

پهنه‌بندی استعداد زمین لغزش با استفاده از روش منطق فازی (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز نکارود)

فاطمه بلالی^۱، قربان وهابزاده^{۲*}، حمیدرضا پورقاسمی^۳، میلاد فروزانفر^۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۱۵

چکیده

هدف از این پژوهش، ارزیابی استعداد زمین لغزش در بخش مرکزی حوزه آبخیز نکارود واقع در استان مازندران با استفاده از روش منطق فازی می‌باشد. به این منظور، ابتدا نقاط لغزشی با استفاده از عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی مشخص و در پی آن نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تهیه گردید. سپس هر یک از عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین لغزش از قبیل (درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، ارتفاع از سطح دریا، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از شبکه آبراهه) به عنوان یک لایه اطلاعاتی در محیط GIS رقومی و به منظور انجام تحلیل‌های مبتنی بر تئوری مجموعه‌های فازی، استفاده گردید. تحلیل‌های فازی با استفاده از نرم‌افزار Matlab 7.1، پس از تعیین توابع عضویت برای هر یک از عامل‌های تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش، صورت پذیرفت و سپس خروجی این نرم‌افزار که درجه حساسیت محاسبه شده برای هر پیکسل در نقشه محدوده مورد مطالعه می‌باشد، به محیط Arc Map منتقل و نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین لغزش با استفاده از تابع عضویت مثلثی تهیه گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که نقشه استعداد زمین لغزش تهیه شده با استفاده از تابع عضویت مثلثی، با شاخص جمع کیفی (۰/۴۱۴۸) دارای دقت و صحت بالایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: زمین لغزش، منطق فازی، تابع عضویت مثلثی، حوزه آبخیز نکارود، GIS

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. دانشیار گروه آب‌شناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و

۳. استادیار علوم و مهندسی آب‌شناسی، بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

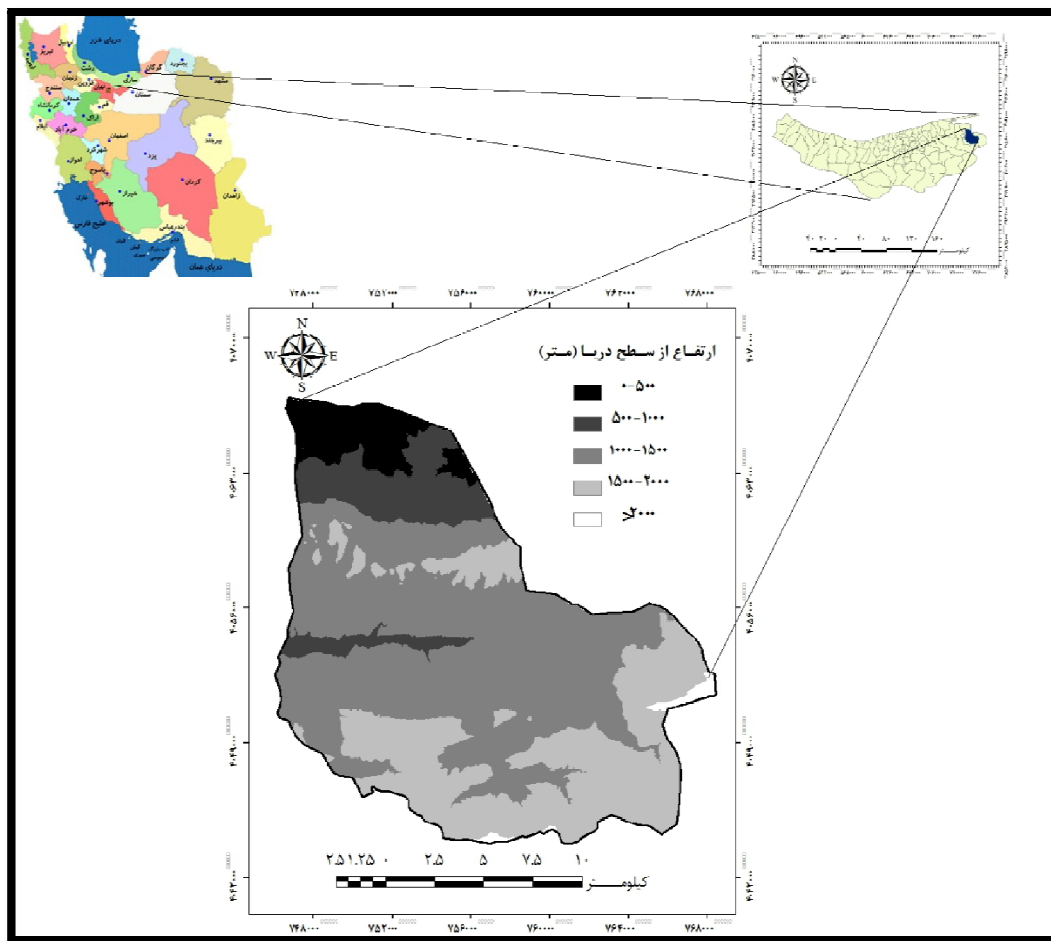
یکی از انواع فرآیندهای دامنه‌ای که هر ساله در برخی نقاط جهان و ایران رخ داده و خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را باعث می‌شود، پدیده زمین‌لغزش می‌باشد. این پدیده در اکثر استان‌های کشور موجب خسارات اقتصادی به مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی مزارع و مناطق مسکونی و روستاها راه‌ها، خطوط راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو و... شده و یا آن‌ها را مورد تهدید قرار می‌دهد. استان مازندران نیز به دلیل محصور شدن بین دریای خزر و رشته کوه‌های البرز، وضعیت ویژه‌ای از لحاظ اقلیمی دارد. عواملی چون بارندگی مناسب به همراه سازندهای حساس به فرسایش و نیز قرار گرفتن بر روی کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا و فعال بودن گسل‌ها، پتانسیل لازم برای وقوع حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش را در این استان فراهم نموده است (فروزانفر، ۱۳۹۲). از این رو در تمامی مطالعات مربوط به پدیده زمین‌لغزش در قالب طرح‌های آبخیزداری همواره هدف، تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و پیش‌بینی مناطق مستعد به وقوع این پدیده می‌باشد (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱). از بین تئوری‌های موجود در پهنه‌بندی زمین‌لغزش، تئوری منطق فازی برای انجام این پژوهش برگزیده شده است. منطق فازی، نخستین بار در سال ۱۹۶۵ به وسیله لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان مجموعه‌های فازی در مجله اطلاعات و کنترل ارائه شد. لطفی‌زاده ادعا نمود که برای مشخص شدن اعضای یک مجموعه می‌بایست تابع عضویت تعریف شود. یعنی میزان عضویت می‌تواند دقیقاً صفر و یک نباشد. بلکه مقادیری مابین این دو باشد (کامیاد و طارقیان، ۱۳۸۳). مزیت مجموعه‌های فازی نسبت به اعداد این است که محدوده‌ای از امکان‌ها را

برای بیان نقش عامل یادشده در نظرگرفته و علاوه بر مزایای روش‌های آماری، به دلیل بیان دقیق عواملی که نقش محدودی در وقوع زمین‌لغزش خواهد داشت، دقت بیشتری در پیش‌بینی وقوع حوادث طبیعی از جمله زمین‌لغزش‌ها، دارند (Pourghasemi et al., 2012). مطالعات زیادی در زمینه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از منطق‌فازی انجام شده است (متکان و همکاران، ۱۳۸۸؛ بهنیا فر و همکاران، ۱۳۸۹؛ Sharifi et al., 2011؛ Gemtzi et al., 2011؛ Pourghasemi Pradhan and Akgun et al., 2012؛ et al., 2012؛ Buchroithner, 2012). نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده، نشان داده که استفاده از مجموعه‌های فازی به دلیل در نظر گرفتن محدوده‌ای از امکان‌ها به جای اعداد، محدودیت روش‌های کمی را برطرف ساخته و تحلیل دقیق‌تری از نقش عوامل طبیعی نسبت به سایر روش‌های کمی ارائه کرده است. به این ترتیب، دقت بیشتری در پیش‌بینی وقوع حوادث طبیعی، از جمله زمین‌لغزش‌ها دارد (Pourghasemi et al., 2012).

۱. مواد و روش‌ها:

۱-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه:

پژوهش حاضر، در بخش میانی حوزه آبخیز نکارود واقع در استان مازندران از سلسله جبال البرز مرکزی، انجام شد. که این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی "۳۶°۳۶'۱۱" تا "۴۲°۵۶'۵۶" شمالی و طول‌های "۵۳°۴۱'۳۳" تا "۵۴°۰'۱" شرقی با وسعتی بالغ بر ۳۲۱ کیلومتر مربع واقع شده است که از شمال به روستای تیله‌نو، از جنوب به ارتفاعات بدکوه، از شرق به روستای پیتنه‌نو و از غرب به روستای یخکش محدود می‌شود. ارتفاع کمینه و بیشینه در منطقه به ترتیب ۲۰ متر و ۲۵۲۰ متر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۱. روش تحقیق:

۱-۲-۱. تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش:

برای تهیه نقشه استعداد زمین لغزش در هر منطقه، تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها، اولین و مهم‌ترین مرحله می‌باشد. بدین منظور پس از تهیه اطلاعات مربوط به زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی، صحت نقاط لغزشی با بازدید صحرایی از منطقه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین علاوه بر ۳۶ موقعیت لغزشی ثبت شده، تعداد ۷۰ موقعیت لغزشی جدید در بازندهای صحرایی به ثبت رسید که در مجموع تعداد ۱۰۶ موقعیت لغزشی در این پژوهش بررسی و مورد استفاده قرار گرفت که از این تعداد، ۷۵ موقعیت لغزشی برای مدلسازی و ۳۱ موقعیت لغزشی برای ارزیابی مدل استفاده گردید. عمده لغزش‌های منطقه از نوع Shallow Landslide بوده و براساس طبقه‌بندی وارنز (۱۹۷۸) اکثریت لغزش‌ها به

لحاظ کلاسه‌بندی از نوع لغزش‌های چرخشی (Rotational Slide) می‌باشند. شکل ۲، نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱. تعیین عامل‌های مؤثر بر زمین لغزش:

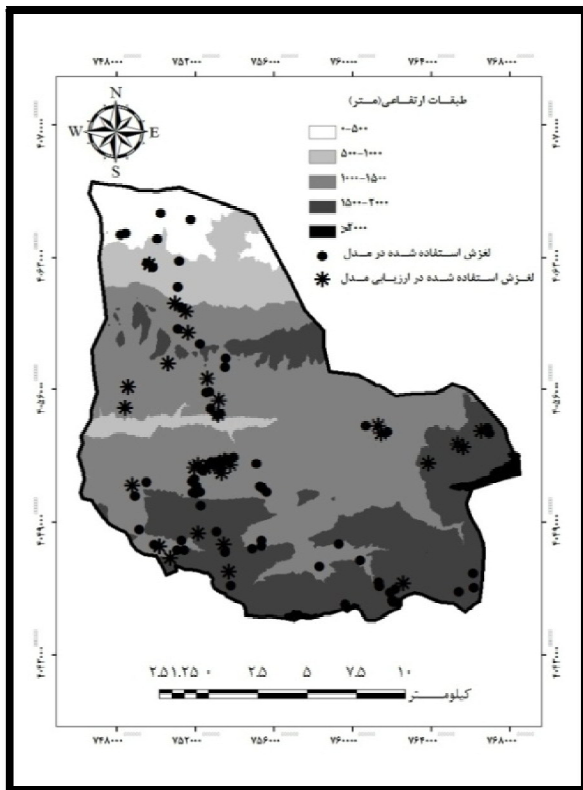
با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، ۹ عامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه تعیین گردیدند که عبارتند از عامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، کاربری اراضی، شکل شیب، فاصله از شبکه آبراه، فاصله از جاده، فاصله از گسل و عامل سنگ‌شناسی. لازم به ذکر است در این پژوهش، تمامی پیکسل‌های سائزهای نقشه‌های تهیه شده و به کار برده شده یکسان بوده و به صورت 10×10 متر می‌باشد. دلیل انتخاب این سائز، به دلیل قدرت تفکیک بالاتر نقشه‌های تهیه شده با این سائز در مقایسه با اندازه پیکسل ۱۵ متر می‌باشد. برای

Frequency Ratio (FR)، سطح همبستگی بین نقاط لغزشی موجود و هر یک از عوامل مؤثر تعیین گردید. برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مشخص، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، درصد پیکسل‌های لغزشی و فاقد لغزش منطقه مورد مطالعه تعیین و نهایتاً نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس‌های مرتبط با آن، از تقسیم نسبت مناطق لغزش (درصد پیکسل‌هایی که در آن لغزش رخ داده) به مناطق فاقد لغزش (درصد پیکسل‌های فاقد لغزش) محاسبه گردید (رابطه ۱) (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$\text{Frequency Ratio} = \frac{A/B}{C/D} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، A تعداد نقاط لغزشی در هر کلاس، B تعداد کل نقاط لغزشی در حوزه آبخیز، C مساحت کلاس هر عامل و D مساحت کل حوزه آبخیز می‌باشد.

به منظور تجزیه و تحلیل‌های فازی، ابتدا وزن‌های به دست آمده از روش نسبت فراوانی، نرمال‌سازی گردیده (بین صفر و یک) و سپس وارد نرم‌افزار Matlab گردید.



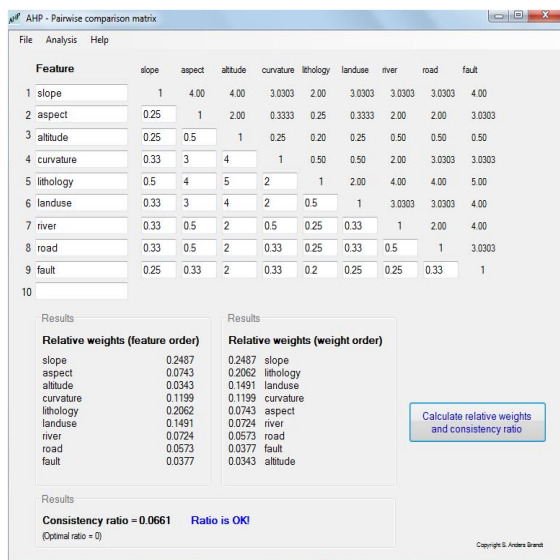
شکل ۲. نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

تهیه نقشه درجه شیب در این پژوهش، از مدل رقومی ارتفاعی (Digital Elevation Model (DEM) با پیکسل سایز ۱۰×۱۰ متر و از رقومی کردن خطوط تراز نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محیط نرم‌افزاری Arc GIS9.3 استفاده گردید. نقشه جهت شیب نیز از روی مدل رقومی ارتفاعی تهیه شد. نقشه ارتفاع از سطح دریا در ۵ کلاس در محیط نرم‌افزاری Arc GIS9.3 با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ترسیم و طبقه‌بندی گردید. نقشه کاربری اراضی نیز از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال ۲۰۱۲ تهیه شده از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، در محیط نرم‌افزار Envi4.5 ترسیم گردید. نقشه شکل شیب نیز از روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی در محیط Arc GIS9.3 به دست آمد. به منظور تهیه نقشه حریم فاصله از شبکه آبراهه، از روی DEM تهیه شده از نقشه توپوگرافی رقومی شده، با استفاده از اکستنشن الحاقی Arc hydro در محیط نرم‌افزار Arc GIS9.3، به دست آمد. نقشه فاصله از گسل و جاده نیز در محیط نرم‌افزار Arc GIS9.3 تهیه گردیدند. به منظور تهیه نقشه سنگ‌شناسی در منطقه مورد مطالعه، نقشه زمین‌شناسی بهشهر و گلوگاه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه و سازندهای محدوده مورد مطالعه بررسی و در محیط نرم‌افزار Arc GIS9.3 رقومی گردیدند. که به دلیل وسعت بالای منطقه و تنوع سازندهای زمین‌شناسی و نیز به منظور سهولت در محاسبات تجزیه و تحلیل‌ها، خصوصیات سنگ‌شناسی براساس نوع لیتولوژی در پنج گروه که دارای مشخصات تقریباً همگنی می‌باشند، تقسیم‌بندی شدند (جدول ۴).

۱-۲-۳. تعیین ارتباط بین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و زمین‌لغزش‌های منطقه:

برای تعیین ارتباط زمین‌لغزش با عوامل مؤثر در وقوع آن و نیز تهیه نقشه پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش در منطقه، پس از تهیه نقشه‌های عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، در محیط Arc GIS با نقشه پراکنش زمین‌لغزش تلفیق گردیدند. آن‌گاه با استفاده از مدل احتمالاتی نسبت فراوانی

انجام می‌شود. در مرحله بعد فرم‌هایی که ضریب ناسازگاری مناسبی داشتند، انتخاب شدند. وزن‌های داده شده در مقایسات زوجی به صورت میانگین هندسی جمع شده و این ماتریس مجدداً به نرم‌افزار مذکور وارد شده و وزن نهایی به دست آمد (فروزانفر، ۱۳۹۲). ضریب ناسازگاری در تحقیق حاضر ۰/۰۶۶۱ به دست آمده که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. وزن عوامل مؤثر و ضریب ناسازگاری به دست آمده

در نرم‌افزار AHP- Pairwise Comparison Matrix

خروجی برنامه به صورت یک فایل متنی (Txt) خواهد بود که در ستون آخر آن، مقدار خطر محاسبه شده را نشان می‌دهد. سپس خروجی را از فرمت Txt به Excel درآورده و به محیط Arc Map منتقل کرده و نقشه پهنه‌بندی حاصل شده است. جهت پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، از توابع عضویت مثلثی Triangular membership (Trimf) استفاده شد.

۲-۲. ارزیابی روش پهنه‌بندی:

از آن‌جا که نمی‌توان جهت ارزیابی کارایی و صحت نقشه خطر زمین‌لغزش، از نقشه پراکنش زمین‌لغزش استفاده کرد (Pourghasemi et al., 2012). جهت حل این مشکل از ۱۰۶ موقعیت لغزشی که در منطقه شناسایی گردید، دو سوم نقاط لغزشی (۷۵ نقطه لغزشی) برای مدل‌سازی و یک سوم نقاط لغزشی (۳۱ نقطه لغزشی) برای کالیبره کردن مدل استفاده شد.

۱-۲-۴. انتقال مقادیر فازی به محیط نرم‌افزار Matlab:

عوامل مورد بررسی و محدوده مربوط به مقادیر فازی هر یک از کلاس‌های این عوامل با توجه نرمال‌سازی انجام شده به روش نسبت فراوانی به برنامه مذکور وارد گردید. لازم به توضیح است که برای سهولت بیشتر در معرفی بازه‌های وزنی هر یک از پارامترها ابتدا از ویرایشگر FIS در محیط نرم‌افزار Matlab 7.1 استفاده گردید. پس از آن بازه محدوده‌های هر یک از زیرگروه‌ها در زیربرنامه Def-fuzzysets وارد گردیده است. سپس با اجرای برنامه اصلی در محیط نرم‌افزار Matlab مقادیر حساسیت محاسبه گردید.

مقادیر ورودی با توجه به متن برنامه در ۹ ستون و به ترتیب درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، حریم فاصله از گسل، حریم فاصله از شبکه آبراهه و حریم فاصله از جاده، و شکل شیب در فایل ورودی با پسوند متنی (txt) قرار گرفته و در صفحه برنامه اصلی (Main) وارد گردیده است. همچنین به منظور تعیین وزن هر یک از عوامل تأثیرگذار در پهنه‌بندی استعداد زمین‌لغزش از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده گردید. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، یک روش نیمه‌کیفی در مطالعه زمین‌لغزش است که شامل یک ماتریس وزن‌دهی بر مبنای مقایسات زوجی بین عامل‌ها بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در وقوع زمین‌لغزش مشخص می‌کند (ناجی، ۱۳۸۵). در این روش، جهت اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر زمین‌لغزش، نقشه‌های تلفیقی با نقشه پراکنش لغزش‌ها به همراه جداول نسبت فراوانی و فرم‌های وزن‌دهی برای ۴ صاحب‌نظر در زمینه زمین‌لغزش و زمین‌شناسی و دو نفر که به طور مستقیم از منطقه بازدید کرده و در تمامی مراحل نمونه‌برداری حضور داشتند، فرستاده شد. در فرم‌های مربوطه، عامل‌های مؤثر به صورت زوجی با توجه به مشخصات منطقه، تحلیل کارشناسی و دقت در تراکم لغزش‌ها وزن‌دهی شده و ماتریس مقایسات زوجی به دست آمد. این ماتریس به نرم‌افزار AHP- Pairwise Comparison Matrix که یک نرم‌افزار مدیریتی است وارد شده و وزن عوامل به دست آمد. این نرم‌افزار ضریب ناسازگاری را به ما می‌دهد که اگر کمتر از ۰/۱ باشد، قابل قبول و در غیر این صورت دوباره مقایسات

(2007)؛ مرادی و همکاران (۱۳۸۹)؛ Jada et al. (2009) مطابقت دارد، اما بیش‌ترین وزن مربوط به کلاس ۳۰-۵۰ درجه می‌باشد. براساس نتایج حاصله وقوع زمین‌لغزش با افزایش شیب تا یک حد خاصی (۳۰-۵۰°) زمین‌لغزش افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. شیب‌های ملایم، به خاطر تنش‌برشی کم‌تر، معمولاً حساسیت کم‌تری به زمین‌لغزش دارند (Yalcinet al., 2011). درحالی که شیب‌های متوسط همراه با دخالت‌های انسانی از قبیل تغییر کاربری اراضی، منجر به حساسیت بیش‌تر این شیب‌ها می‌گردد (Pourghasemi et al., 2013). در مناطق با شیب بالای ۵۰ درجه، هیچ لغزشی مشاهده و ثبت نشده است که می‌توان دلیل آن را رخنمون سنگی و عدم وجود لایه خاک در شیب‌های بالا دانست که با نظرات Mohammady et al. (2007)؛ مرادی و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد.

سپس نقشه به‌دست آمده با نقشه پراکنش زمین‌لغزش مقایسه شد. برای مقایسه طبقه‌های مختلف استعداد از تراکم زمین‌لغزش‌ها یا نسبت تراکمی (DR) در هر یک از کلاس‌های حساسیت استفاده می‌شود. نسبت تراکم با تقسیم نمودن تراکم زمین‌لغزش در رده خطر خاص به میانگین تراکم زمین‌لغزش‌ها بر مبنای تراکم سطحی و یا تعداد زمین‌لغزش محاسبه می‌شود. جمع کیفی (Qs) با رابطه ۲ تعریف می‌گردد (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (DR - 1)^2 * S$$

که در آن، n تعداد رده‌های خطر و S مساحت رده خطر به درصد در منطقه است.

۳. نتایج و بحث:

بررسی عامل درجه شیب (جدول ۱)، نشان می‌دهد با این‌که بیش‌ترین درصد زمین‌لغزش‌ها مربوط به کلاس ۱۵-۳۰ درجه با ۶۷/۶۸ درصد می‌باشد و با نظرات Mohammady et al.

جدول ۱. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل درجه شیب

عامل	کلاس بر حسب درجه	تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش	درصد پیکسل‌های فاقد لغزش	تعداد پیکسل‌های لغزشی	درصد پیکسل‌های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
۱ ۲ ۳ ۴ ۵	۰ - ۵	۲۸۴۰۶۳	۸/۹۳۵	۷	۹/۳۳	۰/۰۴۴	۰/۰۳۷
	۵ - ۱۵	۱۳۰۳۹۴۴	۴۱/۰۱۵	۲۶	۳۴/۶۶	۰/۸۴۵	۰/۷۱۱
	۱۵ - ۳۰	۱۳۳۰۰۴۷	۴۱/۸۳۶	۳۵	۴۶/۶۸	۱/۱۱۶	۰/۹۳۹
	۳۰ - ۵۰	۲۴۹۶۰۳	۷/۸۵۲	۷	۹/۳۳	۱/۱۸۸	۱
	۵۰ <	۱۱۵۱۰	۰/۳۶۲	۰	۰	۰	۰

به جهت‌های شمال‌غربی و شمال می‌باشد که با نتایج قره‌هی و همکاران (۱۳۹۰) و Pourghasemi et al. (2013) مطابقت دارد. در توضیح این مطلب باید بیان نمود که عامل جهت یک عامل غالب برای وقوع زمین‌لغزش محسوب نمی‌گردد. احتمالاً در این مناطق فاکتورهای دیگری به عنوان عامل غالب در وقوع زمین‌لغزش ایفای نقش نموده‌اند، زیرا عامل جهت می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگری نیز قرار گیرد (Pourghasemi et al., 2013).

بررسی عامل جهت شیب (جدول ۲)، نشان داد که شیب‌های شمال‌غربی با ۳۳/۳۳ درصد، بیش‌ترین زمین‌لغزش‌ها را در منطقه دارا هستند. که دلیل این امر را می‌توان به تأثیر رطوبت به عنوان یکی از عامل‌های مؤثر بر وقوع حرکات توده‌ای نسبت داد. حوزه‌آبخیز کرانه‌ی دریای خزر، تحت تأثیر دو سیستم باران‌زای غربی و شمال تا شمال‌غربی بوده که رطوبت بسیاری را برای منطقه مورد مطالعه ایجاد کرده است (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۲). ولی بیش‌ترین وزن مربوط

جدول ۲. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل جهت شیب

عامل	جهت جغرافیایی	تعداد پیکسل های فاقد لغزش	درصد پیکسل های فاقد لغزش	تعداد پیکسل های لغزشی	درصد پیکسل های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
	مسطح	۱۰۱۸۶۶	۳/۲۰۴	۱	۱/۳۴	۰/۴۱۸	۰
	شمال	۳۰۵۹۲۱	۹/۶۲۳	۱۶	۱۳/۳۳	۱/۳۸۵	۱
	شمال شرق	۴۴۵۵۹۸	۱۴/۰۱۶	۸	۱۰/۶۷	۰/۷۶۱	۰/۵۴۹
	شرق	۲۵۴۹۹۵	۸/۰۲۱	۳	۴	۰/۴۹۸	۰/۳۵۹
جهت شیب	جنوب شرق	۲۵۲۶۸۷	۷/۹۴۸	۵	۶/۶۷	۰/۸۳۹	۰/۶۰۶
	جنوب	۲۷۷۲۱۹	۸/۷۲۱	۳	۴	۰/۴۵۸	۰/۳۳
	جنوب غرب	۲۷۸۵۲۶	۸/۷۶۱	۵	۶/۶۷	۰/۷۶۱	۰/۵۴۹
	غرب	۴۰۰۰۵۳	۱۲/۵۸۳	۱۰	۱۳/۳۳	۱/۰۵۹	۰/۷۶۵
	شمال غرب	۸۶۲۳۰۲	۲۷/۱۲۳	۲۵	۳۳/۳۳	۱/۲۲۸	۰/۸۸۶

بررسی عامل ارتفاع از سطح دریا (جدول ۳)، نشان می‌دهد که کلاس ارتفاعی، ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر با ۶۵/۳۳ درصد زمین لغزش‌ها، دارای بیشترین تعداد زمین لغزش‌ها و بیشترین وزن می‌باشد. اما در ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر، هیچ لغزشی مشاهده و ثبت نشده است که بیانگر کاهش استعداد خطر زمین لغزش با افزایش ارتفاع می‌باشد. اگرچه پاچاری و پانت Pachauri & Pan (۱۹۹۲)، معتقدند که هر چه ارتفاع بیشتر شود، استعداد خطر زمین لغزش در منطقه بیشتر می‌شود که علت آن را می‌توان افزایش نزولات به صورت برف، ماندگاری بیشتر آن و تسریع عمل یخبندان و ذوب در ارتفاعات بالا دانست (ایلانلو و همکاران، ۱۳۸۹). اما چنانچه در ارتفاعات بالا، فراوانی لغزش کم‌تر گردد، نشان‌دهنده آن

است که در منطقه عوامل دیگری مانند لیتولوژی مقاوم به لغزش در منطقه می‌باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹). علی‌رغم آن که در ارتفاعات بالا فرآیند هوازدگی سنگ در نتیجه پدیده ذوب-انجماد غالب است، اما هرچه ارتفاع کم‌تر شود خاک‌ها عمیق و تکامل یافته‌تر بوده و در نتیجه این مناطق برای وقوع زمین لغزش مساعدتر می‌باشند. در منطقه مورد مطالعه نیز با افزایش ارتفاع، استعداد وقوع زمین لغزش کاهش می‌یابد، چون در ارتفاعات بالا، لیتولوژی منطقه پوشیده از سازندهای مقاوم به لغزش بوده که خود به نحوی مانع از وقوع لغزش در این ارتفاعات گردیده است که با نظرات مرادی و همکاران (۱۳۸۹)؛ پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱)؛ فروزانفر (۱۳۹۲) مطابقت دارد.

جدول ۳. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل ارتفاع از سطح دریا

عامل	کلاس بر حسب متر	تعداد پیکسل های فاقد لغزش	درصد پیکسل های فاقد لغزش	تعداد پیکسل های لغزشی	درصد پیکسل های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
	۰-۵۰۰	۲۰۴۰۴۲	۶/۴۱۸	۴	۵/۳۳	۰/۸۳۰	۰/۶۶۱
ارتفاع از سطح دریا	۵۰۰-۱۰۰۰	۳۴۸۴۹۰	۱۰/۹۶۱	۵	۶/۶۶	۰/۶۰۷	۰/۴۸۳
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۶۵۴۰۵۲	۵۲/۰۲	۴۹	۶۵/۳۳	۱/۲۵۶	۱
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۹۴۸۷۵۱	۲۹/۸۴۳	۱۷	۲۲/۶۸	۰/۷۶۰	۰/۶۰۵
	۲۰۰۰<	۲۳۸۳۲	۰/۷۵۸	۰	۰	۰	۰

بررسی لیتولوژی حوزه (جدول ۴)، نشان داده است که بیشترین وزن برای عامل سنگ‌شناسی، مربوط به گروه ۱ (با ۴۹/۲۹ درصد) می‌باشد که شامل شیل، مارن، ماسه سنگ، گرانیت و سنگ آهک می‌باشد. این در حالی است که

بیشترین درصد زمین لغزش‌های رخ داده در واحدهای سنگ‌شناسی لای سنگ با ساخت متقاطع و سازند لالون (کنگولومرا) (کلاس ۵ با ۳۳/۳۳ درصد) می‌باشد که با نظرات ناجی (۱۳۸۵) و پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد.

جدول ۴. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل سنگ‌شناسی

عامل	گروه‌های سنگ‌شناسی	تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش	درصد پیکسل‌های فاقد لغزش	تعداد پیکسل‌های لغزشی	درصد پیکسل‌های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
گروه‌های سنگ‌شناسی	گروه ۱	۱۵۶۷۰۲۷	۴۹/۲۹	۱۹	۲۵/۳۴	۰/۵۱۴	۰/۲۸۴
	گروه ۲	۲۶۷۸۵۳	۸/۴۲۵	۳	۴	۰/۴۷۵	۰
	گروه ۳	۵۱۵۲۸۱	۱۶/۲۰	۲۲	۲۹/۳۳	۱/۸۱	۱
	گروه ۴	۲۴۱۴۲۶	۷/۵۹۴	۶	۸	۱/۰۵۳	۰/۵۸۲
	گروه ۵	۵۸۷۵۸۰	۱۸/۴۸۲	۲۵	۳۳/۳۳	۱/۸۰۳	۰/۹۹۶

گروه ۱ لایه سنگ‌شناسی، مارن، شیل، ماسه سنگ، گرانیت، اندکی دگرگون شده، سنگ آهک، سازند لار (G, J1, J5)

گروه ۲ لایه سنگ‌شناسی، سنگ‌های ولکانیک با ترکیب متوسط تا بازی و دگرگونی، کنگلومرا (Pzc, V1)

گروه ۳ لایه سنگ‌شناسی، سنگ آهک، کرتاسه، بهمن سنگی، آبرفت و لس (Qt2, Qal, Qrs, Qra, Qt1)

گروه ۴ لایه سنگ‌شناسی، سنگ آهک، کرتاسه، دگرگونی، فیلیت، مارن، کرتاسه، کالکارنایت (آهکی و مارنی)، کالکارنایت (K1, K2, K1, Pzph, Pzsl, Mmsl)

گروه ۵ لایه سنگ‌شناسی، لای سنگ با ساخت متقاطع، سازند لالون (کنگلومرا) (Mc, Plcs)

پوشش کاربری مرتع در مقایسه با دیگر کاربری‌های موجود، قابل قیاس نبوده و عمدتاً در بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که دیگر عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش نیز فراهم می‌باشند.

بررسی عامل کاربری اراضی (جدول ۵)، نشان می‌دهد که ۷۴/۶۷ درصد لغزش‌های منطقه در اراضی مرتعی که ۷۲/۱۷ درصد سطح منطقه را به خود اختصاص داده، به وقوع پیوسته است که دلیل آن را می‌توان به وسعت بالای این نوع کاربری (۷۲/۱۷) درصد در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. سطح تحت

جدول ۵. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل کاربری اراضی

عامل	نوع کاربری	تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش	درصد پیکسل‌های فاقد لغزش	تعداد پیکسل‌های لغزشی	درصد پیکسل‌های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
کاربری اراضی	مرتع	۲۲۹۴۶۱۵	۷۲/۱۷	۵۶	۷۴/۶۷	۱/۰۳۵	۰/۱۹۶
	مناطق مسکونی	۱۶۰۵۷۹	۵/۰۵۱	۴	۵/۳۳	۱/۰۵۵	۰/۲
	اراضی زراعی و باغات	۲۳۶۷۹	۰/۷۵۹	۳	۴	۵/۲۷	۱
	جنگل	۷۰۰۲۹۴	۲۲/۰۲	۱۲	۱۶	۰/۷۲۶	۰

بررسی عامل فاصله از گسل (جدول ۶)، نشان داده که بیش‌ترین درصد زمین‌لغزش‌ها (۶۵/۳۴ درصد) و بیش‌ترین وزن (با ۵۷/۴۹ درصد) مربوط به فاصله بیش‌تر از ۶۰۰ متر می‌باشد. که با نتایج مطالعات (Pourghasemi et al., 2012; Mezughi et al., 2011; Devkota et al., 2013) مطابقت دارد. بررسی نتایج فاصله از گسل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از گسل، حساسیت منطقه به وقوع زمین‌لغزش بیش‌تر می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که پدیده گسل یکی از مهم‌ترین عوامل تکتونیکی است که به‌طور بالقوه می‌تواند دامنه‌ها را حساس نماید. بر همین اساس در اغلب مطالعات بررسی ناپایداری دامنه‌ها، عامل گسل به عنوان یک عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما برخی از این عوامل تحت تأثیر فاکتورهای دیگر تحلیل رفته و یا حالت تشدیدکنندگی را برای وقوع لغزش را ایجاد می‌کنند. در منطقه مورد مطالعه نشان داده شد که گسل به‌عنوان عامل اصلی وقوع زمین‌لغزش ایفاء نقش ننموده و عوامل دیگر باعث کم‌رنگی فاکتور فاصله از گسل در وقوع زمین‌لغزش شده‌اند.

بررسی عامل فاصله از شبکه آبراهه (جدول ۷)، نشان داده است که بیش‌ترین درصد زمین‌لغزش‌ها (با ۲۹/۳۳ درصد) و بیش‌ترین وزن (با ۴۲/۱۲ درصد) مربوط به فاصله بیش‌تر از ۴۰۰ متر می‌باشد که با نظرات پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) و Devkota et al., (2013) مطابقت دارد. آبراهه‌ها بر اثر فرسایش رودخانه‌ای و سایش دیواره کنار رودخانه باعث به هم خوردن تعادل شیب و در نتیجه ناپایداری دامنه‌های مشرف به رودخانه می‌گردند.

جدول ۶. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل فاصله از گسل

عامل	کلاس بر حسب متر	تعداد پیکسل های فاقد لغزش	درصد پیکسل های فاقد لغزش	تعداد پیکسل های لغزشی	درصد پیکسل های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
فاصله از گسل	۰ - ۲۰۰	۵۰۱۱۲۰	۱۵/۷۶	۸	۱۰/۶۶	۰/۶۷۶	۰
	۲۰۰ - ۴۰۰	۴۶۱۳۸۶	۱۴/۵۲	۸	۱۰/۶۶	۰/۷۳۴	۰/۶۴۴
	۴۰۰ - ۶۰۰	۳۸۸۷۹۴	۱۲/۲۳	۱۰	۱۳/۳۴	۱/۰۹	۰/۹۵۶
	۶۰۰ <	۱۸۲۷۸۶۷	۵۷/۴۹	۴۹	۶۵/۳۴	۱/۱۴	۱

جدول ۷. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل فاصله از شبکه آبراهه

عامل	کلاس بر حسب متر	تعداد پیکسل های فاقد لغزش	درصد پیکسل های فاقد لغزش	تعداد پیکسل های لغزشی	درصد پیکسل های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
فاصله از شبکه آبراهه	۰ - ۱۰۰	۴۳۸۷۶۹	۱۳/۸۰	۲۰	۲۶/۶۷	۱/۹۳۳	۱
	۱۰۰ - ۲۰۰	۷۶۸۳۶۶	۲۴/۱۷	۱۸	۲۴	۰/۹۹۳	۰/۵۱۴
	۲۰۰ - ۳۰۰	۳۳۶۵۴۲	۱۰/۵۸	۷	۹/۳۳	۰/۸۸۲	۰/۴۵۶
	۳۰۰ - ۴۰۰	۲۹۶۵۱۰	۹/۳۳	۸	۱۰/۶۷	۱/۱۴۴	۰/۵۹۲
	۴۰۰ <	۱۳۳۸۹۸۰	۴۲/۱۲	۲۲	۲۹/۳۳	۰/۶۹۶	۰

دارد. عواملی چون عدم انتخاب مناسب مکان‌های ساخت جاده، عدم دادن شیب مناسب و در نهایت عدم بکارگیری یا قراردادن زهکش‌های مناسب در جاده که منجر به عدم عبور آب حاصل از بارش در سطح جاده می‌شود را از عوامل مؤثر در وجود لغزش‌ها در اطراف جاده‌ها می‌توان دانست.

بررسی عامل فاصله از جاده (جدول ۸)، نشان داده که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله ۱۰۰-۰ متر با ۲۵/۳۴ درصد می‌باشد با این حال بیشترین وزن در محاسبات به کلاس بیشتر از ۵۰۰ متر با ۲۵/۳۹ درصد اختصاص داده شده است. که با نتایج مطالعات (Pourghasemi et al., 2012) مطابقت

جدول ۸. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل فاصله از جاده

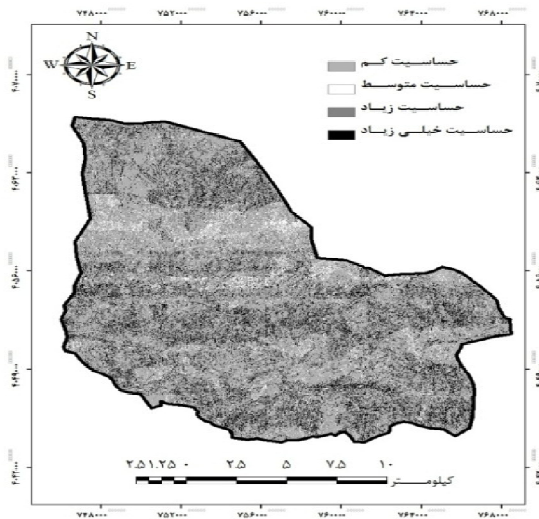
عامل	کلاس بر حسب متر	تعداد پیکسل های فاقد لغزش	درصد پیکسل های فاقد لغزش	تعداد پیکسل های لغزشی	درصد پیکسل های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
فاصله از جاده	۰ - ۱۰۰	۷۱۴۴۶۹	۲۲/۴۷	۱۹	۲۵/۳۴	۱/۱۲۸	۰/۹۰۹
	۱۰۰ - ۲۰۰	۵۸۲۲۴۹	۱۸/۳۲	۱۷	۲۲/۶۶	۱/۲۴	۱
	۲۰۰ - ۳۰۰	۴۶۴۱۶۳	۱۴/۶۰	۱۲	۱۶	۱/۰۹۶	۰/۸۸۴
	۳۰۰ - ۴۰۰	۳۵۳۴۴۹	۱۱/۱۲	۴	۵/۳۴	۰/۴۸۰	۰
	۴۰۰ - ۵۰۰	۲۵۷۴۸۳	۸/۱۰	۵	۶/۶۶	۰/۸۲۲	۰/۶۶۳
	۵۰۰ <	۸۰۷۳۵۴	۲۵/۳۹	۱۸	۲۴	۰/۹۴۵	۰/۷۶۲

می‌توان تأثیر تکرار اتساع و انقباض دامنه‌های محدب در زمان بارش‌های سنگین و تأثیر کم نگهداری جانبی توسط مواد دو طرف دامنه لغزشی دانست.

همچنین نتایج به دست آمده از بررسی شکل شیب دامنه‌ها در منطقه (جدول ۹)، بیانگر ناپایداری بیشتر شیب‌های محدب در مقایسه با شیب‌های مقعر می‌باشد که با نتایج مطالعه فروزانفر و (Lee et al., 2012) (۱۳۹۲) مطابقت دارد. که دلیل آن را

جدول ۹. مقادیر عضویت فازی مربوط عامل شکل شیب

عامل	نوع شکل شیب	تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش	درصد پیکسل‌های فاقد لغزش	تعداد پیکسل‌های لغزشی	درصد پیکسل‌های لغزشی	نسبت فراوانی	مقادیر عضویت فازی
	مقعر	۴۸۲۳۹۴	۱۵/۱۷	۱۷	۲۲/۶۷	۱/۴۹۴	۱
شکل شیب	مسطح	۱۲۱۳۸۰۰	۳۸/۱۸	۲۴	۳۲	۰/۸۳۸	۰
	محدب	۱۴۸۲۹۷۳	۴۶/۶۵	۳۴	۴۵/۳۳	۰/۹۷۲	۰/۶۵۱



شکل ۴. نقشه استعداد زمین لغزش با استفاده از تابع عضویت مثلثی

نتیجه پهنه‌بندی استعداد زمین لغزش با استفاده از منطق‌فازی و تابع عضویت مثلثی، در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داده که به ترتیب ۳۲/۲۶، ۱۶/۱۳، ۱۶/۱۳ و ۳۵/۴۸ درصد از لغزش‌های اتفاق افتاده در کلاس‌های استعداد کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. نتایج ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی استعداد زمین لغزش به روش منطق‌فازی با استفاده از عامل نسبت تراکمی و شاخص جمع کیفی در جدول ۱۰ ارائه شده است. توجه در نتایج حاصله نشان می‌دهد نقشه تهیه شده در روش منطق‌فازی دارای QS برابر با ۰/۴۱۴۸ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نقشه پهنه‌بندی استعداد وقوع زمین لغزش تهیه شده با تابع عضویت مثلثی، دارای صحت و دقت بالایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با نتایج ناجی (۱۳۸۵)؛ پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد.

جدول ۱۰. ارزیابی نقشه استعداد زمین لغزش با استفاده از تابع عضویت مثلثی

کلاس	مساحت (به درصد)	تعداد زمین لغزش (به درصد)	نسبت تراکمی (DR)	مقدار جمع کیفی (QS)
استعداد کم	۵۷/۴۲	۳۲/۲۶	۰/۵۶۲	۰/۱۱۰
استعداد متوسط	۸/۴۱	۱۶/۱۳	۱/۹۱۸	۰/۰۷۰۸
استعداد زیاد	۱۸/۰۵	۱۶/۱۳	۰/۸۹۴	۰/۰۰۲۰۳
استعداد خیلی زیاد	۱۶/۱۲	۳۵/۴۸	۲/۲۰۱	۰/۲۳۲
			مجموع	۰/۴۱۴۸

۴) نتیجه‌گیری و جمع‌بندی:

هدف از تحقیق حاضر تهیه نقشه استعداد زمین لغزش با استفاده از منطق‌فازی در بخشی از حوزه آبخیز نکارود است. به این منظور پس از تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه، لایه‌های اطلاعاتی درجه‌شیب، جهت شیب، شکل شیب، ارتفاع از سطح دریا، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از شبکه آبراهه به

عنوان عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش شناسایی گردید. به منظور وزن‌دهی کلاس‌های هر یک از عوامل از روش نسبت فراوانی استفاده و وزن‌های به‌دست آمده نرمال‌سازی شده، به محیط نرم‌افزار Matlab منتقل گردید. در تحقیق حاضر از الگوریتم فازی و تابع عضویت مثلثی برای پهنه‌بندی استعداد زمین لغزش استفاده گردید. ارزیابی مدل مذکور با استفاده از روش نسبت تراکمی و ۳۰ درصد نقاط لغزشی نشان داد که

لغزشی جدید را ثبت کرده و به منظور تأیید بهتر مدل‌های ارائه شده استفاده گردد؛

✓ بررسی میزان خسارت عوامل مختلف در معرض خطر و تهیه نقشه ریسک زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، ضروری می‌باشد.

✓ پیشنهاد می‌شود که پس از مطالعات پهنه‌بندی با روش‌های مختلف، برخی از لغزش‌ها که به لحاظ اقتصادی و اجتماعی، مهم‌تر هستند، با روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی به صورت انفرادی مورد بررسی قرار گیرند؛

✓ با توجه به این‌که درجه شیب، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی جزء مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشند، عمده کارهای پیشگیری در منطقه باید در جهت جلوگیری از ساخت و ساز که سبب افزایش بار بر روی سازندهای حساس به زمین‌لغزش می‌شود و نیز پایدارسازی شیب‌ها انجام گیرد؛

✓ با توجه به تأثیر بالای جاده‌سازی غیراصولی و تخریب جنگل‌ها و نیز احداث معادن غیراصولی در وقوع زمین‌لغزش‌ها و برای پیشگیری از اثرات مخرب آن توصیه می‌شود، از کارشناسان منابع طبیعی در هنگام طراحی و احداث جاده‌ها و معادن و بخصوص احداث جاده‌های جنگلی بهره‌مند شوند؛

✓ لازم است برنامه آموزشی و ترویجی جهت اطلاع‌رسانی همگانی در منطقه اجرا گردد.

دقت مدل تهیه شده بر اساس شاخص‌جمع کیفی ۰/۴۱۴۸ دارای دقت و صحت بالایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که نقشه مذکور می‌تواند نقشه به‌سزایی در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت دامنه‌های خطرناک و آمایش سرزمین در منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

با توجه به فضای گسترده مطالعاتی و اجرایی در زمینه بررسی زمین‌لغزش‌ها، در حوزه آبخیز نکارود به دلیل بکر بودن این منطقه از این نظر؛ پیشنهاد می‌شود در رابطه با پیش‌گیری و مقابله با این پدیده، اقدامات ذیل صورت گیرد:

✓ استفاده از روش‌های مختلف و جدید در پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش از قبیل روش‌های روش‌های داده‌کاوی همچون شاخص آنتروپی شانون، جنگل تصادفی، سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی، ماشین بردار پشتیبان؛

✓ با توجه به عدم وجود استاندارد مشخص در تعداد عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در مناطق مختلف و برای دستیابی به نتایج با دقت و صحت بالاتر پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی نقش عوامل محرکی چون زمین‌لرزه، ذوب برف، بافت و نوع خاک و آب زیرزمینی در نظر گرفته شود؛

✓ جهت ارزیابی دقیق‌تر مدل‌های تهیه شده پیشنهاد می‌شود بعد از ۱ تا ۳ سال دوباره به منطقه مورد مطالعه رفته، نقاط

منابع

- ایلانلو، م.، مقیمی، ا.، ثروتی، م. ر.، قهروردی تالی، م.، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای با استفاده از روش منطق‌فازی: مطالعه موردی، حوزه آبریز سیرا: مجله چشم‌انداز جغرافیایی، ۵(۱۱): ۲۶-۱۲.
- بهنیا، ا.، منصوری، د. م.، کهربائیان، پ.، ۱۳۸۹. کاربرد مدل AHP و منطق‌فازی در منطقه‌بندی خطرات زمین‌لغزش: مطالعه موردی، حوضه آبخیز فریزی، دامنه‌های شمالی کوه‌های بینالود: فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال سوم، ۹(۲): ۱۰۰-۸۹.
- پورقاسمی، ح. ر.، مرادی، ح. ر.، محمدی، م.، مصطفی‌زاده، ر.، گلی جیرنده، ع.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بی‌زین: مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، منابع آب و خاک، ۱۶(۶۲): ۱۲۲-۱۰۹.
- کامیاد، ع. و.، طارقیان، ح. ر.، ترجمه کتاب مقدمه‌ای بر منطق‌فازی برای کاربردهای عملی آن (نویسنده: تاناکا)، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۲۱۳.

فروزانفر، م.، ۱۳۹۲. تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی: مطالعه موردی، بخشی از حوزه آبخیز تالار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ص ۳۱.

قرهی، ح.، بهلولی، ب.، سیار، ا.، شریعت جعفری، م.، ۱۳۹۰. تهیه نقشه حساسیت پدیده زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدل آماری دومتغیره در مخزن سد البرز: مجله علوم زمین، ۸۱(۲): ۹۳-۱۰۰.

متکان، ع. ا.، سمیعا، ج.، پورعلی، ح.، صفایی، م.، ۱۳۸۸. مدل‌های منطق‌فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز لاجیم: فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۴(۳): ۳۱۸-۳۲۵.

مرادی، ح. ر.، پورقاسمی، ح. ر.، محمدی، م.، مهدویفر، م. ر.، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما: مطالعه موردی، حوزه آبخیز هراز: مجله علوم محیطی، ۷(۴): ۱۲۹-۱۴۲.

ناجی، س.، ۱۳۸۵. پهنه‌بندی خطر لغزش در محور ساری-کیاسر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۸۶.

Akgun, A., Sezar, A. E., Nefesliglu, H. A., Gokceoglu, C., Pradhan, B., 2012. An Easy – to- Use MATLAB Program (Mamland) for the Assessment of Landslide Susceptibility Using a Mamdani Fuzzy Algorithm: Computers and Geosciences, 38(5):23- 34.

Devkota, K. C., Deep Regmi, A., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., Dehital, M. R., Althuwaynee, O. F., 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya: Nat Hazards 65:135–165.

Gemitzi, A., Falalakis, G., Eskioglou, P., Petalas, C., 2011. Evaluating Landslide Susceptibility Using Environmental Factors, Fuzzy Membership Functions and GIS: Global NEST Journal, 13(1):28-40.

Jadda, m., Shafri, Z. M., Mansor, S. B., Sharifikia, M., Pirasteh, S., 2009. Landslide Susceptibility Evaluation and Factor Effect Analysis Using Probabilistic-Frequency Ratio Model: European Journal of Scientific Research, 33(4): 654-666.

Lee, S., Hwang, J., Park, I., 2012. Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea: Catena 100:15–30.

Mezoghi, T.H., Akhir, J., Rafek, A. GH., Abdullah, E., 2011. Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway(Gerik-Jeli): American Journal of Environmental Sciences, 7 (1): 43-50.

Mohammadi, M., Moradi, H.R., Pourghasemi, H.R. and Davodi, M., 2007. Investigation of natural slopes instability and its application to land use planning using GIS, The first national meeting land use planning, Hamedan University Azad, 91-92.

Pachauri, A.K., and Pant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes: Engineering Geology, 32(8): 81-100.

Pourghasemi, H. R., Goli Jirandeh, A., Pradhan, B., Xu, C., and Gokceoglu, C., 2013. Landslide Susceptibility Mapping Using Support Vector Machine and GIS: Journal of Earth System Science, 122(2): 349-369.

Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., 2012. Application of Fuzzy Logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) to Landslide Susceptibility Mapping at Haraz Watershed, Iran: Natural Hazards, 63(2):965-996.

Pradhan, B., Buchroithner, M., 2012. Detection, modelling early warning and mitigation Using Geoinformation, Technology: Springer, 5(2): 23 – 49.

Sharifi, R., Uromeihy, A., Ghorashi, M., 2011. Fuzzy logic model in landslide hazard zonation based on expert judgment: International Journal of Fundamental Physical Sciences, 1(4):95-98.

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C., 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 Trabzo, NE Turkey: Catena, 25(2): 120-135.