شناسی	۱	۲۳۵۴۶/۱	۰	۰	۰
	۲	۶۴۹۵۸/۷	۳۶/۶۳	۰/۵۵۹	۰/۱۶۹
	۳	۳۰۲۸۵/۰	۱۰۰/۸۹	۳/۳۰۰	۱
	۴	۱۰۱۹۹/۲	۶/۹۶	۰/۶۷۶	۰/۲۰۵
	۵	۲۲۸۰۸/۷	۸/۷۷	۰/۳۸۱	۰/۱۱۵

از نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، و جدول ۳ مساحت رده‌های نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش برای شماره‌های گوناگون گاما در آبخیز قزل‌اوزن را نشان می‌دهد.

با عمل‌گرهای گوناگون گامای فازی، احتمال روی‌داد زمین‌لغزش محاسبه، و بر پایه‌ی نقطه‌های عطف منحنی فراوانی تجمعی نقطه‌ها رده‌بندی شد. شکل ۴ نمونه‌هایی

تعیین مناسب‌ترین ضریب گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت...



شکل ۴- نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش برای ضریب‌های گوناگون گاما.

جدول ۳- مساحت رده‌های نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش برای ضریب‌های گوناگون گاما.

گاما	مساحت رده‌ی خطر (m^2)				
	۵	۴	۳	۲	۱
۰ (ضرب)	۱۸۴۸	۳۷۳۲۸	۱۹۷۸۹۷	۷۵۸۲۴۵	۱۵۱۶۰۱۳۴۴۱
۰/۱	۱۸۳۱	۵۳۵۲۲	۲۸۲۱۳۹	۹۱۴۸۵۱	۱۵۱۵۷۵۶۴۱۶
۰/۲	۴۸۲۷	۸۷۳۵۳	۴۱۴۱۷۲	۱۱۹۵۲۹۰	۱۵۱۵۳۰۷۱۱۷
۰/۳	۶۶۳۵	۱۰۴۶۹۲	۵۲۳۷۳۲	۱۵۷۴۳۷۱	۱۵۱۴۷۹۹۳۲۹
۰/۴	۶۶۲۳	۱۷۲۴۲۱	۷۱۸۹۰۳	۲۱۲۱۴۰۵	۱۵۱۳۹۸۹۴۰۷
۰/۵	۱۹۳۵۱	۳۲۰۷۸۳	۹۴۹۷۷۶	۳۲۹۵۶۸۶	۱۵۱۲۴۲۳۱۶۳
۰/۶	۴۶۴۷۸	۵۴۹۸۷۷	۱۶۱۰۲۶۶	۶۰۴۱۳۱۸	۱۵۰۸۷۶۰۸۲۰
۰/۷	۱۳۵۴۲۹	۱۰۳۴۸۶۶	۲۸۷۱۸۲۴	۱۹۲۶۱۰۷۰	۱۴۹۳۷۰۵۵۷۰
۰/۸	۳۵۹۶۶۳	۲۴۰۷۲۳۹	۹۸۵۳۳۷۲	۷۶۵۰۴۷۱۰	۱۴۲۷۸۸۳۷۷۵
۰/۹	۲۰۹۲۶۷۴	۱۷۱۳۹۰۰۶	۹۸۸۵۰۹۶۹	۱۱۴۴۴۴۱۷۳	۱۲۸۴۴۸۱۹۳۷
۰/۹۱	۲۶۰۶۸۵۸	۱۷۱۳۹۰۰۶	۹۸۸۵۰۹۶۹	۱۱۴۴۴۴۱۷۳	۱۲۷۲۵۸۴۷۹۰
۰/۹۲	۳۳۰۹۵۴۷	۲۶۹۹۱۳۷۹	۱۱۱۸۹۶۲۶۹	۱۰۲۹۰۴۱۴۴	۱۲۶۵۵۵۱۷۳۱
۰/۹۳	۴۵۳۳۴۸۶	۴۱۹۲۸۶۲۹	۱۲۴۲۵۵۷۶۷	۸۱۶۳۸۷۷۹	۱۲۴۹۲۶۴۶۷۲
۰/۹۴	۶۵۴۵۶۱۰	۶۴۴۶۶۸۸	۱۲۹۲۳۴۱۰۶	۶۹۴۸۰۶۶۶	۱۱۵۲۱۹۹۶۸۵
۰/۹۵	۱۱۵۹۹۸۱۱	۹۴۹۴۲۹۱۲	۱۲۲۸۶۶۳۴۶	۱۴۰۴۱۶۷۲۵	۹۸۸۶۸۶۵۸۶
۰/۹۶	۲۷۵۶۹۸۰۷	۱۳۱۰۸۲۱۱۶	۱۰۳۵۷۷۱۰۵	۲۸۲۰۱۶۹۷۹	۸۷۸۸۲۴۴۳۲۴
۰/۹۷	۷۲۷۰۳۰۴۶	۱۶۶۰۳۰۰۹۴	۷۳۶۲۳۴۲۲	۳۷۰۹۱۵۴۰۴	۷۹۰۳۷۰۲۷۸
۰/۹۸	۱۶۳۵۵۶۸۱۶	۱۶۷۱۲۰۹۷۴	۲۴۲۰۹۴۰۴۳	۲۴۴۶۵۸۴۲۸	۷۸۸۷۴۸۵۴۴
۰/۹۹	۲۶۱۸۱۷۶۱۱	۱۵۷۵۸۷۷۴۶	۳۶۵۷۷۷۲۶۳	۴۱۲۸۴۴۲۷	۷۸۸۴۶۷۵۱۳
۱ (جمع)	۱۴۹۸۴۴۰۸۴۷	۱۲۴۲۷۶۳۸	۴۵۷۴۴۴۲	۱۴۲۴۷۹۴	۱۴۱۰۳۸

مدل برتر پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش بر پایه‌ی ۳۰٪ از مساحت زمین‌لغزش‌های روی‌داده که در تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی به‌کار برده‌نشده‌اند ارزیابی شد. در جدول ۴ اندازه‌های مساحت زمین‌لغزش، شاخص نسبت تراکم در هر رده‌ی خطر، و جمع پسندیدگی برای هر مدل گاما در آبخیز قزل‌اوزن داده شده است.

جدول ۴- مساحت زمین‌لغزش (m^2) و شاخص نسبت تراکم در هر رده‌ی خطر.

Qs	رده‌ی خطر										گاما
	۵		۴		۳		۲		۱		
	Dr	مساحت	Dr	مساحت	Dr	مساحت	Dr	مساحت	Dr	مساحت	
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰ (ضرب)
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۱
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۲
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۳
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۴
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۵
۰/۰۱	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۶
۰/۰۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱/۲۱	۹۲۳۵	۱/۰	۵۸۹۵۵۴	۰/۷
۰/۹۸	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۵/۲۹	۱۵۹۷۹۵	۰/۷۸	۴۳۸۹۹۴	۰/۸
۲/۲۱	۰/۰	۰	۰/۰۶	۴۳۵	۶/۱۴	۲۳۹۴۳۲	۲/۷۵	۱۲۴۳۲۰	۰/۴۶	۲۳۴۶۰۲	۰/۹
۲/۱۹	۰/۰	۰	۱/۱۸	۱۲۵۳۵	۵/۹۹	۲۶۴۵۷۱	۲/۲۶	۹۱۶۲۸	۰/۴۶	۲۲۹۹۱۸	۰/۹۱
۲/۱۱	۰/۰	۰	۲/۲۱	۳۶۵۲۳	۵/۶۹	۲۷۹۰۸۶	۱/۶۳	۵۲۵۰۲	۰/۴۶	۲۳۰۵۴۱	۰/۹۲
۱/۹۶	۰/۰	۰	۳/۹۴	۱۰۰۱۹۰	۴/۹۸	۲۵۳۹۲۳	۰/۷۴	۲۰۲۸۱	۰/۴۵	۲۲۴۲۵۸	۰/۹۳
۲/۳۱	۰/۰	۰	۵/۳۲	۱۹۹۴۱۴	۳/۲۹	۱۵۹۵۱۳	۲/۶	۱۴۴۱۱۱	۰/۲۱	۹۵۵۸۲	۰/۹۴
۲/۳۵	۰/۰	۰	۵/۳۶	۲۷۷۱۰۷	۲/۲۴	۹۱۶۰۴	۱/۶۸	۱۸۶۹۱۰	۰/۱۱	۴۳۰۳۲	۰/۹۵
۲/۳۷	۱/۱۶	۱۲۶۲۲	۵/۱۷	۳۳۸۸۴۴	۰/۶۴	۱۸۴۶۸	۱/۲۶	۱۸۵۱۰۴	۰/۱۳	۴۳۶۱۴	۰/۹۶
۱/۹۸	۳/۸۴	۱۱۰۲۶۵	۳/۹۲	۲۵۸۴۵۸	۱/۸۹	۱۸۰۳۲۸	۰/۰۷	۶۵۰۳	۰/۱۴	۴۳۱۰۳	۰/۹۷
۲/۱۳	۴/۷۴	۳۰۵۶۹۶	۲/۳۶	۱۴۶۷۶۴	۰/۷۱	۱۰۲۷۳۰	۰/۰	۰	۰/۱۴	۴۳۴۶۲	۰/۹۸
۱/۵۳	۳/۵۷	۳۶۸۸۹۴	۱/۰۴	۱۸۶۷۲۸	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۱۴	۴۳۰۳۰	۰/۹۹
۰/۰۱	۱/۰	۵۹۸۷۸۹	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰	۱ (جمع)

بیش‌تر سطح منطقه در خطر خیلی‌کم، و در عمل‌گر جمع فازی بیش‌تر سطح منطقه در خطر خیلی‌زیاد برآورد شد. این یافته به دلیل ماهیت کاهش‌ی عمل‌گر ضرب فازی و برعکس ماهیت افزایشی عمل‌گر جمع فازی است. دیگر پژوهشگران نیز به نتیجه‌ی یکسانی از ماهیت عمل‌گرهای ضرب و جمع فازی دست یافتند (لی ۲۰۰۷؛ و خشوری و زارع ۲۰۱۶).

نتیجه‌ی ارزیابی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش (جدول ۴) نشان می‌دهد که دامنه‌ی اندازه‌های شاخص جمع پسندیدگی برای مدل‌های گوناگون تلفیق فازی میان ۰ (در گامای ۱ یا جمع فازی) تا ۲/۳۷ (در گامای ۰/۹۶) متغیر است؛ پس روش تلفیق فازی با گامای ۰/۹۶ بهترین نتیجه را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در آبخیز قزل‌اوزن داد. افزون بر این، اندازه‌های شاخص نسبت تراکم در تلفیق فازی با گامای ۰/۹۶ نشان‌دهنده‌ی روند افزایشی اندازه‌های

بحث

در روش‌های تلفیق فازی، از آن‌جا که اندازه‌ی همه‌ی لایه‌های ورودی کوچک‌تر از ۱ است، عمل‌گر ضرب فازی باعث می‌شود که اندازه‌ی لایه‌ی خروجی کم‌تر از اندازه‌ی همه‌ی لایه‌های ورودی باشد؛ بنابراین ماهیت تابع به‌کاررفته در این روش کاهش‌دهنده است، و در هنگامی که تعداد لایه‌های ورودی زیاد باشد، اندازه‌ی لایه‌ی خروجی به‌طور معمول بسیار کوچک است. برعکس، عمل‌گر جمع فازی لایه‌ها باعث می‌شود که اندازه‌ی لایه‌ی خروجی بزرگ‌تر از اندازه‌ی همه‌ی لایه‌های ورودی باشد؛ بنابراین ماهیت عمل‌گر جمع فازی افزایشی است. در این پژوهش نیز نتیجه‌ی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (شکل ۵ و جدول ۳) نشان داد که با افزایش اندازه‌های گاما از ۰ (معادل ضرب فازی) تا ۱ (معادل جمع فازی)، درصد مساحت رده‌های با خطر زیاد پیوسته افزایش یافت، به‌طوری که در عمل‌گر ضرب فازی

برای عامل‌های بلندی از تراز دریا، اندازه‌ی بارش و بیشینه‌ی بارش روزانه، اگرچه فرض بر این است که با افزایش اندازه‌ی رده‌های این عامل‌ها احتمال روی‌داد و فراوانی زمین‌لغزش نیز افزایش یابد، نتیجه‌ی این تحقیق نشان می‌دهد که این فرض در منطقه‌ی بررسی شده مصداق کامل ندارد، و گاه نتیجه‌ی بر خلاف مبانی نظری به‌دست‌آمده است. نقش این عامل‌ها در بروز زمین‌لغزش از عامل‌های مؤثرتری مانند شیب، جهت شیب و فاصله از گسل تأثیر گرفته است.

اندازه‌ی نسبت‌های فراوانی با افزایش اندازه‌ی فاصله از عامل خطی فاصله از گسل کاهش یافت (جدول ۲). بر پایه‌ی دیدگاه نظری نیز تأثیر گسل‌ها بر واحدهای با فاصله‌ی کم‌تر بیش‌تر است، و بنابراین احتمال روی‌داد زمین‌لغزش در آن‌ها بیش‌تر است. پژوهش‌های برپایه‌ی دانش کارشناسی مانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی (صالح‌پورجم و همکاران ۲۰۲۱؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ کریمی سنگچینی و همکاران ۲۰۱۶) و مدل‌های تجربی مانند حائری-سمیعی (آرمین و همکاران ۲۰۱۹؛ سرفراز و همکاران ۲۰۲۱) نیز وزن بیش‌تری برای رده‌های با فاصله‌ی کم‌تر از این عارضه‌ی خطی در نظر گرفتند، که با نتیجه‌ی این تحقیق همخوانی دارد.

برای عامل کاربری زمین، بیش‌ترین نسبت فراوانی در رده‌ی زراعت دیم بود. دلیل آن شخم‌خوردن این محدوده‌ها و نفوذکردن بیش‌تر آب باران به درون توده‌ی خاک، و ازسوی دیگر، بودن زمین دیم در محدوده‌ی واحدهای سنگ‌شناسی حساس‌تر است.

برپایه‌ی دیدگاه نظری، وجود عامل‌های خطی فاصله از آبراه و جاده باعث برداشته‌شدن پای دامنه و در نتیجه کاهش مقاومت مواد دامنه‌یی در برابر تنش‌های برشی می‌شود، ولی جدول ۲ نشان می‌دهد که رابطه‌ی خاصی میان اندازه‌های نسبت فراوانی و اندازه‌ی فاصله از آن‌ها نیست؛ بنابراین نقش این عامل‌ها از دیگر عامل‌های مستعدکننده تأثیر گرفته است. دیگر پژوهشگران نیز (یالسن و همکاران ۲۰۱۱؛ برومندی و همکاران ۲۰۱۵؛ کومار و آنبالاگان ۲۰۱۶) نقش عامل‌های کلیدی سنگ‌شناسی، شیب و کاربری زمین را از عامل‌هایی مانند بلندی، بارش و فاصله از آبراه و جاده مهم‌تر ارزیابی کردند.

نتیجه‌گیری

به‌دلیل زیان‌های ناشی از روی‌داد زمین‌لغزش لازم است که در منطقه‌های حساس، نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت روی‌داد زمین‌لغزش با روش مناسبی تهیه شود، که از

آن برای رده‌های خطر از ۱ (خیلی کم) تا ۵ (خیلی زیاد) است، و بیانگر آن است که نقشه‌ی خطر مدل برتر (گامای ۰/۹۶) به‌درستی رده‌بندی شد. پژوهش‌های پیشین نیز به نتیجه‌ی یکسانی از دقت بیش‌تر اندازه‌های زیادتر گاما مانند ۰/۹۷۵ (مرادی و همکاران ۲۰۱۰؛ لی ۲۰۰۷؛ وخشوری و زارع ۲۰۱۶؛ هینوتولی و همکاران ۲۰۱۷)، ۰/۹۴ (تنگستانی ۲۰۰۴)، ۰/۹ (صفاری و همکاران ۲۰۱۵)، و ۰/۷ (متکان و همکاران ۲۰۰۹؛ متولی و اسماعیلی ۲۰۱۳؛ مصفايي و همکاران ۲۰۲۰) در عمل‌گره‌های گامای فازی دست یافتند.

در این پژوهش برای سنجش اندازه‌ی اهمیت هر رده‌ی عامل‌های مؤثر، ابتدا مساحت و درصد زمین‌لغزش در هر رده از نقشه‌ی عامل‌های مؤثر مشخص، و اندازه‌ی اهمیت با رابطه‌ی نسبت فراوانی محاسبه شد. دامنه‌ی شماره‌های ستون نسبت فراوانی و عضویت فازی برای عامل‌های گوناگون مؤثر در زمین‌لغزش (جدول ۲) بیانگر آن است که بیش‌ترین نسبت فراوانی لغزش‌های منطقه در رده‌های شیب ۱۵° تا ۲۵°، جهت شیب شمال غربی، بلندی ۱۱۵۰ تا ۱۶۰۰ متر، بارش ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی بارش روزانه‌ی ۵۲ تا ۵۷ میلی‌متر، شتاب زمین‌لرزه‌ی ۰/۲۴۸ تا ۰/۲۶۳، فاصله‌ی ۰ تا ۲۵۰ متر از گسل، فاصله‌ی ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر از آبراه، فاصله‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ متر از جاده، کاربری زراعت دیم، و واحدهای سنگ‌شناسی رده‌ی ۳ (حساسیت متوسط) بود، و بنابراین وزن این رده‌ها در تهیه‌ی نقشه‌های خطر بیش‌ترین است.

نسبت‌های فراوانی (جدول ۲) نشان می‌دهد که اهمیت و وزن جهت‌های شیب شمالی و شرقی بیش‌تر از شیب‌های جنوبی و غربی است، و تراکم لغزش در جهت‌های شمالی و شرقی زیادتر است. این یافته به‌دلیل اندازه‌ی رطوبت بیش‌تر ناشی از زاویه‌ی تابش آفتاب به دامنه‌های شمالی و شرقی است؛ افزون بر این، زمان ماندگاری برف که باعث افزایش نفوذ روان‌آب آن به مواد دامنه‌یی می‌شود نیز در شیب‌های شمالی و شرقی بیش‌تر از شیب‌های جنوبی و غربی است. تأثیر بیش‌تر جهت‌های شیب شمالی و شرقی بر روی‌داد زمین‌لغزش نسبت به جهت‌های جنوبی و غربی در پژوهش‌های گذشته نیز به اثبات رسید (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳).

به‌طورکلی با افزایش اندازه‌ی شیب، روند وزن رده‌ها نیز افزایشی بود. این یافته به‌دلیل افزایش تنش برشی مواد دامنه‌یی در شیب‌های تندتر است. کلک (۲۰۲۰) نیز در بررسی رابطه‌ی شیب و زمین‌لغزش به رابطه‌ی تنش برشی و اندازه‌ی شیب پرداخت و افزایش زمین‌لغزش در شیب‌های بیش‌تر را به این دلیل نسبت داد.

منطقه‌های در رده‌های خطر زیاد و بسیار زیاد را پیش از اجرا شدن طرح‌های توسعه‌یی با دقت بررسی کنند تا شرایط و اندازه‌ی ناپایداری آن‌ها با دقت بیش‌تری تحلیل شود.

سیاس‌گذاری

این پژوهش در قالب پروژه‌ی تحقیقاتی ۱۵۸-۹۷۰-۰۰۸-۲۹-۲۹-۰۴، پژوهش‌شکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری با اعتبار مالی اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین به انجام رسید. نگارندگان بدین‌وسیله از همه‌ی دست‌اندرکاران، به‌ویژه از پشتیبانی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین صمیمانه قدردانی می‌کنند.

ابزارهای پایه‌یی مدیریت و کاهش زیان‌های احتمالی آن است. در این پژوهش نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به روی‌داد زمین‌لغزش برای آبخیز قزل‌اوزن استان قزوین با عمل‌گرهای گامای فازی تهیه و ارزیابی شد. نتیجه‌ی این تحقیق نشان داد که عمل‌گرهای فازی گاما به دلیل کاربرد منطق فازی، محدودیت‌های عمل‌گرهای جمع و ضرب جبری لایه‌ها را ندارد، و دقت آن از مدل تلفیق‌تنها-جمع یا ضرب فازی بسیار بیش‌تر است.

نقشه‌ی حساسیت به زمین‌لغزش به‌دست‌آمده از این پژوهش اطلاعات مناسبی در شناخت منطقه‌های مستعد زمین‌لغزش به طراحان، مدیران، سیاست‌گزاران، و مهندسان می‌دهد، که می‌توانند به کمک آن، کنش‌های گوناگونی برای کاهش‌دادن احتمال خطر زمین‌لغزش تدوین کنند. باین‌حال، زمین‌شناسان مهندسی باید

فهرست منابع

- Abay A, Barbieri G, Woldearegay K. 2019. GIS-based landslide susceptibility evaluation using analytical hierarchy process (AHP) approach: The case of Tarmaberdistrict, Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*, 11 (1): 14-36.
- Althuwaynee OFB, Pradhan HJ, Park Lee JH. 2014. A novel ensemble decision tree-based Chi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11 (6):1063-1078.
- Armin M, Mosaffaie J, Ghorbannia Kheybari V, Khairi A. 2019. Landslide zoning and its risk management plan in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province using Haeri-Sami model. *Quantitative Geomorphological Research*, 7 (4): 176-196. (In Persian).
- Berberian M, Ghorashi M, Arzhangraves B, Mohajer A. 1993. Seismotectonic and earthquake-fault hazard investigations in the great Qazvin region. *Geologic Survey of Iran, Report, No. 61*. pp. 152-197.
- Boroumandi M, Khomehchiyan M, Nikou-del MR. 2015. Using of analytic hierarchy process for landslide hazard zonation in Zanjan province, Iran. In: *Engineering geology for society and territory - volume 2*, Iollino G, Giordan D, Crosta GB, et al. (eds). Springer International Publishing, Cham. pp. 951-955.
- Bui DT, Pradhan B, Revhaug I, Nguyen DB, Pham HV, Bui QN. 2015. A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Lang Son city area (Vietnam). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6 (3): 243-271.
- Caniani D, Pascale S, Sado F, Sole A. 2008. Neural networks and landslide susceptibility: A case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards*, 45 (1): 55-72.
- Catani F, Lagomarsino D, Segoni S, Tofani V. 2013. Landslide susceptibility estimation

- tion by random forests technique: Sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards Earth System Science*, No.13, pp. 2815–2831.
- Çellek S. 2020. Effect of the slope angle and its classification on landslide. *Natural Hazards Earth System Science*. Discuss, pp. 1–23.
- Chen W, Li X, Wang Y, Chen G, Liu S. 2014. Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges. *China Remote Sensing of Environment* No.152, pp. 291–301.
- Conforti M, Pascale S, Robustelli G, Sdao F. 2014. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River Catchment (northern Calabria, Italy). *Catena*, No.113, pp. 236–250.
- Dou J, Yamagishi H, Pourghasemi HR, Yunus AP, Song X, Xu Y, Zhu Z. 2015. An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. *Natural Hazards*, 78 (3): 1749–1776.
- Gee MD. 1992. Classification of landslides hazard zonation methods and a test of predictive capability. In: Bell, Davi, H. (eds.), *Proceedings 6th International Symposium on Landslide*, pp. 48–56.
- Hasekio gullari GD, Ercanoglu M. 2012. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: A case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, 63 (2): 1157–1179.
- He H, Hu D, Sun Q, Zhe L, Liu Y. 2019. A landslide susceptibility assessment method based on GIS technology and an AHP-weighted information content method: A case study of Southern Anhui, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8 (6): 266. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060266>
- Hinotoli Sema V, Balamurugan G, Ramesh V. 2017. Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. *Model. Modeling Earth Systems and Environment*, 3 (8): 499–514.
- Joybari J, Kavian A, Mosaffaei J. 2016. The effect of precipitation characteristics on spatial and temporal variations of Tavan landslide movement. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(4): 75–86. (In Persian).
- Joybari J, Kavian AA, Mosaffaie J. 2017. Effect of land use on landslide movement in the Tavan district, Qazvin. *Watershed Management Researches Journal*, 30(3): 29–39. (In Persian).
- Karimi Sangchini E, Emami SN, Tahmasebipour N, Pourghasemi HR, Naghibi SA, Arami SA, Pradhan B. 2016. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharma-hal-e-Bakhtiari Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (1): 1–15.
- Kumar R, Anbalagan R. 2016. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri Reservoir Rim Region, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India*, 87 (3): 271–286.
- Lee S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52 (4): 615–623.
- Morady HR, Pourghasemi HR, Mohammdi M, Mahdavi MR. 2010. Landslide hazard zoning using Gamma fuzzy operator, with a case study of Haraz watershed. *Environmental Sciences*, 7 (4): 129–142. (In Persian).
- Mosaffaie J, Salehpour Jam A, Sarfaraz F, Shadfar S. 2020. Evaluation of landslide

- susceptibility zonation applying fuzzy Gamma operators in Taleghanroud Watershed of Qazvin Province. *Geography and Sustainability of Environment*, 10(3): 71–90. (In Persian).
- Mosaffaie J, Ownegh M. 2011. Landslide hazard zonation by AHP and regression model, Case study: Alamout Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 3 (3): 149–158. (In Persian).
- Mosaffaie J, Ekhtesasi MR, Salehpour Jam A. 2018. Comparison of the existing and RS geological maps (Case study: Vartavan Catchment). *Journal of Range and Watershed Management*, 70 (4): 1005–1013. (In Persian).
- Mosaffaie J, Ownegh M. 2009. GIS an efficient tool for identifying policies and programs of landslide hazard management. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 16 (2) 303–314. (In Persian).
- Mosaffaie J, Ownegh M, Mesdaghi M, Shariat Jafari M. 2009. Comparing the efficiency of statistical and empirical landslide hazard zonation models in Alamout watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 16 (4): 43–61. (In Persian).
- Mosaffaie J, Salehpour Jam A, Tabatabaei MR. 2017. Comparing the efficiency of sediment rating curve and ANN models in estimating River Bed-load. *Geography and Sustainability of Environment*, 7 (3): 33–44. (In Persian).
- Motevalli S, Esmaili R. 2013. Landslide hazard zoning using gamma fuzzy operator (A case study: Talegha Watershed). *Environmental Erosion Researches*. 2 (8): 1–20. (In Persian).
- Motkan AA, Samia J, Pourali SH, Safae M. 2009. Fuzzy logic models and RS for landslide hazard zonation in Lajim watershed. *Journal of Geotechnical Geology*, 5 (4): 318–325. (In Persian).
- Mousavi Bafrouei SH, Mirzaei N, Shabani E, Eskandari-Ghadi M. 2014. Seismic hazard zoning in Iran and estimating peak ground acceleration in provincial capitals. *Journal of Earth and Space Physics*, 40 (4): 15–38. (In Persian).
- Nguyen TTN, Liu CC. 2019. A new approach using ahp to generate landslide susceptibility maps in the Chen-yu-lan Watershed, Taiwan. *Sensors*, 19 (3): 1–18.
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Fatemi Aghda SM. 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural Hazards*, 69 (1): 749–779.
- Pradhan B, Lee S. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor elect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. *Environ. Model. Softw*, 25 (6): 747–759.
- Rashvand S, Mosaffaie J. 2013. Investigation of human population pressure on environment, case study: Masile Basin of Qazvin. *Human and Environment*, 11(25): 41–55. (In Persian).
- Rashvand S, Mosaffaie J, Darvish M, Rafiei Emam A. 2013. Investigation on potential of desertification in terms of decay of vegetation. Case study: rude shoor, Qazvin. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 20 (1): 38–49. (In Persian).
- Safari A, Rayati Shavvazi M, Jan Ahmadi M, Shirzad Malayeri I. 2015. Landslide hazard zonation using the Frequency ratio model and fuzzy logic (Case study: Central Section of Jam Township). *Journal of National Geography*, 8(30): 15–30. (In Persian).
- Salehpour Jam A, Mosaffaie J, Sarfaraz F, Shadfar S, Akhtari R. 2021. GIS-based

- landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Natural Hazards*, 108 (1):1025–1046.
- Salehpour Jam A, Peyrowan H, Tabatabaei MR, Sarreshtehdari A, Mosaffaie J. 2019. An assessment of the land degradation potential using the TOPSIS method (Case study: Rangelands overlooking the city of Eshtehard, the province of Alborz). *Watershed Management Journal*, 32 (4): 72–93. (In Persian).
- Salehpour Jam A, Mosaffaie J, Tabatabaei MR. 2019. Investigation of pedological criterion affecting on desertification in alluvial fans using nonparametric tests, case study: South of Rude-Shoor watershed area. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (3): 1–14. (In Persian).
- Salehpour Jam A, Tabatabaei MR, Sarreshtehdari A, Mosaffaie J. 2019. Investigation of drought characteristics in north-west of Iran using Deciles Index. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10 (4): 552–563. (In Persian).
- Sarfaraz F, Mosaffaie J, Akhtari R, Salehpour Jam A. 2021. Evaluation of the efficiency of Haeri-Audio experimental model and bivariate statistical in landslide risk zoning (Case study: Qazvin Province). *Natural Geography*, 14 (52): 99–118. (In Persian).
- Shariat Jafari M. 2008. Landslide specific risk assessment on part of southern Alborz, Iran. *Engineering Geology*, 1 (3): 1–14. (In Persian).
- Shoaei Z. 2016. Landslides (Recognition, Assessment and Mitigation), Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 617 p. (In Persian).
- Stanley T, Kirschbaum DB. 2017. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 87 (1): 145–164.
- Tangeštani MH. 2004. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan Catchment area, southwest Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 51 (3): 439–450.
- Vakhshoori V, Zare M. 2016. Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7 (5): 1731–1752.
- Yalcin A, Reis S, Aydinoglu AC, Yomralioglu T. 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85 (3): 274–287.
- Yoshimatsu H, Abe S. 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchical process (AHP) method. *Landslides*, 3 (2) 149–158.
- Youssef AM, Pourghasemi HR, Pourtaghi ZS, Al-Katheeri MM. 2015. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13 (5): 839–856.



Determining the Best Fuzzy Gamma Coefficient and Landslide Hazard Zoning in Qezelozan Watershed

Jamal Mosaffaie

(Corresponding Author)* Associate Professor of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Amin Salehpour Jam

Associate Professor of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Corresponding Author's Email: jamalmosaffaie@gmail.com

Received: 16 November 2021

Accepted: 29 January 2022

Abstract

Landslide is one of the most destructive types of erosion on slopes, which causes a lot of financial and human losses. Identifying the effective factors in landslide occurrence and preparing a landslide hazard zonation map is one of the basic tools to manage and reduce potential damage. The purpose of this study is to evaluate the efficiency of fuzzy gamma operators and landslide hazard zonation in the Qezelozan watershed of Qazvin province. The landslide inventory map and also 11 effective factors including slope, slope direction, altitude, land use, lithology, distance to road, distance to stream, distance to fault, earthquake acceleration, precipitation, and maximum daily precipitation were first prepared. Then, the values of frequency ratio and fuzzy membership were calculated for each class of effective factors. In the next step, the landslide susceptibility maps were produced using fuzzy gamma operators. A total of 17 landslides were identified, 70% (11 landslides with an area of 153 hectares) of which were used to model and 30% (6 landslides with an area of 60 hectares) of which were used to evaluate the results of the models. The evaluation process using Density Ratio and Sum of Quality indices showed that the gamma of 0.96 has higher accuracy than other gamma values in the study area. The landslide hazard zoning map of the superior model will be useful in land use planning and reducing the landslide risk of the region.

■ **Keywords:** frequency ratio, fuzzy logic, hazard zonation, landslide susceptibility, Qezelozan watershed ■