

ارزیابی کارایی روش‌های نسبت فراوانی، آماری دو متغیره Wf و Wi در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز وازرود مازندران)

کریم سلیمانی^۱، جلال زندی^{۲*} و محمود حبیب‌نژاد روشن^۱

^۱استاد، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران
^۲دانشجوی دکترا، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۱۵

چکیده

در طی چنددهه اخیر، پژوهشگران زیادی نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش را با استفاده از روش‌های مختلف شامل روش‌های احتمالاتی (نسبت فراوانی)، تحلیل سلسله مراتبی، دو متغیره و چند متغیره، رگرسیون لجستیک، منطق فازی و شبکه‌های عصب مصنوعی تهیه کرده‌اند. هدف از این مطالعه ارزیابی حساسیت به رخداد زمین لغزش حوزه آبخیز وازرود واقع در استان مازندران است که با استفاده از سه روش نسبت فراوانی (FR)، دو متغیره آماری ارزش اطلاعاتی (Wi) و وزن‌دهی به فاکتورها (Wf)، و با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های سنجش از دور به انجام رسید. حوزه آبخیز کوهستانی وازرود حساسیت زیادی به رخداد زمین لغزش داشته و تاکنون خسارات متعددی ایجاد کرده است و تهدیدهای آن در آینده ادامه دارد. برای کاهش خسارات این پدیده، ارزیابی علمی این نواحی حساس به رخداد زمین لغزش ضرورت دارد. بنابراین، نواحی حساس به رخداد زمین لغزش با استفاده از سه روش پهنه‌بندی، شناسایی و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این سه روش با استفاده از سطح زیر منحنی ویژگی‌های عامل نسبی (ROC) مورد اعتبارسنجی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فرایند اعتبارسنجی نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی ROC در روش وزن‌دهی به فاکتورها (Wf) برابر با ۰/۹۶۲ همراه با خطای استاندارد ۰/۰۰۲ بوده و نسبت به دیگر روش‌ها، پیش‌بینی بهتری در رخداد زمین لغزش‌ها داشته است.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، روش نسبت فراوانی، روش دو متغیره، GIS.

***نویسنده مسئول:** جلال زندی

Email: jalal.zandi2010@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

تبادل دامنه‌ها، چرای بی‌رویه مراتع و احداث معادن سبب شده است که دامنه‌ها به شدت ناپایدار شوند، بنابراین ضروری است به شناخت و بررسی دقیق آنها پرداخته شود و نسبت به ممیزی دامنه‌ها از نظر درجه ثبات و پایداری برای احداث مناطق مسکونی اقدام جدی به عمل آید (Srivastava et al., 2010). حوضه آبخیز وازرود نمونه‌ای بارز از رخداد خسارات نامبرده است.

شیرانی و همکاران (۱۳۸۴) در بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دو متغیره و چندمتغیره به این نتیجه رسیده‌اند که روش‌های دو متغیره آنالیز ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح نسبت به دیگر روش‌های آماری چندمتغیره دارای دقت قابل قبولی بوده و انطباق بیشتری با پتانسیل لغزش منطقه داشته است. فاطمی عقدا و همکاران (۱۳۸۲) در ارزیابی روش‌های آماری در تعیین پتانسیل خطر زمین لغزش در منطقه رودبار به این نتیجه رسیده‌اند که از بین روش‌های آماری، روش دو متغیره تراکم سطح نتایج بهتری را نشان می‌دهد. پورعلی (۱۳۸۲) پهنه‌بندی مناطق خطر زمین لغزش در حوضه آبریز کوه‌رنگ را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور بررسی کرده است و از دو روش ارزش اطلاعاتی و مجموعه‌های فازی برای انجام تجزیه و تحلیل استفاده کرد. وی مدل گامای فازی ۰/۲ را برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه به عنوان بهترین مدل انتخاب کرد. متکان و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از شبکه استنتاج فازی و روش‌های سنجش از دور و GIS در حوضه آبخیز لاجیم مازندران مناطق امن و خطرناک رخداد زمین لغزش را شناسایی کردند. ایشان وزن متغیرهای مؤثر برای استخراج توابع عضویت فازی را با روش نسبت فراوانی در هر کلاس محاسبه کرده‌اند و نتیجه گرفتند که کاربری اراضی بیشترین وزن را داشته و مهم‌ترین عامل بوده است. (Yalcin et al., 2011). مقایسه‌ای مبتنی بر GIS بین روش‌های مختلف تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش مانند روش‌های نسبت فراوانی، تحلیل سلسله مراتبی، آماری دو متغیره (Wi)، وزن‌دهی به فاکتورها (Wf) و رگرسیون لجستیک انجام دادند و با نقشه زمین لغزش‌ها با ۵۰ ناحیه لغزشی فعال مقایسه کردند. نتایج حاکی از این بود که روش آماری دو متغیره (Wf) بیشترین

زمین لغزش‌ها از عمده‌ترین پدیده‌های مورفوتیک بوده و نقش مؤثری در تخریب جاده‌های ارتباطی، تخریب مراتع و مناطق مسکونی، فرسایش و ایجاد رسوب حوضه‌های آبخیز دارند (شریعت جعفری، ۱۳۷۵). وجود کوهستان‌های خشن و مرتفع حوضه آبخیز وازرود، سبب شده است که زمین لغزش‌ها در حال حاضر نیز از دینامیک بسیار فعالی برخوردار باشند و روستاهای منطقه را مورد تهدید قرار دهند. شناخت نواحی مستعد لغزش‌ها یکی از گام‌های اولیه در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است. اگرچه زمین لغزش‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی متعددی رخ می‌دهند (کرم و محمودی، ۱۳۸۴)، فاکتورهای تشدیدکننده آن زمین‌لرزه‌ها و بارش‌های سنگین است (Glade et al., 2000). کنترل زمین‌لرزه و بارندگی امکان‌پذیر نیست، بنابراین به منظور کاهش خسارات، شناسایی و پهنه‌بندی نواحی حساس به زمین لغزش ضروری است. در واقع می‌توان با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (LHZ) و اختصاص اقدامات مدیریتی مناسب در نواحی با پتانسیل بالا خسارات وارده را کمتر کرد (Mathew et al., 2007). نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش به روش‌های گوناگونی می‌تواند تهیه شود مانند روش‌های احتمالاتی (نسبت فراوانی)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، دو متغیره، چندمتغیره، رگرسیون لجستیک، منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی. همچنین فاکتورهای مختلفی مانند سنگ‌شناسی، شیب، جهت، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از آبراه، فاصله از جاده، پوشش گیاهی، بارندگی، انحنای دامنه و ... توصیه شده است. میزان اطمینان به نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با کیفیت داده‌ها و روش یا مدل مورد استفاده برای آماده‌سازی نقشه‌ها در ارتباط است (Ayalew & Yamagashi, 2005; Srivastava et al., 2010). امروزه از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به طور گسترده‌ای در آماده‌سازی نقشه‌های LHZ استفاده می‌شود (محمودی و همکاران، ۱۳۸۸; Yalcin et al., 2011). تحلیل توسعه روزافزون راه‌های ارتباطی از کناره‌های دامنه‌های حساس و عدم توجه به ثبات و

لغزش‌های مشاهده‌ای نداشتند از تحلیل‌ها حذف شدند. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی شده با نقشه زمین‌لغزش‌های موجود مقایسه شد و مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

۲-۴. نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها

نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها، موقعیت‌ها و ویژگی‌های زمین‌لغزش‌های گذشته را نشان می‌دهند. این دامنه‌های ناپایدار با شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافیکی و اقلیمی در ارتباط است، بنابراین بیشتر می‌تواند پیش‌بینی موقعیت‌ها و شرایط زمین‌لغزش‌های آینده را تسهیل نماید. بنابراین، جهت پهنه‌بندی نقشه حساسیت به زمین‌لغزش، تعیین دقیق موقعیت نواحی لغزش یافته بسیار مهم است. ارزیابی حساسیت به لغزش در چند فاز اجرا شد. فاز اولیه شناسایی و ارزیابی نواحی حساس به زمین‌لغزش و تهیه نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها است. نقشه‌برداری و فهرست‌بندی زمین‌لغزش‌ها یک نقشه‌برداری سیستماتیک و منظم از زمین‌لغزش‌های موجود در منطقه با استفاده از روش‌هایی همچون مطالعات میدانی، تفسیر عکس‌های هوایی/ماهواره‌ای و زمین‌لغزش‌های ثبت شده در مطالعات پیشین است (Yalcin et al., 2011). نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها توزیع مکانی موقعیت زمین‌لغزش‌های موجود است. در مجموع ۲۴ پلی‌گون لغزشی از زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه توسط مطالعات میدانی و بررسی عکس‌های هوایی و تصویر ماهواره IRS سنجنده P5 (دقت مکانی ۲/۵ متر) و پرسشنامه‌های موجود در اداره منابع طبیعی مازندران تعیین و به صورت پلی‌گون جدا شد. منطقه مورد مطالعه شامل ۱۵۶۹۵۱ سلول رستری با اندازه ۳۰ متر بوده و ۲۳۸۳ سلول رستری زمین‌لغزش‌های فعال منطقه را پوشانده‌اند (شکل ۲).

۲-۵. روش نسبت فراوانی

نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان رخداد لغزش‌ها و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌نماید. در تعیین نرخ نسبت فراوانی، نسبت رخداد لغزش در هر کلاس از فاکتورهای تأثیرگذار نسبت به کل لغزش‌ها به دست آمد و نسبت سطح هر کلاس نسبت به کل مساحت منطقه نیز محاسبه شد. در نهایت، با تقسیم نرخ رخداد لغزش‌ها در هر کلاس بر نرخ مساحت هر کلاس نسبت به کل منطقه مورد مطالعه، نسبت فراوانی کلاس‌های هر فاکتور محاسبه شد. مراحل محاسبه نسبت فراوانی برای هر کلاس از فاکتورهای مؤثر در لغزش در رابطه ۱ آمده است.

$$FR = \frac{(A/B)}{(C/D)} = \frac{E}{F} \quad (1)$$

برای نمونه نسبت فراوانی کلاس ۱ فاکتور جهت شیب به این صورت محاسبه می‌شود (رابطه ۱ و جدول ۱):

$$FR = \frac{(A/B)}{(C/D)} = \frac{E}{F} = \frac{129/600}{103312/620477} = 1.29$$

که در آن A تعداد پیکسل‌های لغزش یافته در کلاس شمالی از جهت شیب (۱۱۸۰ پیکسل)؛ B مجموع پیکسل‌های لغزشی کل حوضه (۲۸۳۸ پیکسل)؛ C تعداد پیکسل‌های کلاس شمالی از فاکتور جهت شیب (۶۳۶۷۲ پیکسل)؛ D تعداد کل پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه است (۱۵۶۹۵۱ پیکسل)؛ E درصد رخداد لغزش در کلاس شمال از جهت شیب (۴۱/۵۸ درصد)؛ F درصد نسبی مساحت کلاس شمال از کل مساحت (۴۰/۵۷ درصد) و FR نسبت فراوانی کلاس شمالی از فاکتور جهت شیب (۱/۰۲) است.

برای به دست آوردن شاخص حساسیت به رخداد لغزش نتایج فاکتورها در محیط GIS با همدیگر جمع شد:

$$LSI = \sum (FR)_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

LSI شاخص پتانسیل رخداد لغزش، FR نسبت فراوانی فاکتور و n مجموع فاکتورهای ورودی است.

نسبت فراوانی فاکتورهای مختلف تأثیرگذار در رخداد لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

صحت را در پیش‌بینی زمین‌لغزش کسب کرده است و پس از آن مدل‌های نسبت فراوانی، AHP، شاخص آماری Wi و رگرسیون لجستیک قرار داشتند.

به طور کلی از سابقه پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد، در صورتی که عوامل مؤثر در هر منطقه با دقت تعیین شوند، از بین روش‌های تجربی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مدل‌های مشخصی مناسب‌تر هستند. در میان روش‌های مختلف پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، روش‌های آماری در اغلب موارد صحت قابل قبولی داشته‌اند (Yalcin et al., 2011؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۸۴؛ شادفر و همکاران، ۱۳۸۷). در نوشتار حاضر نیز از استفاده از سه روش نسبت فراوانی، روش‌های آماری دو متغیره شاخص آماری (Wi) و وزن دهی به فاکتورها (Wf) پهنه‌بندی نواحی حساس به زمین‌لغزش حوزه آبخیز وازرود مورد تجزیه و تحلیل قرار و در نهایت، تحلیلی مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف پهنه‌بندی انجام می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱. ویژگی‌های جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

محدوده حوضه آبخیز وازرود در عرض شمالی ۳۶° ۱۴' ۲۶" تا ۳۶° ۲۵' ۵۴" درجه و طول خاوری ۵۲° ۰۱' ۴۶" تا ۵۲° ۱۲' ۳۰" درجه قرار گرفته است. مساحت این حوضه ۱۴۱۲۳ هکتار، میانگین دمای سالیانه هوا ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثرهای آن ۱۶/۳۰ درجه و متوسط حداقل‌های آن ۴/۹ درجه است. میزان بارندگی سالیانه به‌طور متوسط ۶۰۰ میلی‌متر است. حوضه آبخیز وازرود از نظر تقسیمات کشوری در شهرستان نور استان مازندران و در بخش میانی استان مازندران واقع شده است. شکل ۱ موقعیت استان مازندران و حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲. منابع داده

داده‌های مورد استفاده در این نوشتار شامل: نقشه زمین‌شناسی برگ نور به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای تعیین سازندهای زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای تهیه نقشه‌های ارتفاع، جهت شیب، درجه شیب، شکل شیب، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده، تصاویر ماهواره‌ای IRS سنجنده P5 (دقت مکانی ۲/۵ متر)، عکس‌های هوایی سال ۱۳۸۱ در مقیاس ۱:۴۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، پرسشنامه زمین‌لغزش‌های موجود در اداره منابع طبیعی مازندران برای تهیه نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها و شناسایی سطوح لغزش یافته، تصویر سنجنده TM ماهواره Landsat مربوط به سپتامبر ۲۰۱۰ برای به دست آوردن شاخص NDVI و نقشه خاک‌شناسی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای تعیین بافت خاک که توسط شرکت مهندسی مشاور طبرستان فضا تهیه شده است.

۲-۳. روش مطالعه

در ابتدای امر نقشه فهرست زمین‌لغزش‌های منطقه بر اساس بازدیدهای گسترده میدانی، نقشه فهرست زمین‌لغزش‌های پیشین، داده‌های ماهواره‌ای و تفسیر عکس‌های هوایی تهیه شد. شناخت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عوامل تأثیرگذار در رخداد لغزش‌ها، اولین مرحله مطالعه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است و انتخاب عوامل مهم، نقش زیادی در صحت این نقشه‌ها دارند. در این مطالعه، تعیین این عوامل از راه مصاحبه با افراد بومی و پیمایش‌های مستقیم صحرایی صورت گرفت. پس از بررسی‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه، ده عامل لایه‌های سنگ‌شناسی، شیب، جهت، مقدار شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از آبراهه، بافت خاک، شکل انحنای دامنه، بارندگی، فاصله از جاده و ارتفاع از سطح دریا به عنوان عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد که برای نقشه‌برداری حساسیت به زمین‌لغزش در حوضه آبخیز وازرود با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آماری دو متغیره Wi و Wf مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در ابتدا فاکتورهای فاصله از گسل و شدت فرسایش نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در زمین‌لغزش منطقه تشخیص داده شده بودند، اما چون رابطه معنی‌داری با

شکل شیب می‌تواند در شروع رخداد زمین لغزش تأثیرگذار باشد (Dai & Lee, 2002). در منطقه مورد مطالعه، نسبت تراکم رخداد زمین لغزش شیب‌های با انحنای مقعر بیشتر از شیب‌های مستقیم و محدب است. (Akgun et al., 2012) نیز در مطالعات خود به نتایج مشابهی رسیده بودند.

مهم‌ترین گسیختگی‌ها پس از بارش‌های سنگین و نفوذ آب به داخل ترک و شکاف‌ها رخ می‌دهد (شریعت‌جعفری، ۱۳۷۵). بیشترین تراکم رخداد زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه در مکان‌های با بارندگی میانگین سالانه ۶۸۰ - ۷۸۰ میلی‌متر رخ داده است. نواحی با بارندگی بیش‌تر از این مقدار در بخش‌های پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. در این نواحی به دلیل شرایطی همچون شیب کم و عدم وجود سازندهای حساس به زمین لغزش، از تراکم زمین لغزش‌ها نیز کاسته شده است.

فعالیت‌های انسانی مانند جاده‌سازی نیز از مهم‌ترین عوامل رخداد زمین لغزش در مناطق شیب‌دار به حساب می‌آید (Das et al., 2010). در منطقه مورد مطالعه، طبقات نزدیک جاده بیشترین تراکم رخداد زمین لغزش را داشتند و با افزایش فاصله از جاده از میزان لغزش‌ها کاسته شده است.

نقش ارتفاع از سطح دریا در رخداد زمین لغزش در مطالعات پژوهشگران مختلفی مورد ارزیابی واقع شده است (Nefeslioglu et al., 2010; Akgun et al., 2012). در منطقه مورد مطالعه، ارتفاعات خیلی زیاد، تراکم رخداد زمین لغزش کمتری نشان می‌دهند. بیشتر زمین لغزش‌ها در محدوده ارتفاعی ۸۳۰ تا ۱۳۸۰ متر قرار گرفته‌اند. شکل ۳ نقشه حساسیت به زمین لغزش به روش نسبت فراوانی حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۶. روش آماری دو متغیره (Wi) در پهنه‌بندی زمین لغزش

در روش‌های آماری رابطه پارامتر مؤثر در رخداد زمین لغزش با پراکندگی زمین لغزش‌ها مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد. بر اساس این ارزیابی وزن و سهم مشارکت هر یک از طبقات و واحدهای پارامتر مؤثر در رخداد زمین لغزش محاسبه می‌شود. از جمله روش‌های مشهور در روش آماری دو متغیره روش ارزش اطلاعاتی (Wi) و روش وزن‌دهی به فاکتورها (Wf) است. در این نوشتار، تحلیل حساسیت به زمین لغزش با استفاده از روش‌های آماری دو متغیره ارزش اطلاعاتی (Van Westen, 1997) و روش وزن‌دهی به فاکتورها (Cevik & Topal, 2003) انجام گرفت. بنابراین فاکتورهای زمین‌شناسی، بافت خاک، درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، شکل انحنای دامنه، NDVI، بارندگی، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده مورد استفاده قرار گرفتند.

روش Wi مبتنی بر همبستگی آماری ناشی از همپوشانی میان نقشه فهرست زمین لغزش‌ها و ویژگی‌های نقشه‌های فاکتورهای مختلف مورد بررسی می‌باشد. نتایج همپوشانی (قطع دادن) برای محاسبه تراکم زمین لغزش در هر کلاس وارد محیط نرم‌افزار Excell می‌شود. در این مطالعه، مقادیر Wi برای هر کلاس از پارامترهای مورد استفاده با استفاده از فرمول زیر به صورت کمی به دست آمد (Van Westen, 1997):

$$Wi = \ln \frac{Npix(Si)}{SNpix(Si)} / \ln \frac{Npix(Ni)}{SNpix(Ni)} \quad (3)$$

که در آن Wi وزن مربوط به طبقه مشخص از یک پارامتر، Densclass تراکم زمین لغزش در طبقه مشخص از یک پارامتر، Densmap تراکم زمین لغزش در کل محدوده، NpixSi تعداد سلول‌ها یا مساحت زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در هر طبقه از پارامتر و Npix(Ni) تعداد سلول‌ها یا مساحت کل هر طبقه از پارامتر است.

سپس مقادیر Wi هر طبقه محاسبه شد (جدول ۲). در مورد مقدار عددی وزن‌ها، هر چه عدد منفی‌تر باشد نشان‌دهنده تأثیر کمتر طبقه پارامتر مربوطه در رخداد زمین لغزش است و عدد مثبت‌تر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر است. در نهایت، عملیات همپوشانی بر روی لایه‌ها صورت گرفت و نقشه حساسیت به زمین لغزش به روش (Wi) تهیه شد (شکل ۴).

نتایج تجزیه و تحلیل‌ها این واقعیت را آشکار می‌سازد که فاکتورهایی از مدل که نسبت فراوانی بیشتری دارند، احتمال رخداد لغزش در آنها بیشتر است. تحلیل همبستگی، نسبت سطحی است که زمین لغزش در آن واقع شده نسبت به کل سطح، مقدار نسبت فراوانی ۱ نشان‌دهنده میزان متوسط است. در صورتی که این مقدار بیشتر از ۱ باشد، همبستگی بالایی وجود داشته و کمتر از مقدار ۱ به معنی همبستگی پایین‌تر است (Oh et al., 2011; Ozdemir, 2011). با توجه به نسبت فراوانی کلاس‌های نقشه‌های موضوعی مشخص شد که تراکم رخداد زمین لغزش در جهت شیب‌های شمالی و خاوری بیشتر از دیگر جهت‌هاست که در ارتباط با میزان دریافت نور خورشید کمتر در این دامنه‌هاست. دریافت انرژی خورشیدی کمتر به‌طور ثانویه می‌تواند در میزان رطوبت و نفوذپذیری، پوشش گیاهی، نرخ هوازدگی سنگ‌ها و بالاخره مهیا شدن شرایط لغزش دامنه‌ها تأثیرگذار باشد (جدول ۱).

غالباً تأثیر معنی‌دار سنگ‌شناسی بر رخداد زمین لغزش قابل قبول است زیرا تغییرات سنگ‌شناسی منجر به تفاوت در مقاومت و نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود. نقشه سنگ‌شناسی در منطقه مورد مطالعه به ۶ واحد سنگ‌شناختی متمایز شد. با توجه به واحدهای سنگ‌شناختی منطقه مورد مطالعه، بیشتر زمین لغزش‌ها در سازند شمشک با سنگ‌شناسی تناوب شیل و ماسه‌سنگ زغال‌دار (Js) قرار گرفته‌اند. دیگر سازندهای زمین‌شناسی منطقه حساسیت کمتری به رخداد زمین لغزش از خود نشان دادند. بخش‌های پایینی و بالایی سازند الیکا حساسیت کمی به رخداد زمین لغزش دارند اما در نواحی که به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته بودند (مانند نواحی اطراف روستاها و جاده‌ها) لغزش‌های کمی مشاهده می‌شود. دیگر سازندهای منطقه مورد مطالعه را دولومیت‌های سترلایه تا توده‌ای شکل و سنگ‌های آهکی دولومیتی محکم شامل می‌شوند که آثار لغزش در آنها مشاهده نشد. با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای مشخص شد که مقادیر بسیار کم NDVI (۰/۲) و کمتر) مناظر با خاک لخت و سنگ، مقادیر (۰/۲ - ۰/۳) مناظر با بوته‌های مرتعی، (۰/۳ - ۰/۴۵) نشان‌دهنده پوشش گیاهی مراتع مشجر، (۰/۴۵ تا ۰/۶) نشان‌دهنده جنگل‌های تنک و مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶ مناظر با جنگل‌های انبوه در منطقه مورد مطالعه هستند. بیشتر زمین لغزش‌ها در اراضی مرتعی اطراف روستاهای بالادست حوضه به‌ویژه مراتع روستای نوحه واقع شده‌اند. در اراضی پایین‌دست و جنگلی حوضه، دو پهنه لغزشی بزرگ و فعال مشاهده می‌شود که دلیل لغزش این ناحیه می‌تواند در ارتباط با سازندهای حساس زمین‌شناسی و رطوبت بیشتر ناشی از بارندگی در این ناحیه باشد. در مقادیر بالای NDVI (بالاتر از ۰/۶) لغزش‌های فعال نسبت فراوانی بیشتری دارند (جدول ۱).

عموماً با افزایش مقدار شیب، بر ناپایداری دامنه‌ها افزوده می‌شود. بیشترین تراکم رخداد زمین لغزش‌ها در طبقات شیب منطقه مورد مطالعه، مربوط به شیب‌های ۶ تا ۲۵ درجه است. شیب‌های کمتر و بالاتر از این مقدار نسبت فراوانی کمتری نشان می‌دهند. طبقات شیب بیش از ۲۵ درجه در منطقه مورد مطالعه مربوط به اراضی بالادست و شیب‌های تند صخره‌ای و بدون وجود خاک مناسب برای ایجاد زمین لغزش است. غالباً حرکات توده‌ای از نوع ریزش سنگ در این نواحی مشهود است.

آبراهه‌ها با فرسایش و پاشویی‌های مداوم یا اشباع نواحی پایین‌دست دامنه‌ها تأثیر منفی بر روی پایداری دامنه‌ها می‌گذارند (Dai & Lee, 2002; Yalcin, 2008). در این مطالعه نیز با افزایش طبقات فاصله از آبراهه از فراوانی لغزش‌ها کاسته شده است. از لحاظ خاک‌شناسی، بافت خاک‌های منطقه مورد مطالعه، بررسی و با توجه به اطلاعات نیم‌رخ‌های نقشه اجزای اراضی (معاونت آبخیزداری مازندران، ۱۳۸۷)، به ۴ نوع بافت رسی-لومی، لومی، سیلتی-رسی-لومی و سیلتی-لومی تقسیم شده‌اند. خاک‌های با بافت لومی مستعد به رخداد زمین لغزش بوده و در منطقه مورد مطالعه بیشترین تراکم رخداد زمین لغزش‌ها نیز در این نوع بافت خاک به وقوع پیوسته است (جدول ۱).

۲-۷. روش دو متغیره وزن دهی به فاکتورها (Wf)

روش آماری دو متغیره (Wi) و نسبت فراوانی (FR) به ترتیب با سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹۵۴ و ۰/۹۵۰ همراه با خطای استاندارد ۰/۰۰۲ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۳).

۲-۴. نتایج و مقایسه تحلیل‌ها

نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش با استفاده از سه روش مختلف در محیط GIS تهیه و مساحت و درصد توزیع کلاس‌های حساسیت در هر روش استخراج شد (شکل ۷). نواحی با حساسیت زیاد و خیلی زیاد (کلاس‌های ۴ و ۵) در روش‌های نسبت فراوانی (FR)، آماری دو متغیره (Wi) و وزن دهی به فاکتورها (Wf)، به ترتیب ۸۴/۱۴٪، ۸۶/۵۸٪ و ۸۴/۱۱٪ از زمین لغزش‌های منطقه را شامل می‌شوند. بیشتر زمین لغزش‌های فعال در کلاس حساسیت خیلی زیاد نقشه Wi و پس از آن به ترتیب در روش‌های Wf و FR قرار گرفته‌اند. حدود ۷٪ زمین لغزش‌های فعال در ناحیه کلاس حساسیت کم و خیلی کم نقشه FR واقع شده و این میزان در روش‌های Wi و Wf به ترتیب ۹/۵۶٪ و ۷/۰۵٪ است.

با توجه به کلاس‌های حساسیت به زمین لغزش به دست آمده از روش نسبت فراوانی (FR)، ۱۱/۴۸٪ از منطقه مورد مطالعه حساسیت خیلی کمی به رخداد زمین لغزش داشته و کلاس‌های حساسیت کم، متوسط و زیاد، به ترتیب ۲۶/۴۰٪، ۳۵/۰۱٪ و ۲۲/۱۵٪ از حوضه را شامل می‌شوند. کلاس حساسیت خیلی زیاد مقدار ۴/۹۷٪ از منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. حدود ۶۰٪ نواحی لغزش یافته مشاهده‌ای در این سطح بسیار کم قرار گرفته‌اند (شکل ۷). نقشه حساسیت به زمین لغزش تهیه شده با استفاده از روش آماری دو متغیره Wi، ۲۱/۳۱٪ منطقه مورد مطالعه را در کلاس حساسیت خیلی کم تعیین کرده است. نواحی با حساسیت کم، متوسط و زیاد به ترتیب، ۳۲/۵۸٪، ۱۴/۳۸٪ و ۲۲/۱۹٪ از منطقه را شامل می‌شوند و تنها ۹/۵۵٪ (Wf)، ۲۷/۰۳٪ منطقه در ناحیه با حساسیت خیلی کم قرار گرفته و نواحی با حساسیت کم، متوسط و زیاد، به ترتیب ۲۳/۴۳٪، ۱۸/۳۳٪ و ۲۱/۱۴٪ منطقه را شامل می‌شوند. درصد نواحی با حساسیت خیلی زیاد نیز کم بوده و ۱۰/۰۸٪ از منطقه است. با توجه به نتایج روش Wf مشخص می‌شود که مهمترین فاکتورهای مؤثر در رخداد زمین لغزش منطقه مورد مطالعه به ترتیب بافت خاک، فاصله از جاده، ارتفاع از سطح دریا، زمین شناسی، فاصله از آبراه‌ها و درجه شیب بودند و به دیگر عوامل وزن کمتری اختصاص یافت که به ترتیب اهمیت شامل مقدار بارندگی، مقدار شاخص NDVI، شکل انحنای دامنه و جهت شیب هستند.

۴-۴. بحث و نتیجه‌گیری

دلایل رخداد زمین لغزش بسیار زیاد، پیچیده و گاهی ناشناخته باقی می‌ماند. اگرچه فاکتورهای پایه‌ای مؤثر در رخداد زمین لغزش در طی بازدیدهای میدانی، تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند مشاهده شود اما همچنان برخی از فاکتورها نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین برای بررسی عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش چندین عامل ژئومورفومتریک در تحلیل‌ها دخالت داده می‌شوند. اندازه‌گیری کمی بسیاری از فاکتورهای ژئومورفومتریک به وسیله بازدیدهای میدانی سخت بوده و بنابراین آگاهی از ارتباط آنها در رخداد مکانیسم زمین لغزش مشکل است. از آنجایی که زمین لغزش‌ها در زمره بلایای طبیعی ویرانگر قرار گرفته‌اند، محققان زیادی در سراسر جهان برای ارزیابی خطرات زمین لغزش، تعیین نواحی خطر و نمایش توزیع مکانی آن تلاش کرده‌اند. در این نوشتار، مطالعه جامعی بر روی ارزیابی ناپایداری شیب دامنه انجام گرفت و نقشه خطر زمین لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از سه روش تهیه و مقایساتی بین آنها انجام گرفت. منطقه مورد مطالعه به دلیل بارش زیاد، توپوگرافی شدید و سازندهای حساسی

در روش آماری ارزش اطلاعاتی تأثیر هریک از فاکتورهای مؤثر در رخداد زمین لغزش یکسان در نظر گرفته شده‌اند که نمی‌تواند درست باشد (Oztekin & Topal, 2005)، بنابراین وزن دهی فاکتورها (Wf) به هریک از نقشه پارامترها انجام گرفت. به این منظور، در ابتدا مقادیر Wi هر کلاس پارامتر توسط روش دو متغیره آماری ارزش اطلاعاتی محاسبه شد، سپس تعداد پیکسل‌های لغزش یافته متناظر با هر کلاس در مقدار Wi هر کلاس ضرب شده و مقادیر Wi مربوط به هر پارامتر با همدیگر جمع شد (Twi). با استفاده از مقادیر حداکثر و حداقل هر لایه، نتایج بسط داده شد. در نهایت، وزن فاکتورها بین ۰ تا ۱۰۰ با استفاده از فرمول زیر تعیین شد:

$$Twi = \sum_{i=1}^n Wi \times S_{.pix} \quad (۴)$$

$$Wf = \frac{(Twi) - (\text{Min Twi})}{(\text{Max Twi}) - (\text{Min Twi})} \times 100 \quad (۵)$$

که در آن Twi مقدار مجموع اوزان هر کلاس پارامتر از پیکسل‌های لغزش یافته، n تعداد کلاس پارامتر، Wf وزن فاکتوری محاسبه شده برای هر لایه از نقشه‌های موضوعی، Min Twi کمینه مقدار مجموع اوزان در میان لایه‌ها، Max Twi بیشینه مقدار مجموع اوزان در میان لایه‌ها است.

با استفاده از فرمول یاد شده، مقادیر وزن فاکتورها (Wf) در هر لایه مشخص می‌شود (جدول ۲). مقادیر Wf هر لایه در مقادیر Wi کلاس‌های نقشه‌های موضوعی ضرب شده و در نهایت همه عوامل با همدیگر جمع شده و نقشه حساسیت به زمین لغزش به روش Wf تهیه شد (شکل ۵). با توجه به نتایج روش Wf مشخص شد که مقدار NDVI، مهم‌ترین عامل مؤثر در رخداد زمین لغزش منطقه مورد مطالعه است. نقشه‌های حساسیت به زمین لغزش حوضه آبخیز وازرود با استفاده از سه روش نسبت فراوانی (FR)، آماری دو متغیره ارزش اطلاعاتی (Wi) و فاکتورهای وزن دار شده (Wf) در محیط GIS به دست آمدند. این نقشه‌ها دامنه پیوسته‌ای از مقادیر عددی داشته و برای پهنه‌بندی نواحی خطر، به پنج کلاس بر اساس روش فواصل ژئومتریکی (Geometrical interval) تقسیم‌بندی شد. کلاس‌های خطر عبارتند از: خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد. در نهایت نقشه خطر زمین لغزش به سه روش آماری دو متغیره ارزش اطلاعاتی (Wi) و فاکتورهای وزن دار شده (Wf) و نسبت فراوانی به دست آمد (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

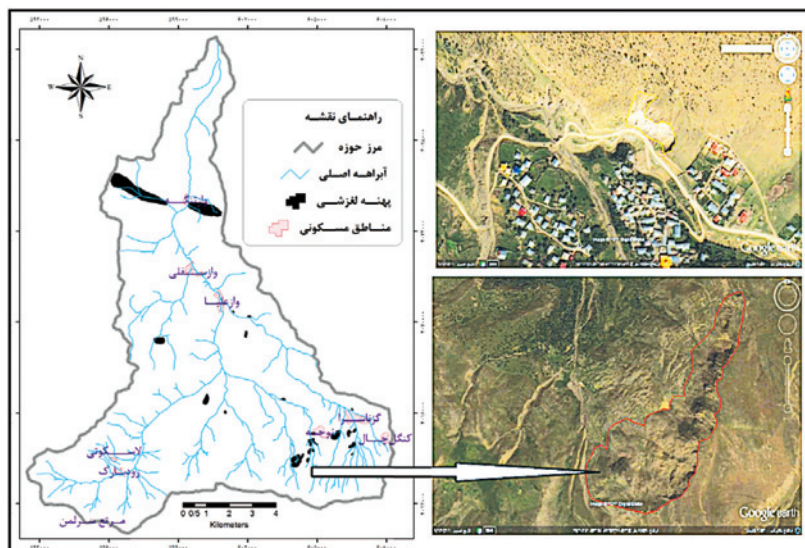
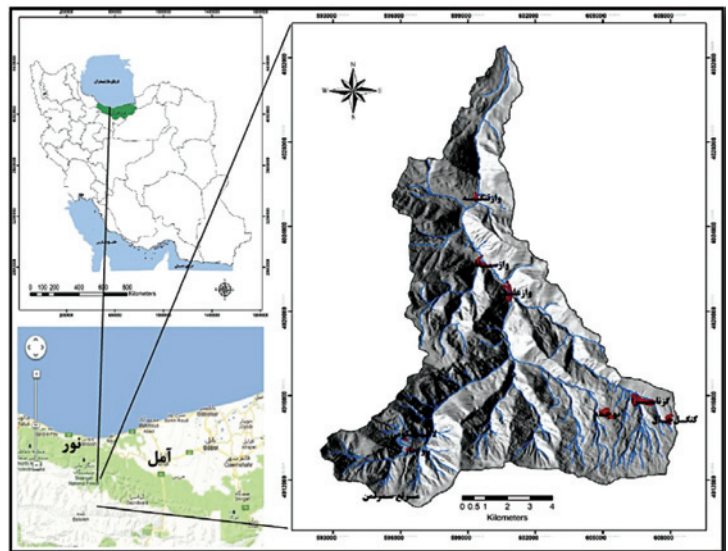
۳-۳. اعتبارسنجی و مقایسه نتایج

آزمایش و اعتبارسنجی نقشه‌های حساسیت تهیه شده در این مطالعه با محاسبه شاخص ویژگی‌های عامل نسبی (ROC) (Relative Operating Characteristics) به دست آمد (Mathew et al., 2007; Oh & Lee, 2010; Oh & Pradhan, 2011; Akgun et al., 2012). در این روش، مساحت زیر منحنی ROC دارای مقادیر بین ۰/۵ تا ۱ بوده و از آن برای ارزیابی دقت مدل استفاده می‌شود (Nandi & Shakoor, 2009). بهترین مدل سطح زیر منحنی نزدیک به ۱ دارد، در حالیکه مقادیر نزدیک به ۰/۵ نشان‌دهنده عدم صحت در مدل است (Fawcett, 2006). برای به کارگیری این روش موقعیت مکانی مجموعه لغزش‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه (۲۸۳۸ پیکسل لغزشی) در برابر ۲۸۳۸ پیکسل تصادفی از منطقه مورد مطالعه (نقاط عدم وجود لغزش) قرار گرفت. توانایی پیش‌بینی مدل به وسیله سطح زیر منحنی (AUC) (Area under curve) مشخص می‌شود (شکل ۶). نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که هر سه مدل توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی نواحی لغزش یافته داشته‌اند. بیشترین مقدار سطح زیر منحنی در روش فاکتورهای وزن دار شده (Wf)، ۰/۹۶۲ با خطای استاندارد ۰/۰۰۳ به دست آمد و پس از آن

شاخص NDVI، شکل انحنای مقعر دامنه‌ها و جهت شیب‌های خاوری هستند. پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه با سه روش W_f و W_i و FR اجرا شد. برای اعتبارسنجی نتایج و ارزیابی توانایی پیش‌بینی روش‌های مختلف به کار گرفته شده در این مطالعه از سطح زیر منحنی ROC استفاده شد. مساحت سطح زیر منحنی ROC این واقعیت را آشکار می‌سازد که هر سه مدل توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی نواحی لغزش یافته داشته‌اند. بیشترین مقدار سطح زیر منحنی در روش فاکتورهای وزن‌دار شده (W_f)، $0/962$ ، با خطای استاندارد $0/003$ به دست آمد و پس از آن روش آماری دو متغیره (W_i) و نسبت فراوانی (FR) به ترتیب با سطح زیرمنحنی برابر با $0/954$ و $0/950$ همراه با خطای استاندارد $0/002$ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. روش آماری نسبت فراوانی (FR) در عین سادگی، نتایج قابل قبولی را در تحلیل حساسیت به رخداد زمین‌لغزش داشته است. (Yalcin et al. (2011) نیز در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست یافتند. نتایج این تحقیق با یافته‌های جلالی (۱۳۸۱)؛ شیرانی و همکاران (۱۳۸۴)؛ شادفر و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد. پژوهشگران یادشده روش‌های آماری مانند نسبت فراوانی و ارزش اطلاعاتی را به عنوان ابزار مناسب برای مطالعه و تهیه نقشه خطر رخداد زمین‌لغزش در مناطق مختلف پیشنهاد کرده بودند که نتایج به دست آمده از این پژوهش نیز بیانگر نظر آنهاست.

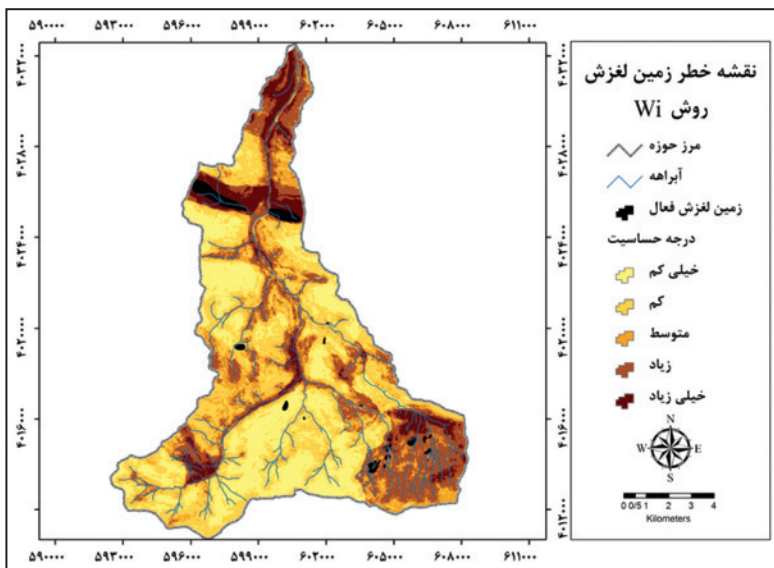
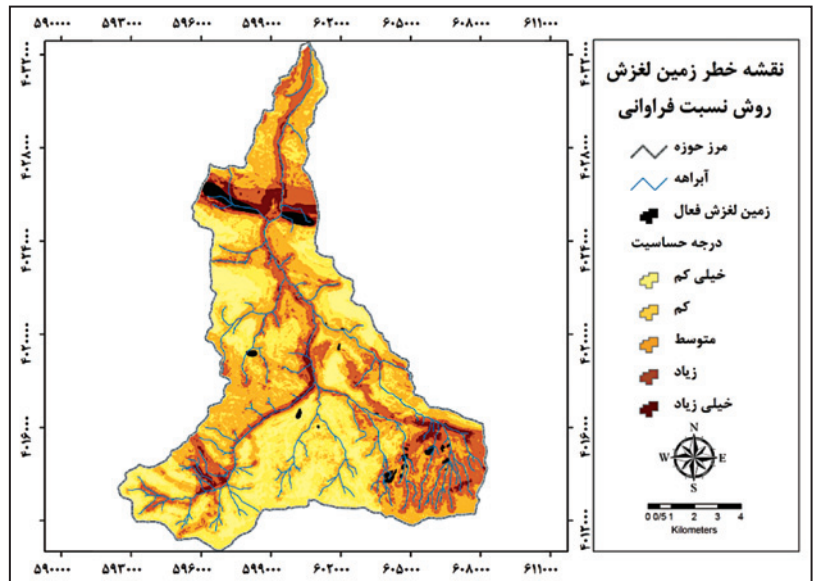
که برای رخداد زمین‌لغزش مناسب است، دائما در معرض خطر حرکات توده‌ای است. این فاکتورها از فاکتورهای اولیه مؤثر در رخداد زمین‌لغزش هستند. راهنمای جهانی برای انتخاب فاکتورهای مؤثر در رخداد زمین‌لغزش وجود ندارد. همانگونه که در جدول ۲ و در بخش نتایج نشان داده شد، در روش فاکتورهای وزن‌دار شده با توجه به روابط آماری ارائه شده، به فاکتورهایی که در رخداد زمین‌لغزش تأثیر بیشتری داشته باشند وزن بیشتری اختصاص می‌یابد. بر این اساس فواصل ۰ تا ۱۰۰ متری از فاکتور نزدیکی به جاده مؤثرترین عامل در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه است. موسوی خطیر و همکاران (۱۳۸۹) نیز مهم‌ترین عامل در رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز سجاورد مازندران را جاده‌سازی معرفی کردند. پس از نزدیکی به جاده، خاک‌های با بافت لومی بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه ایفا کرده‌اند. (Tien Bui et al. (2012) نیز به نقش بافت خاک در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه خود تأکید داشته‌اند. دیگر عوامل مهم و مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه به ترتیب اهمیت طبقات ارتفاعی ۸۳۰ تا ۱۳۸۰ متر از فاکتور ارتفاع از سطح دریا، سازند شمشک با سنگ‌شناسی تناوب شیل و ماسه‌سنگ زغال‌دار از فاکتور زمین‌شناسی، فواصل ۰-۱۰۰ متری طبقات فاصله از آبراهه‌ها، شیب‌های ۶ تا ۲۵ درجه، بارندگی میانگین سالیانه ۶۸۰-۷۸۰ میلی‌متر، مقادیر بالاتر از $0/6$

شکل ۱ - موقعیت حوضه مورد مطالعه در ایران و استان مازندران.

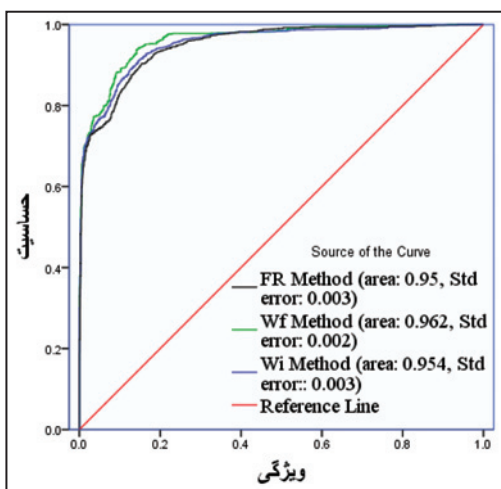


شکل ۲- نقشه فهرست زمین‌لغزش‌ها و نمونه‌ای تیبیک از لغزش‌های منطقه مورد مطالعه - اطراف روستای گزناسرا و نوجمه (بالادست حوضه آبخیز وازرود) (تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث).

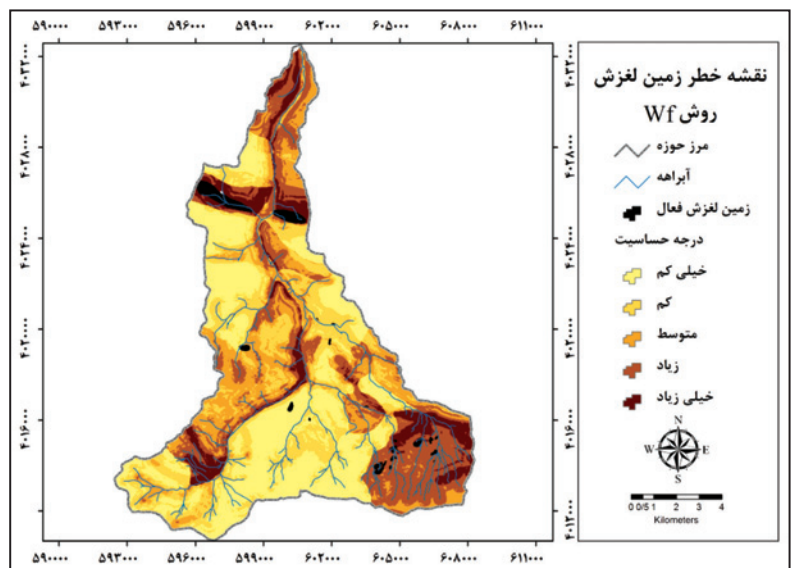
شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش به روش نسبت فراوانی منطقه مورد مطالعه.



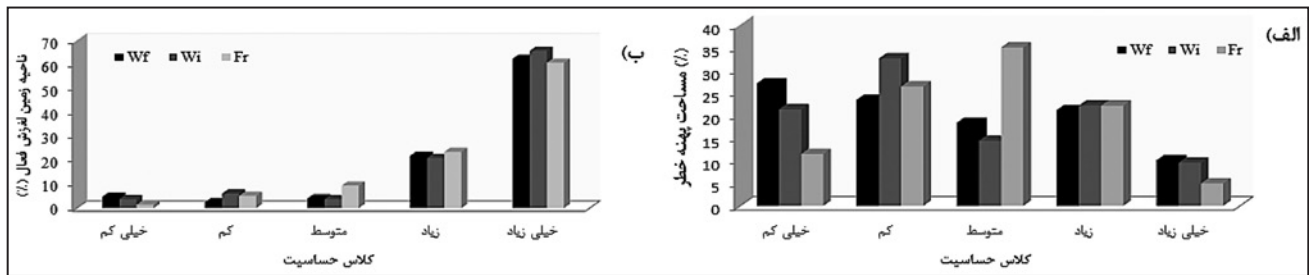
شکل ۴- نقشه خطر رخداد زمین لغزش به روش Wi منطقه مورد مطالعه.



شکل ۶- منحنی ROC و سطح زیر آن در ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی زمین لغزش منطقه مورد مطالعه.



شکل ۵- نقشه خطر رخداد زمین لغزش به روش Wf منطقه مورد مطالعه.



شکل ۷- هیستوگرام نشان دهنده توزیع زمین لغزش در کلاس های مختلف نقشه های حساسیت به روش های Wi و Wf و نسبت فراوانی (FR) منطقه مورد مطالعه. الف) درصد مساحت هر کلاس؛ ب) درصد نواحی لغزش یافته.

جدول ۱- مقادیر نسبت فراوانی رخداد زمین لغزش در کلاس های عوامل مؤثر.

فاکتور	کلاس	% سطح از کل منطقه (a)	% از سطح لغزش یافته (b)	فراوانی (b/a)
جهت	شمالی	۴۰/۵۷	۴۱/۵۸	۱/۰۲
	خاوری	۲۶/۳۶	۳۰/۸۷	۱/۱۷
	جنوبی	۱۴/۵۸	۱۳/۲۱	۰/۹۱
	باختری	۱۸/۴۹	۱۴/۳۴	۰/۸۷
زمین شناسی	Js	۴۰/۹۳	۷۴/۴۲	۱/۸۲
	K2plm	۵/۴۰	۰	۰
	Mmsl	۰/۳۹	۰	۰
	Pe	۰/۲۲	۰	۰
	TRe1	۵/۹۰	۱/۰۹	۰/۱۸
	TRe2	۴۷/۱۵	۲۴/۴۹	۰/۵۲
مقدار NDVI	۰/۲ >	۹/۷۸	۸/۲۵	۰/۸۴
	۰/۲ - ۰/۳	۱۵/۳۹	۱۱/۲۴	۰/۷۳
	۰/۳ - ۰/۴۵	۸/۶۴	۵/۵۳	۰/۶۴
	۰/۴۵ - ۰/۶	۱۵/۷۸	۹/۹۴	۰/۶۳
	۰/۶ <	۵۰/۴۰	۶۵/۰۵	۱/۲۹
	۰ - ۶	۲/۴۴	۲/۲۲	۰/۹۱
درجه شیب	۶ - ۱۵	۱۴/۴۵	۲۹/۳۵	۲/۰۳
	۱۵ - ۲۵	۲۴/۹۳	۴۰/۵۶	۱/۶۳
	۲۵ - ۳۵	۳۰/۴۸	۱۹/۷۰	۰/۶۵
	۳۵ - ۴۵	۲۴/۷۰	۶/۴۵	۰/۲۶
	۴۵ <	۳/۰۰	۱/۷۳	۰/۵۸
	۰ - ۱۰۰	۲۳/۸۵	۴۶/۱۶	۱/۹۴
فاصله از آبراهه	۱۰۰ - ۲۰۰	۱۹/۴۱	۳۰/۲۳	۱/۵۶
	۲۰۰ - ۳۰۰	۱۶/۰۳	۱۰/۸۹	۰/۶۸
	۳۰۰ - ۴۰۰	۱۲/۶۸	۳/۹۸	۰/۳۱
	۴۰۰ - ۵۰۰	۹/۶۹	۴/۳۷	۰/۴۵
	۵۰۰ <	۱۸/۳۴	۴/۳۷	۰/۲۴
	۰	۵/۰۰	۰	۰
بافت خاک	CL	۵/۰۰	۰	۰
	L	۴۱/۱۸	۹۰/۳۵	۲/۱۹
	SCL	۱۹/۳۹	۵/۸۱	۰/۳۰
	SL	۳۴/۴۳	۳/۸۴	۰/۱۱
شکل انتهای دامنه	مقعر	۲۲/۶۰	۲۳/۹۶	۱/۰۶
	مسطح	۵۱/۱۳	۶۰/۶۸	۱/۱۹
	محدب	۲۶/۲۷	۱۵/۳۶	۰/۵۸

ادامه جدول ۱

فاکتور	کلاس	% سطح از کل منطقه (a)	% از سطح لغزش یافته (b)	فراوانی (b/a)
بارندگی	۴۶۰ - ۵۸۰	۱۹/۲۶	۱۰/۲۲	۰/۵۳
	۵۸۰ - ۶۸۰	۲۱/۱۷	۱۲/۳۰	۰/۵۸
	۶۸۰ - ۷۸۰	۲۶/۲۳	۴۴/۶۱	۱/۷۰
	۷۸۰ - ۸۴۵	۳۳/۳۴	۳۲/۸۸	۰/۹۹
فاصله از جاده	۰ - ۱۰۰	۱۰/۳۰	۴۰/۷۰	۳/۹۵
	۱۰۰ - ۲۰۰	۸/۸۷	۲۲/۳۰	۲/۵۲
	۲۰۰ - ۳۰۰	۷/۸۸	۶/۳۴	۰/۸۰
	۳۰۰ - ۴۰۰	۷/۱۸	۳/۴۵	۰/۴۸
	۴۰۰ - ۵۰۰	۶/۲۶	۵/۳۶	۰/۸۶
ارتفاع از دریا	۵۰۰ <	۵۹/۵۱	۲۱/۸۵	۰/۳۷
	۲۸۰ - ۸۳۰	۱۰/۱۹	۱۸/۸۲	۱/۸۵
	۸۳۰ - ۱۳۸۰	۲۰/۳۶	۴۹/۳۳	۲/۴۲
	۱۳۸۰ - ۱۹۳۰	۲۵/۷۶	۹/۳۴	۰/۳۶
	۱۹۳۰ - ۲۴۸۰	۲۰/۵۴	۱۴/۶۹	۰/۷۲
	۲۴۸۰ - ۳۰۳۰	۱۸/۲۹	۷/۸۲	۰/۴۳
	۳۰۳۰ - ۳۵۸۰	۴/۸۵	۰	۰

جدول ۲- توزیع زمین لغزش در لایه‌های مختلف و مقادیر Wf و Wi.

فاکتور	کلاس	درصد سطح لغزش یافته	Wi	Wf
جهت	شمالی	۴۰/۵۷	۰/۰۳	۱
	خاوری	۲۶/۳۶	۰/۱۶	
	جنوبی	۱۴/۵۸	-۰/۱۰	
	باختری	۱۸/۴۹	-۰/۲۶	
زمین شناسی	Js	۷۴/۴۲	۰/۶۱	۴۶/۹۸
	K2plm	۰	۰	
	Mmsl	۰	۰	
	Pe	۰	۰	
	TRe1	۱/۰۹	-۱/۷۰	
	TRe2	۲۴/۴۹	-۰/۶۶	
مقدار NDVI	۰/۲ >	۸/۲۵	-۰/۱۷	۶/۶۷
	۰/۲ - ۰/۳	۱۱/۲۴	-۰/۳۲	
	۰/۳ - ۰/۴۵	۵/۵۳	-۰/۴۵	
	۰/۴۵ - ۰/۶	۹/۹۴	-۰/۴۷	
	۰/۶ <	۶۵/۰۵	۰/۲۶	
درجه شیب	۶ - ۰	۲/۲۲	-۰/۱۰	۳۸/۸۴
	۶ - ۱۵	۲۹/۳۵	۰/۷۳	
	۱۵ - ۲۵	۴۰/۵۶	۰/۵۰	
	۲۵ - ۳۵	۱۹/۷۰	-۰/۴۴	
	۳۵ - ۴۵	۶/۴۵	-۱/۳۶	
	۴۵ <	۱/۷۳	-۰/۵۶	
فاصله از آبراهه	۰ - ۱۰۰	۴۶/۱۶	۰/۶۸	۴۴/۶۸
	۲۰۰ - ۱۰۰	۳۰/۲۳	۰/۴۵	
	۳۰۰ - ۲۰۰	۱۰/۸۹	-۰/۳۹	
	۳۰۰ - ۴۰۰	۳/۹۸	-۱/۱۷	
	۴۰۰ - ۵۰۰	۴/۳۷	-۰/۸۱	
	۵۰۰ <	۴/۳۷	-۱/۴۵	

ادامه جدول ۲

فاکتور	کلاس	درصد سطح لغزش یافته	Wi	Wf
بافت خاک	CL	۰	۰	۱۰۰
	L	۹۰/۳۵	۰/۸۱	
	SCL	۵/۸۱	-۱/۲۲	
	SL	۳/۸۴	-۲/۲۱	
انحنای دامنه	مقعر	۲۳/۹۶	۰/۰۶	۴/۷۵
	مسطح	۶۰/۶۸	۰/۱۷	
	محدب	۱۵/۳۶	-۰/۵۴	
بارندگی	۴۶۰ - ۵۸۰	۱۰/۲۲	-۰/۶۴	۱۶/۷۹
	۶۸۰ - ۵۸۰	۱۲/۳۰	-۰/۵۵	
	۷۸۰ - ۶۸۰	۴۴/۶۱	۰/۵۴	
	۸۴۵ - ۷۸۰	۳۲/۸۸	-۰/۰۱	
فاصله از جاده	۰ - ۱۰۰	۴۰/۷۰	۱/۴۳	۹۱/۱۴
	۱۰۰ - ۲۰۰	۲۲/۳۰	۰/۹۵	
	۲۰۰ - ۳۰۰	۶/۳۴	-۰/۲۲	
	۳۰۰ - ۴۰۰	۳/۴۵	-۰/۷۴	
	۴۰۰ - ۵۰۰	۵/۳۶	-۰/۱۶	
	۵۰۰ <	۲۱/۸۵	-۱/۰۱	
ارتفاع از دریا	۲۸۰ - ۸۳۰	۵/۹۵	۰/۵۴	۶۱/۱۰
	۸۳۰ - ۱۳۸۰	۵/۵۰	۱/۳۱	
	۱۳۸۰ - ۱۹۳۰	۳۴/۱۲	۰/۲۸	
	۱۹۳۰ - ۲۴۸۰	۳۱/۸۷	۰/۴۴	
	۲۴۸۰ - ۳۰۳۰	۲۲/۵۶	۰/۲۱	
	۳۰۳۰ - ۳۵۸۰	۰/۰۰	۰	

جدول ۳- نتایج آماری سطح زیر منحنی (AUC) در ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی.

مدل‌های پهنه‌بندی	سطح زیر منحنی	خطای استاندارد	Asymptotic معنی داری	معنی داری در سطح اعتماد ۹۵٪	
				کوان بالا	کوان پایین
نسبت فراوانی (FR)	۰/۹۵۰	۰/۰۰۳	۰	۰/۹۴۵	۰/۹۵۶
فاکتورهای وزن دار (Wf)	۰/۹۶۲	۰/۰۰۲	۰	۰/۹۵۷	۰/۹۶۶
دو متغیره (Wi)	۰/۹۵۴	۰/۰۰۳	۰	۰/۹۴۸	۰/۹۵۹

کتابنگاری

- پورعلی، س. ح.، ۱۳۸۲- پهنه‌بندی مناطق خطر زمین لغزش در محدوده شهرستان‌های اردل و فارسان با استفاده از GIS و RS. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۳۱۲ صفحه.
- جلالی، ن.، ۱۳۸۱- ارزیابی تعدادی از روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه طالقان، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۸۵ صفحه.
- شادفر، ص.، قدوسی، ج.، خلخالی، س. و کلارستاقی، ع.، ۱۳۸۷- بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دو متغیره و LNRF در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز جنت رودبار)، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۸، ۵۶-۶۶ ص.ص.
- شریعت جعفری، م.، ۱۳۷۵- زمین لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی). چاپ اول، انتشارات سازه، تهران، ۱۴۷ صفحه.
- شیرانی، ک.، غیومیان، ج. و مختاری، ا.، ۱۳۸۴- بررسی و ارزیابی روش‌های آماری دو متغیره و چند متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوزه رودخانه ماربر، نشریه علمی پژوهشی آب و آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۳۶-۴۸ ص.ص.
- فاطمی عقدا، م.، غیومیان، ج. و اشقلی فراهانی، ع.، ۱۳۸۲- ارزیابی کارایی روش‌های آماری در تعیین پتانسیل خطر زمین لغزش، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، سال یازدهم، شماره ۴۸-۴۷، ۲۸-۴۷ ص.ص.
- کرم، ع. و محمودی، ف.، ۱۳۸۴- مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی زمین لغزش در زاگرس چین خورده (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سرخون در استان چهارمحال بختیاری). پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱، ۱-۱۴ ص.ص.

متکان، ع. ا.، سمیعا، ج.، پورعلی، س. و صفایی، م.، ۱۳۸۸- مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز لاجیم، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال پنجم، شماره ۴، ۳۱۸-۳۲۵ صص.

محمدی، م.، مرادی، ح. ر.، فیض‌نیا، س. و پورقاسمی، ح.، ۱۳۸۸- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و قرایندها تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز هراز)، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، سال نوزدهم، شماره ۷۴، ۲۷-۳۲ صص.

موسوی‌خطیر، ز.، کاویان، ع. و سلیمانی، ک.، ۱۳۸۹- تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز سجارود با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳، ۹۹-۱۱ صص.

References

- Akgun, A., Sezar, E. A., Nefeslioglu, C., Gokceoglu, C. & Pradhan, B., 2012- An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm, *Computer & Geosciences*, V. 38, p 23-34.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H., 2005- The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, V. 65, p. 15–31.
- Cevik, E. & Topal, T., 2003- GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey), *Environ Geol*, V. 44, p. 949–962.
- Dai, F. C. & Lee, C. F., 2002- Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, V. 42, p. 213–228.
- Das, I., Sahoo, S., VanWesten, C., Stein, A. & Hack, R., 2010- Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, V.114, p. 627–637.
- Fawcett, T., 2006- An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, V. 27, p. 861-874.
- Glade, T., Crozier, M. & Smith, P., 2000- Applying probability determination to refine landslide triggering rainfall threshold using an empirical (Antecedent Daily Rainfall Model). *Pure and Applied Geophysics*, V. 157, p. 1059–1079.
- Mathew, J., Jha, V. K. & Rawat, G. S., 2007- Application of binary logistic regression analysis and its validation for landslide susceptibility mapping in part of Garhwal Himalaya, India. *International Journal of Remote Sensing*, V. 28, p. 2257–2275.
- Nandi, A. & Shakoor, A., 2009- A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, V. 110, p. 11–20.
- Nefeslioglu, H. A., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A. S. & Duman, T. Y., 2010- Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, V. 15, p. 1–15.
- Oh, H. J. & Lee, S., 2010- Cross-validation of logistic regression model for landslide susceptibility mapping at Geneoung areas, Korea. *Disaster Advances*, V. 3, p. 44–55.
- Oh, H. J. & Pradhan, B., 2011- Application of a neuro-fuzzy model to landslidesusceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences* 37: 1264–1276.
- Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K. & Lee, S., 2011- GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, V. 399, p. 158– 172.
- Ozdemir, A., 2011- GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology*, V. 411, p. 290-308.
- Oztkin, B. & Topal, T., 2005- GIS-based detachment susceptibility analyses of a cut slope in limestone, Ankara Turkey. *Environmental Geology*, V. 49, p. 124–132.
- Srivastava, V., Srivastava, H. B. & Lakhera, R. C., 2010- Fuzzy gamma based geomatic modelling for landslide hazard susceptibility in a part of Tons river valley, northwest Himalaya, India. *Geomatics, Natural Hazards & Risk*, V. 3, p. 225-242.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. & Dick, O. B., 2012- Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *Catena*, V. 96, p. 28-40.
- Van Westen, C. J., 1997- Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede, p. 73–84.
- Yalcin, A., 2008- GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, V. 72, p. 1–12.
- 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 Trabzon, NE Turkey. *Catena*, V. 85, p. 274-287.

Evaluating the Efficiency of Frequency Ratio, Bivariate (W_i), and (W_f) Methods of Landslide Susceptibility Mapping, A Case Study: Vazroud Watershed, Mazandaran Province, N Iran

K. Solaimani ¹, J. Zandi ^{2*} & M. Habibnejad ¹

¹ Professor, Department of Watershed Management, College of Natural Resources Sciences, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

² Ph.D. Student, Department of Watershed Management, College of Natural Resources Sciences, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 2012 January 09

Accepted: 2013 November 06

Abstract

Over the last few decades, many studies have been resulted in landslide susceptibility maps using different techniques including the probability method (frequency ratio), the Analytical Hierarchy Process (AHP), bivariate, multivariate, logistic regression, fuzzy logic and artificial neural network (ANN). This study aimed to evaluate the susceptibility of the occurrence of landslides in the Vazroud watershed located in Mazandaran Province, north of Iran. The achieved results were based on three methods of frequency ratio model, statistical index (W_i) and weighting factor (W_f), which integrated to Geographical Information System (GIS) and remote sensing techniques. Vazroud as mountainous watershed morphologically is with increasing occurrence of landslides and it caused many failures of the mass movement, which seem continues now. In order to reduce the effects of this occurrence, it is necessary to scientifically assess the area where are susceptible to the landslide. For this reason, landslide susceptible areas were mapped and the landslide occurrence parameters were analyzed using three different methods. The results of these analyses were confirmed using the relative operating characteristics curve (ROC). The validation process showed that the value for the area under the ROC curve for the W_f method was found to be 0.962, with an estimated standard error of 0.002 and is better in prediction than the other methods of frequency ratio and the statistical index (W_i) model.

Keywords: Landslide, Frequency Ratio Model, Bivariate Statistic, GIS.

For Persian Version see pages 41 to 50

*Corresponding author: J. Zandi; Email: jalal.zandi2010@gmail.com