پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال چهارم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹٤
صص. ۲۰-۱

ارزیابی دقت روش‌های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز طالقان

صدرالدین متولی*– استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور
محمدمهدی حسین زاده– دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی
رضا اسماعیلی – استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه مازندران
خه‌بات درفشی– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۵/۱۱

چکیده

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و بالقوه خطر (از هیچ یا بسیار زیاد) تقسیم می‌کند. این فرآیند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل-سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای و محلی محسوب گردد. این پژوهش به ارزیابی میزان دقت روش‌های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) جهت تعیین مناسب‌ترین روش برای تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان پرداخت. فاکتورهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، تراکم آبراهه، جاده، گسل و بارش به عنوان پارامترهای مؤثر بر وقوع پهنه‌های لغزشی، متغیرهای مستقل پژوهش را تشکیل دادند. پهنه‌های لغزشی هم متغیر وابسته در اجرای مدل‌های ذکر شده بودند. مقدار شاخص مجموع کیفیت (Qs) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد، در روش رگرسیون لجستیک ۰/۲٦ محاسبه شده است که مطلوبیت و صحت بیش‌تر استفاده از این روش را در پهنه‌بندی خطر سطح-های لغزشی حوضه آبخیز مورد بررسی نشان می‌دهد. پس از آن، روش گامای فازی ۰/۷ با مجموع کیفیت ۰/۲۵ در درجه‌ی دوم مطلوبیت و صحت قرار دارد. مقدار Qs روش‌های رگرسیون چند متغیره، گامای فازی ۰/۸، گامای فازی ۰/۹ و تحلیل سلسله مراتبی بترتیب ۰/۲٤، ۰/۲۳، ۰/۲۲ و ۰/۱٦ بدست آمده است که بیانگر صحت کم‌تر آن‌ها نسبت به رگرسیون لجستیک می‌باشد. در مورد شاخص دقت پیش‌بینی خطر (P) هم مشاهده می‌شود که رگرسیون لجستیک با مقدار ۰/۲۲، تفکیک‌پذیری یکسان‌تر و مناسب‌تری از پهنه‌های خطر را نسبت به دیگر روش‌ها مورد استفاده تأیید می‌کند. مقدار این شاخص برای روش‌های گامای فازی ۰/۷ و رگرسیون چند متغیره، که دارای مجموع کیفیت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها بودند، ۰/۱۸ برآورد شده است که نشان از تفکیک-پذیری مناسب و یکسان پهنه‌های خطر لغزش در این دو روش دارد. دقت روش محاسبه شده برای گامای فازی ۰/۸ و ۰/۹ نیز ۰/۱۸ است.

واژگان کلیدی: صحت‌سنجی، رگرسیون لجستیک و چند متغیره، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی، حوضه آبخیز طالقان

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۱۲۱۲۲۱۶ E-mail: sadr_m1970@yahoo.com

۱.مقدمه

رشد سریع جمعیت، گسترش سکونتگاه‌های انسانی در نواحی کوهستانی، مشکل بودن پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لغزش و متعدد بودن عوامل مؤثر در رویداد این پدیده، ضرورت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را آشکار می‌سازد. با استفاده از پهنه-بندی خطر رخداد زمین‌لغزش می‌توان مناطق حساس و دارای پتانسیل خطر را شناسایی نموده و با ارائه راهکارها و شیوه-های مدیریتی مناسب تا حدی از وقوع زمین‌لغزش‌ها جلوگیری و یا خسارات ناشی از آن‌ها را کاهش داد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۲؛ کورکی نژاد و همکاران، ۱۳۸۵). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر (از هیچ تا بسیار زیاد) تقسیم می‌کند (Cornforth, 2005). در مورد پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تاکنون بررسی‌های زیادی صورت گرفته است و پژوهشگران مختلف با استفاده از روش‌های گوناگون، طبقه-بندی‌های متنوع و متعددی را ارائه کرده‌اند؛ اما بسته به وضعیت موجود در منطقه مورد مطالعه، دقت و انعطاف هر یک از روش‌ها متفاوت با دیگری است (شیرانی و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین، برای شناخت مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر باید بهترین و دقیق‌ترین روش را با توجه به عوامل مؤثر در رخداد وضعیت منطقه انتخاب نمود. لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ با ارائه نظریه مجموعه‌های فازی، برای اولین بار اقدام به ارائه مبانی منطق‌های فازی چند ارزشی کرد. روش‌های مبتنی بر این نظریه همچنان در حال توسعه‌اند و هر سال با ارائه روش‌های جدیدتری بر مبنای مفاهیم نظریه مجموعه‌های فازی، این امکان فراهم می‌شود تا به استدلال‌های غیر قطعی مبهم و نامعین ذهن انسان صورت‌بندی ریاضی بخشیده شود (شریعت جعفری و حامدپناه، ۱۳۸۶).

ارزیابی کمی با استفاده از منطق فازی برای نواحی دارای استعداد زمین زمین‌لغزش (Lee و Juang، ۱۹۹۲ و Jung و همکاران، ۱۹۹۶)، استفاده از روابط فازی جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش و بکار بردن روابط فازی در تهیه نقشه‌ها به دلیل پیچیده بودن ماهیت زمین‌لغزش و دخالت عوامل متعدد در رخداد آن (Murat و Candan، ۲۰۰۳)، ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها در ریودوژانیروی برزیل با استفاده از مدل منطق فازی و وزن‌دهی عوامل مختلف با نظرات کارشناسی بین صفر تا یک طبقات (Sabuya و همکاران، ۲۰۰۶) و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی بکار گرفتن مجموعه‌های فازی برای بر طرف نمودن محدودیت روش‌های کمی (Gorsevski و همکاران، ۲۰۰۶) از جمله پیشینه‌های پژوهشی مرتبط با منطق فازی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در جهان می‌باشند.

استفاده از اپراتورهای منطق فازی برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه آبخیز چالکرود و ارزیابی صحت نقشه‌ها با نمایه جمع کیفی (Qs)[1] (شادفر، ۱۳۸۴)، ارزیابی کارایی اپراتورهای منطق فازی در تعیین زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرود و تعیین اپراتور فازی گامای ۰/۸ به عنوان مناسب‌ترین اپراتور در تعیین خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز مورد مطالعه (عبادتی‌نژاد و همکاران ۱۳۸۶)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز لاجیم با استفاده از مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور و تعیین مدل گامای ۰/۷ فازی و مدل میانگین وزنی مرتب شده فازی به عنوان مناسب‌ترین مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد بررسی به‌دلیل کم‌ترین تغییرپذیری و انحراف از معیار در مدل‌سازی (متکان و همکاران، ۱۳۸۸)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی : حوضه آبخیز هراز) و تعیین سطح همبستگی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و نقاط لغزشی با بکار گیری مدل نسبت فراوانی (Dr)[2] و سپس مقادیر فازی با نظرات کارشناسی و تعیین توابع عضویت برای هر یک از عوامل مؤثر (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹) و بالاخره کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام با استفاده از تئوری منطق فازی و شاخص نسب دانسیته (Dr)[3] همراه با تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش و نشان دادن مطلوبیت بیش‌تر اپراتور گاما به

---

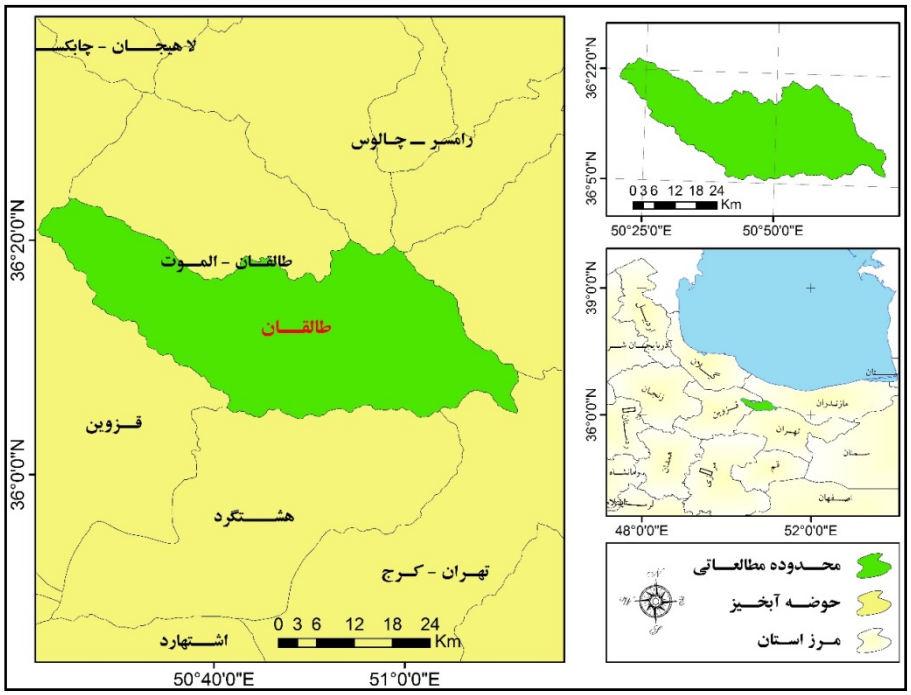
[1]. Quality Sum
[2]. Frequency Ratio
[3]. Density Ratio

لحاظ تفکیک مناسب طبقات خطر زمین‌لغزش نسبت به دیگر اپراتورهای فازی (نادری، ۱۳۹۱) از جمله پژوهش‌های داخلی مرتبط با موضوع مورد مطالعه در بررسی حاضر می‌باشند.

با توجه به آنچه گفته شد، بررسی علمی پدیده زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک آن، از یک سو به‌منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش در محدوده فعالیت‌های بشری حائز اهمیت بوده و از سوی دیگر جهت شناسایی مکان‌های امن برای توسعه زیستگاه‌های جدید و یا سایر کاربری‌های انسانی نظیر راه‌ها، مسیر انتقال نیرو و انرژی، نیروگاه‌ها و ... در مقیاس‌های مختلف مورد توجه برنامه‌ریزان قرار دارد (Naderi, et al., 2010). پژوهش حاضر بر آن است تا ضمن پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان، به ارزیابی میزان دقت روش‌های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) جهت تعیین مناسب‌ترین روش برای تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی می‌پردازد.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان با مساحتی معادل ۱۳۲۶ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های مهم سفید رود به‌شمار می‌رود که در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و در بخش شمال غربی تهران و به فاصله‌ی ۱۲۰ کیلومتری از این شهر واقع شده است. موقعیت جغرافیایی حوضه بین ′۵ °۳۶ تا ′۲۳ °۳۶ عرض شمالی و ′۲۱ °۵۰ تا ′۱ °۵۱ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع متوسط حوضه ۲۷۴۰ متر ازسطح دریا (ارتفاع حداکثر ۴۴۰۰ و حداقل ۱۰۸۰ متر) می‌باشد. بر مبنای دوره آماری ۱۰ ساله داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک کرج و هشتگرد و ایستگاه باران‌سنجی جزنیان، میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز طالقان ۵۱۵/۱۶ میلیمتر و دمای سالانه آن نیز ۱۰/۵ درجه سانتیگراد است (سازمان هواشناسی استان تهران). حوضه آبخیز طالقان جزء پهنه رسوبی – ساختمانی ایران میانی و به طور دقیق‌تر زیر پهنه البرز است. در این منطقه، رسوبات آبرفتی دوره کواترنری و نهشته‌های سیلتستونی و گل‌سنگی قرمز رنگ با عدسی‌های رسی اواخر ترشیاری بیش‌ترین رخنمون را دارند. به نظر می‌رسد زمین‌ساخت فعال ناحیه‌ای و فرآیندهای مرتبط با آن، شیب هیدرولیکی و حرکت آب-های سطحی از شمال و جنوب به سمت مرکز منطقه، بالا بودن سطح آب زیرزمینی (با نشانه‌هایی چون انواع چشمه، تالاب‌های رسوبی و نشست آب)، شیب تند و دامنه‌های متشکل از رسوبات عمدتاً مارنی، گل‌سنگی و سیلتستونی، عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان هستند.

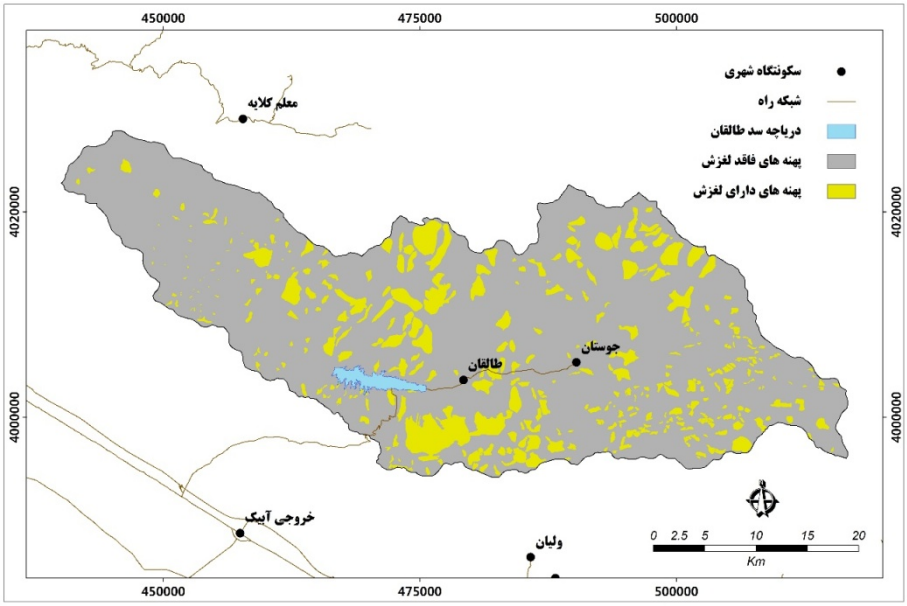


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز طالقان

۳. روش پژوهش

۳-۱ تهیه نقشه متغیرهای مؤثر، نسبت فراوانی

انجام پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های خطر در این پژوهش، بر مبنای تلفیق زمین‌لغزش‌های منطقه با معیارهای دخیل در زمین‌لغزش‌ها می‌باشد که در اینجا به نحوه تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها اشاره می‌شود. در ابتدا داده‌های پراکنش رخدادهای زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه، به صورت نقطه‌ای از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه گردید؛ سپس این لایه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا و نیز Google Earth و همچنین نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی ورقه‌های شکران، قزوین و مرزن‌آباد به پهنه‌های لغزشی تبدیل شد؛ یعنی با تعیین پراکنش موقعیت نقطه‌ای زمین‌لغزش‌ها بر روی منابع اطلاعاتی ذکر شده از منطقه، برمبنای این موقعیت و محدوده مکانی زمین لغزش اتفاق اقتاده و هم‌چنین ویژگی‌های ظاهری آن (محل بریدگی، مقدار توده افتاده، میزان جابجایی سطحی خاک و ...)، لایه‌ی نقطه‌ای به لایه‌ی سطح یا پهنه‌ای زمین لغزش‌ها تبدیل گردید. لایه‌ی بدست آمده از پهنه-های زمین‌لغزش به‌عنوان مهم‌ترین لایه مورد استفاده در پژوهش حاضر، متغیر وابسته در اجرای مدل‌های پهنه‌بندی می‌باشد. پراکنش رویدادهای زمین لغزش منطقه مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه پراکنش پهنه‌های لغزش حوضه آبخیز طالقان

در ادامه، پارامترهای مؤثر بر وقوع پهنه‌های لغزشی در حوضه آبخیز طالقان شناسایی شدند. لایه‌های ارتفاع، شیب و جهت شیب از مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM)[1] با اندازه سلول‌های ۱۰ متری استخراج گردیدند. جهت تهیه متغیر پوشش گیاهی حوضه آبخیز طالقان از شاخص تراکم پوشش گیاهی NDVI و تصویر ماهواره‌ای لندست ETM سال ۲۰۱۰ استفاده شد. در ارتباط با لایه‌های جاده و گسل باید گفت چون این لایه‌ها به‌صورت خطی هستند، جهت آماده-سازی آن‌ها از تابع Distance بر مبنای حداکثر فاصله استفاده شد. با این تابع لایه‌های رستری‌ای به‌دست آمد که فاصله از هر کدام از متغیرها را تا مرز محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. جهت استفاده از لایه آبراهه، از تراکم آبراهه (بر حسب طول به متر) در واحد سطح (بر حسب مساحت به کیلومتر مربع) استفاده گردید. با استفاده از تابع Density این لایه به‌صورت رستری درآمده که تراکم آبراهه را در واحد سطح نشان داد. پس از آماده شدن لایه‌های عامل (شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و تراکم آبراهه)، این لایه‌ها به عنوان متغیرهای مؤثر با لایه‌ی پهنه‌های زمین‌لغزش با همه لایه‌های آماده شده تلفیق شدند. تلفیق یا هم‌پوشانی لایه‌ها با استفاده از تابع ضرب در تحلیل‌گر رستری[2] محیط ArcMap انجام گرفت. به این ترتیب، تعداد پیکسل‌های لغزشی در هر طبقه از هر کدام از عوامل مؤثر مورد استفاده در این پژوهش بدست آمد. در مرحله بعد با استفاده از مدل نسبت فراوانی، وزن نسبی هر یک از عوامل و طبقات مرتبط با آن از رابطه ۱ محاسبه گردید (Lee, 2007). این وزن هر یک از طبقات، همان مقدار وزن نسبی محاسبه شده برای هر طبقه از هر متغیر به عنوان میزان نقش آن طبقه در رخدادهای لغزشی حوضه آبخیز مورد مطالعه است.

رابطه ۱) $$FR=A/B$$

که در آن A درصد پیکسل‌های لغزشی، B درصد پیکسل‌های فاقد لغزش و FR نسبت فراوانی است. در انتهای این بحث لازم به ذکر می‌باشد که تحلیل رستری همه متغیرهای مورد استفاده در قالب شبکه سلول‌های با ابعاد ۱۰ متری انجام گرفت.

---

[1]. Digital Elevation Model
[2]. Raster Analyst

۳-۲ تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر

۳-۲-۱ رگرسیون لجستیک (LR)

این مدل که مدل تحلیلی چند متغیره از گروه مدل‌های آماری خطی تعمیم یافته است، جهت تحلیل حضور یا عدم حضور یک ویژگی یا خروجی برمبنای ارزش‌های مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل مفید است. هدف اصلی از رگرسیون لجستیک، مدل‌سازی احتمال وقوع یک رویداد دو حالتی متداول، حضور و عدم حضور عوامل مختلف و معنی‌داری این حضور یا عدم حضور است. مزیت مدل‌سازی با رگرسیون لجستیک نسبت به سایر تکنیک‌های آماری چند متغیره مانند تحلیل رگرسیون چند متغیره و تحلیل تشخیص آن است که متغیر وابسته می‌تواند تنها دو مقدار داشته باشد که یکی احتمال وقوع حادثه و دیگری عدم وقوع آن است. در پژوهش حاضر، از مدل رگرسیون لجستیک به‌منظور تحلیل ارتباط فضایی بین رخداد زمین‌لغزش و عوامل مؤثر در این رویداد استفاده می‌شود؛ که هدف اصلی از اجرای آن یافتن بهترین مدل برای تشریح روابط میان حضور و یا عدم حضور متغیر وابسته (زمین‌لغزش) و مجموعه گروه‌هایی از متغیرهای مستقل در رویداد زمین لغزش است. شکل عمومی معادله رگرسیون لجستیک به صورت رابطه ۲ است.

رابطه ۲) $P= 1/(1+e^{(-z)})$

در این معادله P احتمال رویداد حادثه (در این پژوهش زمین لغزش) و z پارامتر یا فاکتور خطی است و از رابطه ۳ بدست می‌آید؛ e نیز عدد ثابت ۲/۷۱۸ می‌باشد.

رابطه ۳) $z=\log[it(p)=Ln(p/(1-p))] = C_0 + C_1X_1 + \ldots + C_nX_n$

که C_0 عرض از مبدأ یا ضریب ثابت مدل، و $X_1, X_2, \ldots . X_n$ ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل $C_1, C_2 \ldots .C_n$ هستند. با تغییر مقدار z از $\infty -$ تا $+\infty$ احتمال وقوع زمین لغزش (P) به صورت s از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند که هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع زمین لغزش بیش‌تر و هرچه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع آن کم‌تر خواهد بود.

۳-۲-۲ رگرسیون چند متغیره (MR)

به منظور انجام رگرسیون چند متغیره بین عوامل مؤثر، پس از بدست آوردن وزن‌های اولیه طبقات مختلف هر یک از عوامل مستقل، اطلاعات به محیط SPSS وارد شدند. بنابراین، طبقات عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش به عنوان متغیرهای مستقل و عامل سطح زمین‌لغزش در هر طبقه به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. در انتخاب روش رگرسیون چند متغیره، از روش گام به گام استفاده شد که نتایج حاصل از اعمال این روش با درصد اطمینان بیش از ۹۵ درصد تعیین گردید.

۳-۲-۳ تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی سیستم‌ها بر پایه مقایسه زوجی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها استوار بوده که با استفاده از نرم‌افزار Expert choice ابتدا با وزن‌دهی به تک تک عوامل مؤثر در نظر گرفته شده است. برای تعیین وزن معیار متغیرها در مقایسات زوجی، ابتدا ماتریسی به ابعاد ۹ × ۹ تشکیل شد. سپس با استفاده از میانگین نظرات کارشناسی، سطح اول این ماتریس تکمیل شد تا سطح دوم آن نیز محاسبه شود؛ ماتریس سطح اول و دوم متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز طالقان در جدول ۱ آورده شده است. پس از تشکیل اولویت‌بندی، برای بی‌بعد کردن داده‌ها و بدست آوردن وزن پارامترها از روش میانگین حسابی (یکی از روش‌های تقریبی) استفاده می‌شود. بدین‌منظور، ابتدا جمع مقادیر هر یک از ستون‌ها بدست می‌آید، و سپس نسبت مقادیر هر پارامتر محاسبه می‌شود. در مرحله بعد میانگین

مقادیر عناصر در هر سطر محاسبه می‌گردد تا وزن پارامتری که در آن سطر قرار دارد، بدست آید. بنابراین مراحل محاسبه وزن معیار پارامترها با روش AHP در سه مرحله انجام گرفت: ۱) برای مقایسه دو به دو پارامترها و تعیین اولویت، ابتدا پارامترها با هم مقایسه شدند و ارزش‌های مربوط به هر ستون از ماتریس مقایسه، دو به دو با هم جمع شدند؛ ۲) هر عنصر ماتریس بر مقدار کل ستون آن تقسیم گردید (از ماتریس حاصله با عنوان ماتریس استاندارد شده نام برده می‌شود) و ۳) میانگین عناصر مطرح در هر ردیف از ماتریس استاندارد محاسبه شد. این میانگین‌های تخمینی از وزن‌های نسبی معیارهای مورد مقایسه بدست می‌آیند. با استفاده از این روش، وزن‌ها به منزله میانگین از تمامی راه‌های ممکن از مقایسه‌ی معیارها تلقی می‌شوند.

جدول ۱. ماتریس محاسبه وزن عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش حوضه طالقان در روش AHP

پارامتر	زمین‌شناسی	شیب	فاصله از جاده	کاربری اراضی	تراکم آبراهه	فاصله از گسل	تراکم پوشش گیاهی	جهت شیب	ارتفاع
زمین‌شناسی	۱	۳.۰۷	۳.۱	۴.۰۳	۴.۲۵	۵.۵	۶.۱	۷	۸.۶۷
شیب	۰.۳۳	۱	۲.۵	۲.۹	۳.۱۲	۳.۸۸	۴	۵	۶.۶۹
فاصله از جاده	۰.۳۲	۰.۴	۱	۲.۳۶	۲.۷۵	۳.۴۵	۳.۹	۴.۳۳	۶.۶
کاربری اراضی	۰.۲۵	۰.۳۴	۰.۴۲	۱	۱.۵	۲.۳	۲.۶۴	۳.۶۷	۵.۶۷
تراکم آبراهه	۰.۲۴	۰.۳۲	۰.۳۶	۰.۶۷	۱	۱.۶۵۵	۲.۲۱	۳	۵.۵
فاصله از گسل	۰.۱۸	۰.۲۶	۰.۲۹	۰.۴۳	۰.۶۰	۱	۱.۷۵	۱.۸۵۵	۵.۳۳
تراکم پوشش گیاهی	۰.۱۶	۰.۲۵	۰.۲۶	۰.۳۸	۰.۴۵	۰.۵۷	۱	۱.۳	۴.۳۱
جهت شیب	۰.۱۴	۰.۲۰	۰.۲۳	۰.۲۷	۰.۳۳	۰.۵۴	۰.۷۷	۱	۴
ارتفاع	۰.۱۲	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۸	۰.۱۸	۰.۱۹	۰.۲۳	۰.۲۵	۱

۳-۲-٤ منطق فازی (FL)

اپراتور فازی گاما، حالت کلی روابط اپراتورهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما، پارامترهای کاهشی و افزایشی را همزمان تلفیق نموده، به مقادیری در خروجی دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایشات افزایشی و کاهشی دو اپراتور ضرب و جمع فازی باشد. برای تعدیل حساسیت خیلی بالای اپراتور ضرب فازی و حساسیت خیلی کم اپراتور جمع فازی، اپراتور گامای فازی[1] معرفی شده است که حد فاصل ضرب و جمع جبری فازی می‌باشد. این اپراتور بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه (۳-۸) تعریف می‌شود.

رابطه ٤)

$$\mu_{comb}$$

که در آن $\mu_{combination}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین شده در محدوده صفر و یک است. وقتی γ برابر با ۱ باشد ترکیبی که اعمال می‌شود همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهشی ضرب جبری فازی سازگاری دارد.

[1]. Fuzzy Gamma

مقادیر پیکسل‌ها بستگی به انتخاب صحیح توان گاما دارند. مقادیری که γ می‌تواند اختیار کند از صفر تا یک بوده که معمولاً از ۰/۵ تا ۰/۹ برای آن در نظر گرفته می‌شود. همان طور که قبلاً اشاره شد γکوچک‌تر به اپراتور ضرب فازی و γبزرگ‌تر به اپراتور جمع فازی نزدیک می‌شود. بنابراین γ های بزرگ‌تر حالتی خوش‌بینانه خواهند داشت. در این پژوهش از مقادیر ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان استفاده شده است. معادله هر یک از مقادیر در نظر گرفته شده برای γ جهت تهیه لایه حاصل از گامای فازی در محیط ArcGIS به صورت رابطه‌های ۵ تا ۷ تعریف می‌گردد.

رابطه ۵)

$$\mu_{combination}(POW([Fuzzy\ Sum],0.3) * POW([Fuzzy\ Product],0.7))$$

رابطه ٦)

$$\mu_{combination}(POW([Fuzzy\ Sum],0.2) * POW([Fuzzy\ Product],0.8))$$

رابطه ۷)

$$\mu_{combination}(POW([Fuzzy\ Sum],0.1) * POW([Fuzzy\ Product],0.9))$$

۳-۳ ارزیابی دقت روش پهنه‌بندی

در این مرحله با تلاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط ArcGIS، به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) پرداخته می‌شود و مدل مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی انتخاب می‌گردد. برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از روش‌های پهنه‌بندی، نسبت تراکم (Dr) به‌کار می‌رود (Yalcin, 2008؛ Yin and Yan, 1988).

۳-۳-۱ صحت یا مجموع کیفیت (Qs)

در صورتی که در منطقه‌ای چند نقشه خطر تهیه شده باشد، با استفاده از مقدار مجموع کیفیت یا جمع کیفی می‌توان نقشه‌های با دقت بیش‌تر و صحیح‌تر را شناسایی نمود. یک نقشه خطر مناسب، نقشه‌ای می‌باشد که بهترین جدایش را بین مناطق با تراکم بالای زمین‌لغزش و مناطق با تراکم پایین زمین‌لغرش ایجاد نماید. برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکمی محاسبه گردد، که این محاسبه در قالب رابطه ۸ صورت می‌پذیرد (Gee, 1992).

رابطه ۸)

$$Dr = \frac{\frac{Si}{Ai}}{\frac{\sum_{i}^{n} Si}{\sum_{f}^{n} Ai}}$$

که در آن Si = مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده خطر؛

Ai = مساحت iامین رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی؛

و n = تعداد رده‌های خطر می‌باشد.

تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به طور صحیح تهیه شده‌اند، از رده‌های خطر کم تا رده‌های پرخطر به‌صورت صعودی است. در یک روش (نقشه) پهنه‌بندی، تراکم لغزش رده با Dr = 1 معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و رده دارای نسبت تراکمی ۲، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه است. بنابراین هرچه تفکیک بین

رده‌های خطر به‌وسیله‌ی شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش (نقشه) دارای دقت یا مطلوبیت بیش‌تری می‌باشد. مقدار مجموع کیفیت (Qs) که از طریق رابطه ۹ محاسبه می‌گردد، نشان‌دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش منطقه است.

رابطه ۹)

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

که در آن Qs = مجموع کیفیت؛

Dr = نسبت تراکم؛

S = نسبت مساحت خطر به مساحت کل منطقه و

n = تعداد کلاس خطر می‌باشد.

معمولاً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف در گستره صفر تا ۷ قرار می‌گیرد. البته از بعد نظری (تئوریک) حدی برای آن وجود ندارد. اختلاف بین مقادیر Qs، کم‌تر از ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود و مقادیر با اختلاف کم‌تر از این مقدار تقریباً یکسان لحاظ می‌گردند؛ در واقع Qs از جنس واریانس می‌باشد. انحراف مقادیر Dr از میانگین در پهنه‌های مختلف اگر به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های مختلف نزدیک به یکدیگر بوده و مقدار Qs نیز پایین می‌باشد و اگر انحراف مقادیر Dr از میانگین در پهنه‌های مختلف زیاد باشد، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها با یکدیگر تفاوت داشته و در نتیجه مقدار عددی Qs بزرگ می‌گردد. بنابراین در ارزیابی روش‌ها، هرچه مقدار مجموع کیفیت (Qs) در روشی بیش‌تر باشد، آن روش صحت یا مطلوبیت بیش‌تری در تفکیک خواهد داشت.

۳-۳-۲ دقت روش (P)

عبارت است از نسبت مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر بالا و خیلی بالا به مساحت کل آن پهنه‌ها که از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید.

رابطه ۱۰)

$$P = KS/S$$

که در آن P = دقت روش در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا؛

KS = مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا و

S = مساحت پهنه‌های خطر مرتبط است.

٤. یافته‌های پژوهش

بررسی نتایج حاصل از مقادیر عضویت فازی (نسبت فراوانی) و ارتباط بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد. با توجه به جدول، بیش‌ترین تعداد پیکسل‌های زمین-لغزش در طبقه ارتفاعی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر قرار داشته و در طبقه ۱۰۶۰ تا ۱۵۰۰ کم‌ترین درصد پیکسل‌های زمین‌لغزش وجود دارد. بر اساس وزن نسبی محاسبه شده، طبقه ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر بیش‌ترین مقدار عضویت فازی را دارا می‌باشد. در عامل شیب، بیش‌ترین مقدار عضویت فازی را طبقه شیب ۱۲ تا ۲۰ درجه و کم‌ترین مقدار را طبقه ۰ تا ۵ درجه دارد؛ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش شیب تا حد مشخصی، مقدار عضویت فازی نیز افزایش داشته، اما در شیب‌های بالای ۴۰ درجه، عضویت فازی کم شده است. بیش‌ترین تعداد پیکسل‌های دارای لغزش نیز در طبقه شیب ۲۰ تا ۳۰ درجه وجود دارد. در متغیر جهت شیب، دامنه‌های غربی با مقدار ۱ بیش‌ترین و دامنه‌های جنوب شرقی با عدد ۰/۶۷۶ کم‌ترین

مقدار عضویت فازی در وقوع زمین‌لغزش‌ها را دارا می‌باشند. بیش‌ترین وزن نسبی در عامل کاربری اراضی، برای اراضی باغی محاسبه شده است.

جدول ۲. مقادیر عضویت فازی (وزن نسبی) مربوط به هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد پیکسل لغزشی	درصد پیکسل لغزشی	تعداد پیکسل فاقد لغزش	درصد پیکسل فاقد لغزش	FR	وزن نسبی
ارتفاع (متر)	۱۵۰۰ – ۱۰۶۰	۲۴۹۸۵۸	۲۴۳۸	۰.۱۲	۲۴۷۴۲۰	۲.۱۹	۰.۰۶	۰.۰۴۴
	۲۰۰۰ – ۱۵۰۰	۲۲۵۳۵۲۰	۲۰۷۸۶۲	۱۰.۶۲	۲۰۴۵۶۵۸	۱۸.۱۰	۰.۵۹	۰.۴۵۶
	۲۵۰۰ – ۲۰۰۰	۴۵۲۴۲۸۳	۷۱۸۳۶۳	۳۶.۷۰	۳۸۰۵۹۲۰	۳۳.۶۸	۱.۰۹	۰.۸۴۷
	۳۰۰۰ – ۲۵۰۰	۳۷۷۲۸۱۰	۶۰۱۴۳۸	۳۰.۷۲	۳۱۷۱۳۷۲	۲۸.۰۶	۱.۰۹	۰.۸۵۱
	۳۵۰۰ – ۳۰۰۰	۱۸۷۴۸۹۵	۳۴۱۸۲۱	۱۷.۴۶	۱۵۳۳۰۷۴	۱۳.۵۷	۱.۲۹	۱
	٤٣٦٥ – ۳۵۰۰	۵۸۲۷۳۵	۸۵۶۵۷	۴.۳۸	۴۹۷۰۷۸	۴.۴۰	۰.۹۹	۰.۷۷۳
شیب (درجه)	۵ – ۰	۵۰۴۰۰۵	۵۰۴۹۳	۲.۵۸	۴۵۳۵۱۲	۴.۰۱	۰.۶۴	۰.۵۶۴
	۱۲ – ۵	۱۲۳۱۰۰۸	۱۸۶۵۳۶	۹.۵۳	۱۰۴۴۴۷۲	۹.۲۴	۱.۰۳	۰.۹۰۵
	۲۰ – ۱۲	۲۰۹۳۱۴۵	۳۴۴۹۳۰	۱۷.۶۲	۱۷۴۸۲۱۵	۱۵.۴۷	۱.۱۴	۱
	۳۰ – ۲۰	۴۱۵۹۰۹۶	۶۳۵۵۸۰	۳۲.۴۷	۳۵۲۳۵۱۶	۳۱.۱۸	۱.۰۴	۰.۹۱۴
	٤٠ – ۳۰	۳۸۴۲۷۳۳	۵۴۲۵۹۴	۲۷.۷۲	۳۳۰۰۱۳۹	۲۹.۲۰	۰.۹۵	۰.۸۳۳
	۷۹ – ٤٠	۱۴۲۸۱۱۴	۱۹۷۴۴۶	۱۰.۰۹	۱۲۳۰۶۶۸	۱۰.۸۹	۰.۹۳	۰.۸۱۳
جهت شیب	N	۱۵۴۵۲۴۲	۲۱۳۰۴۵	۱۰.۸۸	۱۳۳۲۱۹۷	۱۱.۷۹	۰.۹۲	۰.۷۴۷
	NE	۱۶۳۴۲۰۷	۲۱۰۵۳۴	۱۰.۷۵	۱۴۲۳۶۷۳	۱۲.۶۰	۰.۸۵	۰.۶۹۱
	E	۱۴۹۵۲۱۱	۲۰۰۴۳۴	۱۰.۲۴	۱۲۹۴۷۷۷	۱۱.۴۶	۰.۸۹	۰.۷۲۳
	SE	۱۵۷۹۰۰۷	۱۹۹۵۴۵	۱۰.۱۹	۱۳۷۹۴۶۲	۱۲.۲۱	۰.۸۴	۰.۶۷۶
	S	۱۷۴۵۵۸۳	۲۵۶۵۰۷	۱۳.۱۰	۱۴۸۹۰۷۶	۱۳.۱۸	۰.۹۹	۰.۸۰۵
	SW	۱۸۸۰۶۹۹	۳۰۰۲۸۵	۱۵.۳۴	۱۵۸۰۴۱۴	۱۳.۹۹	۱.۱۰	۰.۸۸۸
	W	۱۷۵۱۴۳۷	۳۰۸۷۵۶	۱۵.۷۷	۱۴۴۲۶۸۱	۱۲.۷۷	۱.۲۴	۱
	NW	۱۶۲۶۷۱۵	۲۶۸۴۷۳	۱۳.۷۱	۱۳۵۸۲۴۲	۱۲.۰۲	۱.۱۴	۰.۹۲۴
کاربری اراضی	زراعی	۴۹۲۵۸	۱۲	۰	۴۹۲۴۶	۰.۴۳۶	۰	۰.۰۰۱
	باغ	۱۷۶۱۱۸	۲۸۶۶۵	۱.۴۶	۱۴۷۴۵۳	۱.۳۰۵	۱.۱۲	۰.۴۴۷
	مرتع خوب	۸۵۹۹۵۱	۹۱۶۹۶	۴.۶۸	۷۶۸۲۵۵	۶.۷۹۸	۰۶۹	۰.۲۷۵
	ترکیبی (کشاورزی - باغ)	۴۳۶۴۹۶	۶۹۲۶۴	۳.۵۴	۳۶۷۲۳۲	۳.۲۵۰	۱.۰۹	۰.۴۳۴
	ترکیبی (کشاورزی - جریانی)	۲۶۷۸۰	۶۲	۰	۲۶۷۱۸	۰.۲۳۶	۰.۰۱	۰.۰۰۵
	ترکیبی (باغ - جریانی)	۳۸۳۸۵	۱۱۶۲۵	۰.۵۹	۲۶۷۶۰	۰.۲۳۷	۲.۵۱	۱
	ترکیبی (اراضی دیم - جریانی)	۱۷۸۰۴	۰	۰	۱۷۸۰۴	۰.۱۵۸	۰	۰
	ترکیبی (مرتع خوب - جریانی)	۶۱۰۸۴۰۰	۱۰۹۶۴۸۲	۵۶.۰۱	۵۰۱۱۹۱۸	۴۴.۳۵۲	۱.۲۶	۰.۵۰۴
	مرتع متوسط	۵۵۳۷۱۰۳	۶۵۹۷۷۳	۳۳.۷۰	۴۸۷۷۳۳۰	۴۳.۱۶۱	۰.۷۸	۰.۳۱۱
	مرتع فقیر	۱۲	۰	۰	۱۲	۰	۰	۰
	ساخته شده	۷۶۹۰	۰	۰	۷۶۹۰	۰.۰۶۸	۰	۰
تراکم پوشش گیاهی	کم	۸۷۳۵۱۶۶	۱۲۰۹۰۴۹	۶۱.۷۷	۷۵۲۶۱۱۷	۶۷.۲۶	۰.۹۲	۰.۷۷۷
	متوسط	۳۸۵۱۵۹۵	۶۵۹۷۳۶	۳۳.۷۰	۳۱۹۱۸۵۹	۲۸.۵۲	۱.۱۸	۱
	زیاد	۵۶۰۸۴۴	۸۸۶۵۱	۴.۵۳	۴۷۲۱۹۳	۴.۲۲	۱.۰۷	۰.۹۰۸

ادامه جدول ۲. مقادیر عضویت فازی (وزن نسبی) مربوط به هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد پیکسل لغزشی	درصد پیکسل لغزشی	تعداد پیکسل فاقد لغزش	درصد پیکسل فاقد لغزش	FR	وزن نسبی
لیتولوژی	Cm	۵۰۰۳۲	۹۸۹۴	۰.۵۱	۴۰۱۳۸	۰.۳۶	۱.۴۲۳	۰.۵۵۷
	Eb	۳۰۹۵۲	۶۱۳۶	۰.۳۱	۲۴۸۱۶	۰.۲۲	۱.۴۲۷	۰.۵۵۸
	Ek	۳۵۱۴۶۰۱	۴۳۳۵۵۸	۲۲.۱۵	۳۰۸۱۰۴۳	۲۷.۲۶	۰.۸۱۲	۰.۳۱۸
	Ekgy	۳۱۳۵۰۷	۲۴۶۵۴	۱.۲۶	۲۸۸۸۵۳	۲.۵۶	۰.۴۹۳	۰.۱۹۳
	Em	۱۳۶۸۰۷	۳۵۶۸۱	۱.۸۲	۱۰۱۱۲۶	۰.۸۹	۲.۰۳۷	۰.۷۹۷
	Etliv	۳۲۳۳۳	۰	۰	۳۲۳۳۳	۰.۲۹	۰	۰
	Evai	۹۷۵۲۴	۵۵۶	۰.۰۳	۹۶۹۶۸	۰.۸۶	۰.۰۳۳	۰.۰۱۳
	Evbv	۳۷۶۶۲۳۳	۵۳۵۳۰۲	۲۷.۳۵	۳۲۳۰۹۳۱	۲۸.۵۹	۰.۹۵۶	۰.۳۷۴
	Evib	۲۲۲۱۱۰	۳۲۹۸۷	۱.۶۹	۱۸۹۱۲۳	۱.۶۷	۱.۰۰۷	۰.۳۹۴
	Ez	۴۴۱۵۵	۶۲۷۱	۰.۳۲	۳۷۸۸۴	۰.۳۴	۰.۹۵۶	۰.۳۷۴
	Jl	۱۴۱۷۰۱	۲۳۱۵۸	۱.۱۸	۱۱۸۵۴۳	۱.۰۵	۱.۱۲۸	۰.۴۴۱
	Js	۶۹۱۶۶	۶۳۵۰	۰.۳۲	۶۲۸۱۶	۰.۵۶	۰.۵۸۴	۰.۲۲۸
	Msm	۲۶۸۵۴۳۸	۴۵۸۵۶۶	۲۳.۴۳	۲۲۲۶۸۷۲	۱۹.۷۱	۱.۱۸۹	۰.۴۶۵
	Oiiv	۳۶۶۷۵۵	۴۶۴۹۹	۲.۳۸	۳۲۰۲۵۶	۲.۸۳	۰.۸۳۸	۰.۳۲۸
	P	۸۱	۰	۰	۸۱	۰	۰	۰
	Pec	۴۸۸۶۹۸	۴۷۸۷۵	۲.۴۵	۴۴۰۸۲۳	۳.۹۰	۰.۶۲۷	۰.۲۴۵
	PEk	۴۱۸۷۷۵	۱۰۶۸۳۵	۵.۴۶	۳۱۱۹۴۰	۲.۷۶	۱.۹۷۷	۰.۷۷۳
	PEs	۲۶۶۴۱۸	۲۷۳۵۴	۱.۴۰	۲۳۹۰۶۴	۲.۱۲	۰.۶۶۱	۰.۲۵۸
	PLiai	۲۹۰	۰	۰	۲۹۰	۰	۰	۰
	Pr	۸۸۳	۲۷۱	۰.۰۱	۶۱۲	۰.۰۱	۲.۵۵۶	۱
	Qt1	۶۱۱۳۴۷	۱۵۵۶۳۲	۷.۹۵	۴۵۵۷۱۵	۴.۰۳	۱.۹۷۱	۰.۷۷۱
	Qt2	۲۹۵	۰	۰	۲۹۵	۰	۰	۰
فاصله از گسل (متر)	۰ – ۱۰۰	۱۷۳۷۹۸۸	۲۰۹۳۶۸	۱۰.۷۰	۱۵۲۸۶۲۰	۱۳.۵۳	۰.۷۹	۰.۶۷۸
	۱۰۰ – ۳۰۰	۲۰۸۷۲۴۸	۲۶۴۷۹۳	۱۳.۵۳	۱۸۲۲۴۵۵	۱۶.۱۳	۰.۸۴	۰.۷۱۹
	۳۰۰ – ۵۰۰	۲۵۵۱۸۲۵	۳۷۴۵۱۰	۱۹.۱۳	۲۱۷۷۳۱۵	۱۹.۲۷	۰.۹۹	۰.۸۵۲
فاصله از گسل (متر)	۵۰۰ – ۱۰۰۰	۱۷۵۳۷۵۸	۲۸۷۲۳۹	۱۴.۶۷	۱۴۶۶۵۱۹	۱۲.۹۸	۱.۱۳	۰.۹۷۰
	۱۰۰۰ – ۲۰۰۰	۱۳۶۰۰۴۴	۱۸۸۶۲۳	۹.۶۴	۱۱۷۱۴۲۱	۱۰.۳۷	۰.۹۳	۰.۷۹۷
	۲۰۰۰ <	۳۷۶۷۲۱۷	۶۳۳۰۴۶	۳۲.۳۴	۳۱۳۴۱۷۱	۲۷.۷۳	۱.۱۷	۱

جدول ۳ ضرایب β بدست آمده برای متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را بر مبنای اجرای مدل رگرسیون لجستیک نشان می‌دهد؛ این ضریب بیانگر میزان تأثیر هر کدام از متغیرهای مستقل در احتمال رخداد پدیده زمین‌لغزش در محدوده مورد بررسی می‌باشد. با توجه به جدول، متغیر زمین‌شناسی با ضریب β ۲/۱۲، به عنوان مؤثرترین لایه در وقوع پهنه‌های لغزشی حوضه آبخیز طالقان معرفی شده است. پس از آن، لایه‌ی تراکم شبکه‌ی آبراهه دارای ضریب β ۱/۶۲ بوده و به عنوان دومین متغیر مؤثر در وقوع لغزش‌های حوضه طالقان مطرح است. سومین متغیر مؤثر کاربری اراضی است که ضریب β محاسبه شده برای آن ۱/۶۱۶ می‌باشد. متغیرهای فاصله از جاده با ضریب ۱/۳۵، جهت شیب با ضریب ۱/۱۶،

فاصله از گسل با ضریب ۱/۱۱، ارتفاع با ضریب ۱/۱، تراکم پوشش گیاهی با ضریب ۰/۶۴ و شیب با ضریب ۰/۴۱، به ترتیب در درجه‌های بعدی اهمیت از لحاظ تأثیرگذاری بر وقوع پهنه‌های لغزشی در حوضه آبخیز طالقان قرار دارند.

ادامه جدول ۲. مقادیر عضویت فازی (وزن نسبی) مربوط به هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد پیکسل لغزشی	درصد پیکسل لغزشی	تعداد پیکسل فاقد لغزش	درصد پیکسل فاقد لغزش	FR	وزن نسبی
فاصله از جاده (متر)	۰ – ۱۰۰	۱۶۰۴۴۶۶	۲۳۱۰۵۱	۱۱.۸۰	۱۳۷۳۴۱۵	۱۲.۱۵	۰.۹۷	۰.۸۳۵
	۱۰۰ – ۳۰۰	۲۴۰۸۹۲۷	۳۸۱۷۶۴	۱۹.۵۰	۲۰۲۷۱۶۳	۱۷.۹۴	۱.۰۹	۰.۹۳۵
	۳۰۰ – ۵۰۰	۱۹۴۷۴۴۹	۲۹۳۷۶۷	۱۵.۰۱	۱۶۵۳۶۸۲	۱۴.۶۳	۱.۰۳	۰.۸۸۲
	۵۰۰ – ۱۰۰۰	۳۲۵۵۷۵۵	۴۳۹۱۳۹	۲۲.۴۳	۲۸۱۶۶۱۶	۲۴.۹۲	۰.۹۰	۰.۷۷۴
	۱۰۰۰ – ۲۰۰۰	۲۵۸۶۷۵۸	۳۶۸۰۱۲	۱۸.۸۰	۲۲۱۸۷۴۶	۱۹.۶۳	۰.۹۶	۰.۸۲۴
	۲۰۰۰ <	۱۴۵۴۷۰۳	۲۴۳۸۴۶	۱۲.۴۶	۱۲۱۰۸۵۷	۱۰.۷۲	۱.۱۶	۱
تراکم آبراهه (کیلومتر/کیلومتر مربع)	< ۲.۳٦	۱۸۴۷۳۰۶	۱۹۷۲۵۷	۱۰.۰۸	۱۶۵۰۰۴۹	۱۴.۶۰	۰.۶۹	۰.۵۶۸
	۲.۳٦ – ۳.۲٤	۲۸۷۹۶۰۵	۴۶۰۷۲۳	۲۳.۵۴	۲۴۱۸۸۸۲	۲۱.۴۰	۱.۱۰	۰.۹۰۶
	۳.۲٤ – ٤.۱۰	۳۰۲۴۹۳۰	۴۹۹۵۲۱	۲۵.۵۲	۲۵۲۵۴۰۹	۲۲.۳۴	۱.۱۴	۰.۹۴۰
	٤.۱۰ – ٤.۹۸	۳۲۳۷۳۶۹	۵۶۲۵۷۳	۲۸.۷۵	۲۶۷۴۷۹۶	۲۳.۶۷	۱.۲۱	۱
	٤.۹۸ – ٦.٤۸	۲۲۷۰۰۷۶	۲۳۶۹۴۳	۱۲.۱۱	۲۰۳۳۱۳۳	۱۷.۹۹	۰.۶۷	۰.۵۵۴

جدول ۳. ضرایب β بدست آمده از اجرای مدل رگرسیون لجستیک برای متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	ضریب β	سطح معنی داری
شیب	۰/۴۱۱	۰
فاصله از جاده	۱/۳۴۹	۰
تراکم آبراهه	۱/۶۱۷	۰
تراکم پوشش گیاهی	۰/۶۳۹	۰
کاربری اراضی	۱/۶۱۶	۰
زمین‌شناسی	۲/۱۱۷	۰
فاصله از گسل	۱/۱۱	۰
ارتفاع	۱/۰۹۷	۰
جهت شیب	۱/۱۶۲	۰
مقدار ثابت	-۹/۹۳۷	۰

بر مبنای ضرایب بدست آمده از مدل، شکل عمومی مدل رگرسیون لجستیک در این پژوهش به صورت رابطه‌ی ۱۱ بدست آمد و با استفاده از این رابطه در محیط تحلیل رستری ArcMap، همپوشانی متغیرها جهت نقشه پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین‌لغزش با مدل رگرسیون لجستیک در حوضه آبخیز طالقان انجام گرفت. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش در پنج طبقه‌ی با احتمال خطر خیلی کم، نسبتاً کم خطر، با خطر متوسط، پر خطر و خیلی پر خطر تهیه شد (شکل ۲).

رابطه ۱۱)

$$Z = -9.937 + (1.16 \times Aspect) + (0.41 \times Slope) + (1.1 \times Elevation) + (1.11 \times Fault) + (2.12 \times Geology) + (1.62 \times Land\ use) + (0.64 \times NDVI) + (1.62 \times River) + (1.35 \times Road)$$

در انتخاب روش رگرسیون چند متغیره، از روش گام به گام استفاده شد که نتایج حاصل از اعمال این روش با درصد اطمینان بیش از ۹۵ درصد تعیین گردید. پس از انجام عملیات رگرسیونی از میان ۱۱ پارامتر دخالت داده شده در رگرسیون، ۲ متغیر میزان بارش و فرم دامنه به دلیل داشتن ضریب معنی‌داری کم‌تر از ۹۵ درصد و نداشتن رابطه آماری قوی با سطح لغزش‌های رخ داده در طبقات پارامترها، حذف شدند. ۹ پارامتر باقی مانده در سطح اطمینان بین ۹۵ تا ۹۹ درصد معنی‌دار بوده‌اند؛ ضریب مؤثر بودن هر کدام از پارامترها در وقوع سطح‌های لغزشی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ٤. ضرایب β بدست آمده از اجرای مدل رگرسیون چند متغیره برای متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	ضریب β	سطح معنی داری
شیب	۰/۰۶۶	۰
فاصله از جاده	۰/۱۹	۰
تراکم آبراهه	۰/۲۱	۰
تراکم پوشش گیاهی	۰/۱۰۷	۰
کاربری اراضی	۰/۲۰۴	۰
زمین‌شناسی	۰/۳۲۶	۰
فاصله از گسل	۰/۱۴۶	۰
ارتفاع	۰/۱۹۴	۰
جهت شیب	۰/۱۵۴	۰
مقدار ثابت	-۰/۹۳۷	۰

با توجه به ضرایب بدست آمده مشاهده می‌شود که پارامتر زمین‌شناسی با ضریب ۰/۳۲۶ به عنوان مهم‌ترین لایه‌ی تأثیرگذار در رخداد پهنه‌های لغزشی حوضه آبخیز طالقان مطرح است. پس از آن پارامتر تراکم آبراهه با ضریب ۰/۲۱ به عنوان دومین لایه‌ی تأثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش است. پارامترهای کاربری اراضی با ضریب ۰/۲۰۴، ارتفاع با ضریب ۰/۱۹۴، فاصله از جاده با ضریب ۰/۱۹، جهت شیب با ضریب ۰/۱۵۴، فاصله از گسل با ضریب ۰/۱۴۶، تراکم پوشش گیاهی با ضریب ۰/۱۰۷ و شیب با ضریب ۰/۰۶۶ در درجه‌های بعدی اهمیت از نظر تأثیرگذاری بر وقوع پهنه‌های لغزشی حوضه آبخیز طالقان قرار دارند. مدلی که سرانجام از اجرای رگرسیون چند متغیره بدست آمد در رابطه ۱۲ ارائه شده است که در تهیه‌ی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه مورد بررسی با استفاده از رگرسیون چند متغیره مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳).

رابطه ۱۲)

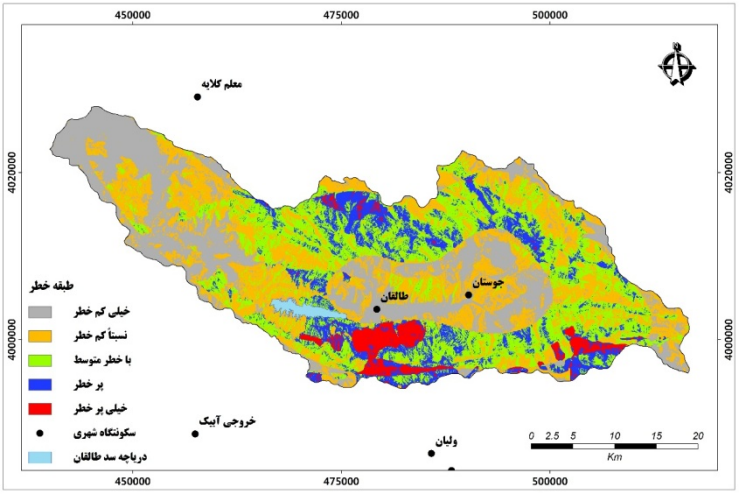
$$Y = -0.937 + (0.154 \times Aspect) + (0.066 \times Slope) + (0.194 \times Elevation) + (0.146 \times Fault) + (0.326 \times Geology) + (0.204 \times Land\ use) + (0.107 \times NDVI) + (0.21 \times River) + (0.19 \times Road)$$

با توجه به وزن‌های نسبی محاسبه شده در روش تحلیل سلسله مراتبی (شکل ۴)، متغیر زمین‌شناسی با ضریب ۰/۳۲۶ به عنوان مؤثرترین عامل در وقوع پهنه‌های لغزشی حوضه طالقان بر اساس نظرات کارشناسی مطرح است؛ متغیر شیب با ۰/۱۹۹ در درجه دوم قرار دارد. پس از آن متغیرهای فاصله از جاده با ضریب ۰/۱۴۹، کاربری اراضی (۰/۰۹۵)، تراکم آبراهه (۰/۰۷۷)، فاصله از گسل (۰/۰۵۷)، تراکم پوشش گیاهی (۰/۰۴۳)، جهت شیب (۰/۰۳۶) و ارتفاع با ضریب ۰/۰۱۸ در درجه‌های بعدی تأثیرگذار بودن بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی قرار دارند. شکل عمومی معادله‌ی بدست آمده از اجرای مدل AHP در رابطه ۱۳ آورده شده است. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شکل ۵ نشان داده شده است.

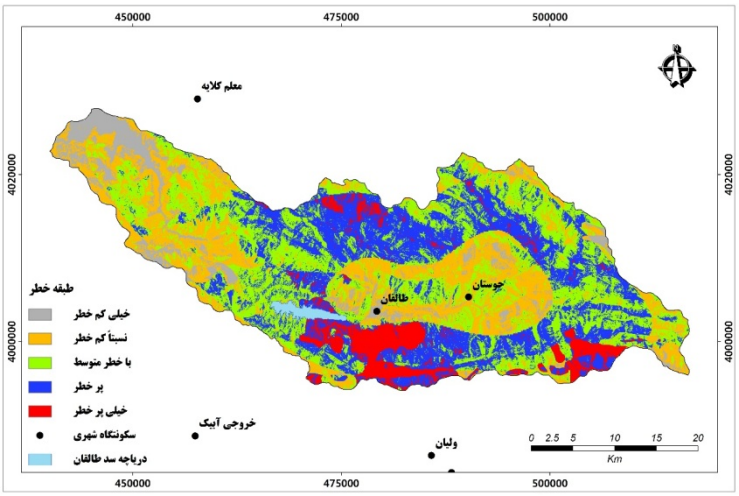
رابطه ۱۳)

$$Y = (0.326 \times Geology) + (0.199 \times slope) + (0.149 \times Road) + (0.095 \times Land\ use) + (0.077 \times River) + (0.055 \times Fault) + (0.043 \times NDVI) + (0.036 \times Aspect) + (0.018 \times Elevation)$$

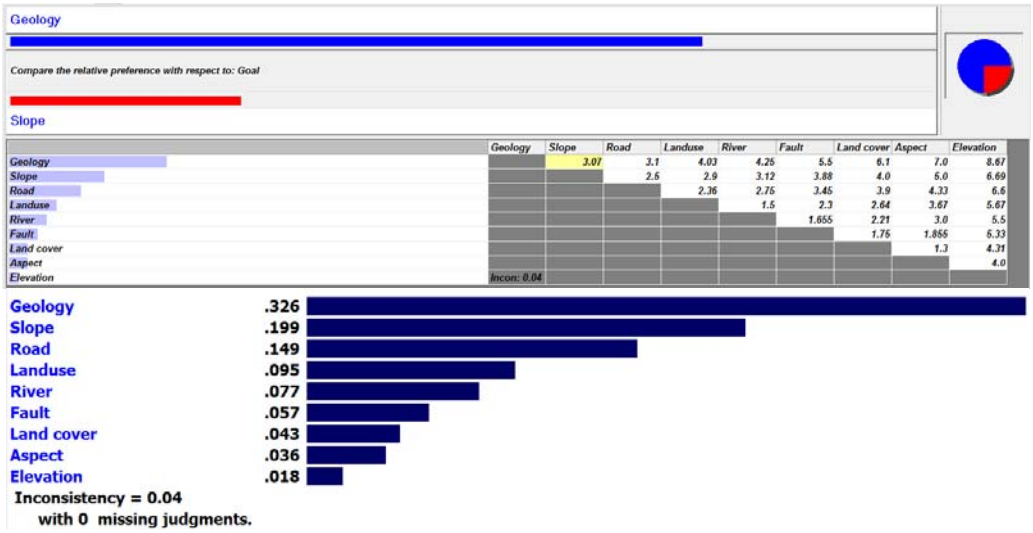
در نهایت و با توجه به رابطه‌های تعریف شده جهت اعمال گامای فازی، لایه‌ی نهایی حاصل از هر کدام از مقـادیر γ در شکل‌های ۶ تا ۶ آورده شده است.



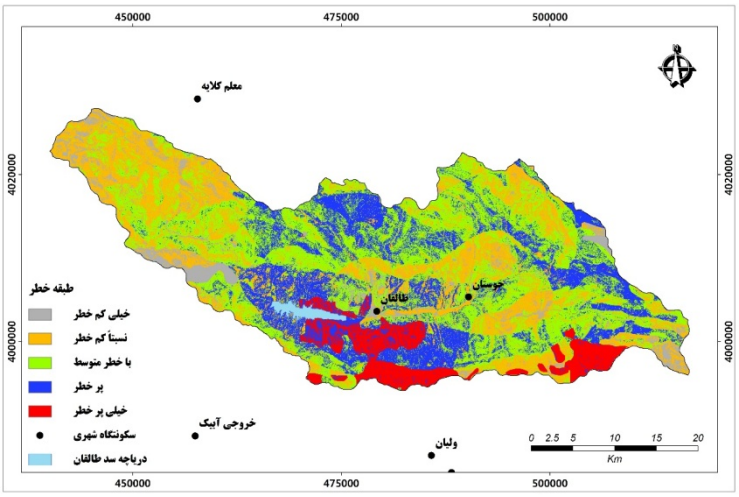
شکل ۲. نقشه‌ی طبقات احتمال وقوع خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (رگرسیون لجستیک)



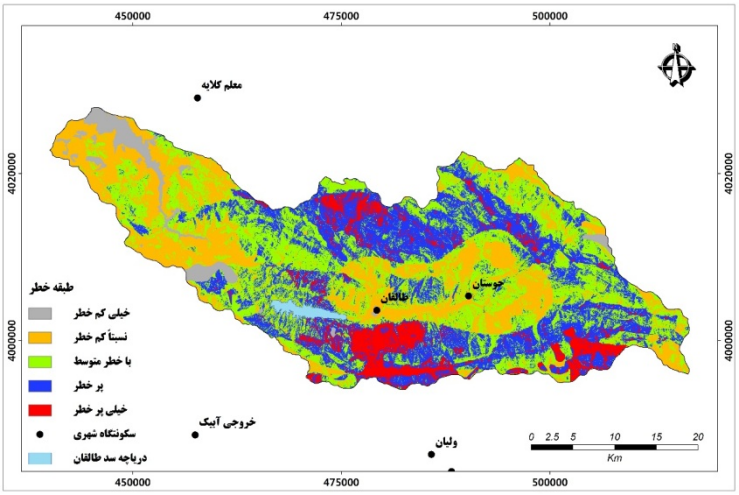
شکل ۳. نقشه‌ی طبقات خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (رگرسیون چند متغیره)



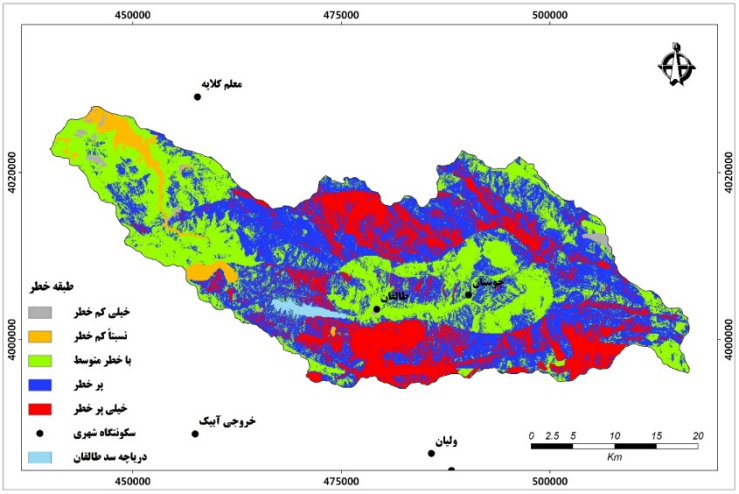
شکل ٤. نمایش گرافیکی به هر یک از پارامترهای مؤثر در وقوع پهنه‌های لغزشی حوضه طالقان



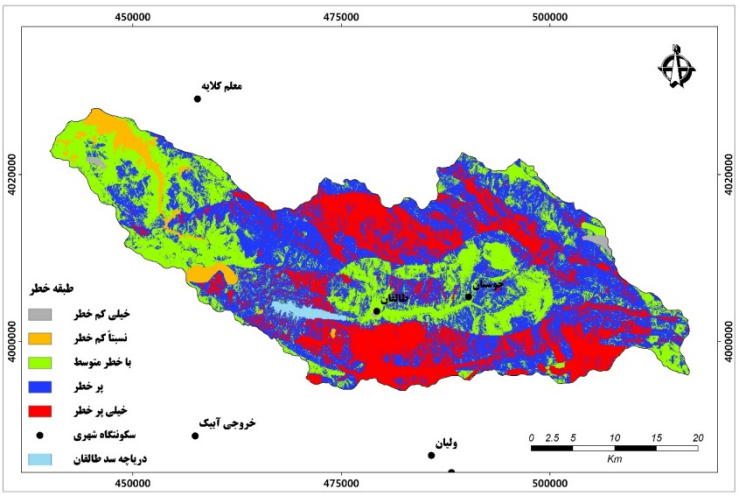
شکل ۵. نقشه‌ی طبقات خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (تحلیل سلسله مراتبی)



شکل ٦. نقشه‌ی طبقات خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (فازی: گاما ۰/۷)



شکل ۷. نقشه‌ی طبقات خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (فازی: گاما ۰/۸)



شکل ۸. نقشه‌ی طبقات خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان (فازی: گاما ۰/۹)

۵.نتیجه‌گیری

با استفاده از تلفیق نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط ArcMap، به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، با استفاده از روش مجموع کیفیت (QS) و دقت (P) پرداخته می‌شود و در نهایت مدل مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی، انتخاب می‌گردد. برای مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از روش‌های پهنه‌بندی، نسبت تراکم (Dr) بکار می‌رود. به‌طور کلی شاخص زمین‌لغزش (LI) و نسبت تراکمی (Dr) و پیش‌بینی (P)، برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از روش‌های پهنه‌بندی و شاخص مجموع کیفیت (Qs) برای ارزیابی و مقایسه بین روش‌های مختلف کاربرد دارد.

انحراف مقادیر Dr در پهنه‌های مختلف خطر اگر به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در رده‌های مختلف به یکدیگر نزدیک بوده و مقدار Qs نیز پایین می‌باشد. ولی اگر انحراف مقادیر Dr از میانگین در پهنه‌های مختلف زیاد باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در رده‌های مختلف خطر با یکدیگر تفاوت داشته و در نتیجه مقدار عددی Qs بزرگ‌تر می‌گردد. بنابراین، هر نقشه پهنه‌بندی که دارای شاخص Qs بالاتر باشد، از صحت و دقت بیش‌تری برای پهنه‌بندی خطر لغزش برخوردار است (Gee, 1991). تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به‌طور صحیح تهیه شده باشند، از رده خطر کم تا رده‌های پر خطر به صورت صعودی مشاهده خواهد شد.

به منظور ارزیابی صحت نقشه‌های تهیه شده در این پژوهش (با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، رگرسیون چند متغیره، تحلیل سلسله مراتبی و اپراتور گامای فازی)، ابتدا هر کدام از نقشه‌های حاصله از روش‌ها با پنج رده خطر، در نقشه پراکنش پهنه‌های لغزشی منطقه مطالعاتی تلفیق شدند تا مساحت پهنه‌های لغزشی در هر رده خطر هر کدام از نقشه‌ها محاسبه شود. سپس مقادیر نسبت تراکم، شاخص مجموع کیفیت و دقت روش برای روش‌های بکار گرفته شده در این پژوهش، برآورد شد تا از طریق مقایسه‌ی مقادیر این شاخص‌ها بتوان مدل مناسب و منطبق با حوضه آبخیز طالقان را به منظور پهنه‌بندی دقیق‌تر خطر زمین‌لغزش آن انتخاب نمود. یافته‌های حاصل از محاسبه مقادیر شاخص‌های مجموع کیفیت و دقت روش در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این یافته‌ها، نسبت تراکمی (که همان مقادیر شاخص زمین‌لغزش مربوط به پهنه‌های خطر است) در هر ۶ روش بکار گرفته شده، ضمن تفکیک‌پذیری خوب، متناسب با افزایش خطر پهنه‌ها رو به فزونی نهاده است.

جدول ۵. صحت و دقت روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان

مدل پهنه بندی	رده خطر لغزش	مساحت پهنه به کیلومتر مربع (Ai)	مساحت لغزش پهنه به کیلومتر مربع (Si)	نسبت تراکمی (DR)	نسبت مساحت (S)	QS در هر رده	مجموع کیفیت (QS)	دقت روش (P)
RL	۱	۳۳۷.۱۶	۲۱.۵۲	۰.۴۳	۰.۲۶	۰.۰۸۳	۰.۲۶	۰.۲۲
	۲	۴۱۸.۴۳	۴۹.۴۳	۰.۸۰	۰.۳۲	۰.۰۱۳		
	۳	۳۵۲.۵۷	۶۴.۳۲	۱.۲۳	۰.۲۷	۰.۰۱۴		
	۴	۱۶۱.۸۶	۴۲.۰۵	۱.۷۵	۰.۱۲	۰.۰۷۰		
	۵	۵۱.۶۵	۱۸.۳۵	۲.۴۰	۰.۰۴	۰.۰۷۷		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					
MR	۱	۹۹.۰۱	۳.۹۴	۰.۲۷	۰.۰۷	۰.۰۴۰	۰.۲۴	۰.۱۸
	۲	۳۱۸.۳۲	۲۴.۶۲	۰.۵۲	۰.۲۴	۰.۰۵۵		
	۳	۴۴۰.۴۳	۵۹.۸۹	۰.۹۲	۰.۳۳	۰.۰۰۲		
	۴	۳۶۴.۶۷	۷۵.۳۷	۱.۴۰	۰.۲۸	۰.۰۴۳		
	۵	۹۸.۸۲	۳۱.۸۰	۲.۱۷	۰.۰۷	۰.۱۰۳		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					
AHP	۱	۹۵.۸۶	۶.۸۹	۰.۴۹	۰.۰۷	۰.۰۱۹	۰.۱۶	۰.۱۸
	۲	۳۶۱.۹۹	۳۰.۶۲	۰.۵۷	۰.۲۷	۰.۰۵۰		
	۳	۴۷۹.۹۵	۷۲.۳۷	۱.۰۲	۰.۳۶	۰.۰۰۰		
	۴	۲۹۰.۸۲	۵۹.۳۷	۱.۳۸	۰.۲۲	۰.۰۳۲		
	۵	۹۲.۲۱	۲۶.۳۲	۱.۹۳	۰.۰۷	۰.۰۶۰		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					
FL 0.7	۱	۴۷.۰۶	۰.۳۱	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۳۳	۰.۲۵	۰.۱۸
	۲	۳۲۶.۱۶	۲۳.۸۷	۰.۴۹	۰.۲۵	۰.۰۶۳		
	۳	۴۶۷.۲۵	۶۳.۲۲	۰.۹۱	۰.۳۵	۰.۰۰۳		
	۴	۳۷۰.۲۲	۷۱.۸۴	۱.۳۱	۰.۲۸	۰.۰۲۷		
	۵	۱۱۰.۴۱	۳۶.۳۴	۲.۲۲	۰.۰۸	۰.۱۲۵		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					
FL 0.8	۱	۹.۴۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰۷	۰.۲۳	۰.۱۵
	۲	۳۷.۷۹	۰.۳۱	۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۲۶		
	۳	۴۳۰.۸۸	۳۴.۹۲	۰.۵۵	۰.۳۳	۰.۰۶۷		
	۴	۵۷۸.۰۲	۸۹.۳۲	۱.۰۴	۰.۴۴	۰.۰۰۱		
	۵	۲۶۵.۵۲	۷۱.۱۴	۱.۸۱	۰.۲۰	۰.۱۳۲		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					
FL 0.9	۱	۵.۸۱	۰	۰	۰.۰۰۴	۰.۰۰۴	۰.۲۲	۰.۱۵
	۲	۴۱.۲۲	۰.۳۱	۰.۰۵	۰.۰۳	۰.۰۲۸		
	۳	۳۶۶.۷۷	۲۷.۸۷	۰.۵۱	۰.۲۸	۰.۰۶۶		
	۴	۵۷۹.۵۲	۸۴.۸۲	۰.۹۹	۰.۴۴	۰.۰۰۰		
	۵	۳۲۸.۳۵	۸۲.۶۸	۱.۷۰	۰.۲۵	۰.۱۲۲		
	Sum	**۱۳۲۱.۷**	**۱۹۵.۷**					

مقدار شاخص مجموع کیفیت (Qs) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد، در روش رگرسیون لجستیک ۰/۲۶ محاسبه شده است که مطلوبیت و صحت بیش‌تر استفاده از این روش را در پهنه‌بندی خطر

سطح‌های لغزشی حوضه آبخیز مورد بررسی نشان می‌دهد. پس از آن، روش گامای فازی ۰/۷ با مجموع کیفیت ۰/۲۵ در درجه‌ی دوم مطلوبیت و صحت قرار دارد. مقدار Qs روش‌های رگرسیون چند متغیره، گامای فازی ۰/۸، گامای فازی ۰/۹ و تحلیل سلسله مراتبی بترتیب ۰/۲۴، ۰/۲۳، ۰/۲۲ و ۰/۱۶ بدست آمده است که بیانگر صحت کم‌تر آن‌ها نسبت به رگرسیون لجستیک می‌باشد. در مورد شاخص دقت پیش‌بینی خطر (P) هم مشاهده می‌شود که رگرسیون لجستیک با مقدار ۰/۲۲، تفکیک‌پذیری یکسان‌تر و مناسب‌تری از پهنه‌های خطر را نسبت به دیگر روش‌ها مورد استفاده تأیید می‌کند. مقدار این شاخص برای روش‌های گامای فازی ۰/۷ و رگرسیون چند متغیره، که دارای مجموع کیفیت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها بودند، ۰/۱۸ برآورد شده است که نشان از تفکیک‌پذیری مناسب و یکسان پهنه‌های خطر لغزش در این دو روش دارد. دقت روش محاسبه شده برای گامای فازی ۰/۸ و ۰/۹ نیز ۰/۱۸ است. مشاهده می‌شود که بیش‌تر یا کم‌تر بودن مقادیر شاخص دقت روش برای مدل‌های بکار گرفته شده با مقادیر شاخص مجموع کیفیت متناظر روش‌ها همخوانی دارد؛ یعنی در هر دو شاخص، روش رگرسیون لجستیک دارای مقادیر بهینه‌تری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. تنها یک استثنا وجود دارد و آن هم مربوط به مدل تحلیل سلسله مراتبی است؛ با وجود اینکه این مدل پایین‌ترین مقدار شاخص مجموع کیفیت را در بین سایر مدل‌ها دارد، ولی از دقت روش نسبتاً بالایی (۰/۱۸) برخوردار است. این امر نشان می‌دهد که مدل تحلیل سلسله مراتبی از نظر تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر، وضعیتی یکسان با رگرسیون چند متغیره و گامای فازی ۰/۷ دارد. شاید عدم انطباق میان مقادیر شاخص مجموع کیفیت و دقت پیش‌بینی به ماهیت متفاوت مدل AHP با سایر روش‌ها بر می‌گردد. چون روش AHP به منظور تصمیم‌گیری نهایی در مورد هدف (نقشه خطر زمین‌لغزش) بر قضاوت کارشناسی و مقایسه زوجی صفات (عوامل مؤثر در لغزش) مبتنی است، حال آنکه روش‌های دیگر بر ضرایب متغیرهای مستقل حاصل از روش رگرسیونی استوار هستند.

در یک جمع‌بندی کلی، ترتیب بهینه و مناسب بودن مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان عبارت است از: رگرسیون لجستیک، اپراتور گامای فازی ۰/۷، رگرسیون چند متغیره، گامای فازی ۰/۸ و ۰/۹ و تحلیل سلسله مراتبی. نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از روش‌های انتخاب شده در این پژوهش، دقت‌های متفاوتی را از آن‌ها در تهیه‌ی نقشه نهایی پهنه‌بندی نشان داد. اگر چه بر اساس دقت روش (P) که نشان از تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر در هر روش دارد، مقادیر تقریباً یکسانی برای روش‌ها، به غیر از روش رگرسیون لجستیک، بدست آمد و محدودیتی برای دخالت دادن پارامترها به چشم نمی‌خورد. اما اختلاف در صحت یا مطلوبیت (Qs) که بیان‌کننده ارجحیت روش‌ها است، می‌تواند ناشی از مواردی از این دست باشد: یکسان نبودن ماهیت پارامترها و عوامل شرکت دهنده در فرآیندها، هنگامی که هدف همانا مقایسه باشد. به عبارتی، ماهیت ذاتی پارامترها یا عوامل مؤثر در مدل‌های مختلف متفاوت هستند و روشی که بتواند اولویت عوامل مؤثر و مقدار وزن آن‌ها را با همدیگر محاسبه کند، دارای صحت بیش‌تری است و به عبارتی، انطباق بهتری با پتانسیل وقوع لغزش در منطقه خواهد داشت. در این مورد روش رگرسیون لجستیک مبتنی بر بکارگیری ضرایب حاصل از روش رگرسیونی (تلفیقی) و وزن معیار متغیرها نسبت به همدیگر (ضریب β)، ارجحیت بیش‌تری را نسبت به سایر روش‌ها نشان داد.

منابع

- احمدی، حسن؛ اسمعلی، اباذر؛ فیض نیا، سادات؛ و شریعت جعفری، محسن (۱۳۸۲). پهنه بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره MR و تحلیل سلسله مراتبی AHP "مطالعه موردی حوزه آبخیز گرمی چاه"، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۶، ۴: ۳۲۳-۳۳۶.
- شادفر، صمد (۱۳۸۴). پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، مطالعه موردی حوضه آبخیز چالکرود، مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵: ۱۱۸-۱۲۶.

- شریعت جعفری، محسن؛ و حامدپناه، رامین (۱۳۸۶). پیش‌بینی خطر ناپایداری شیب‌های طبیعی با استفاده از عملگرهای ضرب و جمع جبری فازی در البرز مرکزی، نشریه منابع طبیعی ایران، شماره ۳: ۷۵۷-۷۴۵.
- شیرانی، کورش؛ سیف، عبداله؛ و علیمرادی، مسعود (۱۳۸۹). صحت‌سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به کمک تکنیک (GIS) (مطالعه موردی: حوضه رودخانه ماربر). مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره سوم: ۹۱-۱۰۸.
- عبادتی‌نژاد، سید علی؛ یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران و شادفر، صمد ((۱۳۸۶). ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرود، مجله علمی- پژوهشی علوم مهندسی آبخیزداری، سال اول، شماره ۲: ۳۹-۴۴.
- کورکی نژاد، مسعود؛ اونق، مجید؛ اسلامی، مهیا؛ کبیر، آتنا؛ و شفیع زاده، المیرا (۱۳۸۴). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در آبخیز سیاه رودبار گلستان، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، چاپ اول، ۳۶۸-۳۶۱.
- متکان، علی اکبر؛ سمیعا، جلال؛ پورعلی، سیدحسین؛ و صفایی، مهرداد (۱۳۸۸). مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز لاجیم، صل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۵، شماره ۴: ۳۱۸-۳۲۵.
- مرادی، حمیدرضا؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ و مهدویفر، محمدرضا (۱۳۸۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هراز). علوم محیطی. سال هفتم، شماره چهارم: ۱۲۹-۱۴۲.
- نادری، فتح‌الله (۱۳۹۱). کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۴: ۷۴-۸۵.
- *Cornforth, D.H., (2005). Landslides in Practice. USA: John Wiley & Sons Inc., 591p.*
- *Gee, M.D., (1992). Classification of Landslides Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability. In: Bell, Davi, H. (eds.), Proceedings 6th International Symposium on Landslide, 48-56.*
- *Gorsevski, P.V., Jankowski, P., and Gelssler, P.E., (2006). Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process, Control and Cybernetics, (35): 1-26.*
- *Juang, C.H., Hauang, R.D., and Chen, J.W., (1996). Determining of relative density of sands from CPT using fuzzy sets. Journal of Geotechnical Engineering, 122(1): 1-16.*
- *Lee, D.H., and Juang, C.H., (1992). Evaluation of failure potential in mudstone slopes using fuzzy sets. ASCE Geotechnical Special Publication 31, Stability and Performance of Slopes and Embankment-II (2): 1137-1151.*
- *Lee, S., (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. Environmental Geology, (50): 847-855.*
- *Murat, E., and Candan, G., (2003). Use of fuzzy relation to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (west black sea region, turkey), Engineering geology. (75), pp24.*
- *Naderi, F., Naseri, B., Karimi, H., and Habibi Bibalani, G.H., (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.

- *Sabuya, F.M., Alves, G., and Pinto, W.D., (2006). Assessment of failure susceptibility of soil slopes sings fuzzy logic, Engineering Geology, pp14.*
- *Yalcin, A., (2008). GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey), Comparisons of results and confirmations Catena, (72): 1-12.*
- *Yin, K.J., and Yan, T.Z., (1988). Statistical Prediction Model for Slope Instability of Metamorphosed Rocks. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, (2): 1269-1272.*