

پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوضه دز علیا)

کوروش شیرانی^{۱*} و علیرضا عرب عامری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۲)

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر در ایجاد پدیده زمین لغزش و تعیین مناطق دارای پتانسیل زمین لغزش در حوضه دزعلیا با استفاده از روش رگرسیون لجستیک انجام شده است. به این منظور ابتدا مهم‌ترین عوامل مؤثر در زمین لغزش مانند شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، بارندگی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، تراکم شبکه زه‌کشی، کاربری اراضی و سنگ‌شناسی بررسی و خصوصیات مربوط به هر یک از آنها شناسایی شدند. سپس نقشه پراکنش زمین لغزش از طریق انجام عملیات میدانی با استفاده از GPS و تصاویر ماهواره‌ای تهیه و رقومی گردید. در مرحله بعد با به‌کارگیری روش رگرسیون لجستیک اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش گردید. با توجه به مقدار ضرایب به‌دست آمده می‌توان گفت که لایه طبقات ارتفاعی مهم‌ترین عامل در وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مقدار شاخص ROC نیز برابر ۰/۹۱۷ به‌دست آمده است که مقدار بسیار بالایی را نشان می‌دهد و حاکی از آن است که حرکات توده‌ای مشاهده شده، رابطه قوی با مقادیر احتمال حاصل از مدل رگرسیون لجستیک دارد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، زمین لغزش، روش رگرسیون لجستیک، حوضه دزعلیا

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

۲. گروه ژئومرفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kouroshshirani@Gmail.com

مقدمه

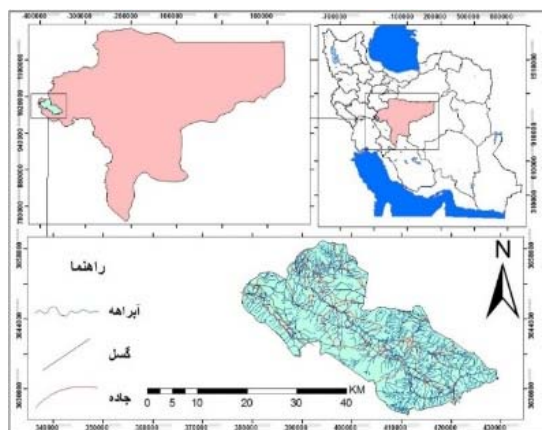
زمین لغزش یکی از مهم‌ترین حرکات دامنه‌ای می‌باشد. براساس مطالعات انجام شده توسط شبکه موضوعی ژئوتکنیک اروپا (European Geotechnical Thematic Network)، زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلاایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است (۳۹۳۹). با بروز زمین لغزش‌ها خسارات و هزینه‌های زیادی به بار می‌آید به طوری که در ایالات متحده آمریکا سالیانه به طور متوسط ۱/۵ میلیارد دلار، در ژاپن ۲ میلیارد دلار و در ایتالیا ۲/۶ میلیارد دلار برای این پدیده هزینه می‌شود (۱۷). براساس آمار اولیه بانک اطلاعاتی زمین لغزش‌های کشور خسارت ناشی از ۲۵۴۸ زمین لغزش بالغ بر ۱۰۷ کشته و ۳۸۶ میلیارد ریال بوده است (۱۱). پهنه‌بندی خطر به مفهوم تقسیم‌بندی سطح زمین به بخش‌های مختلف و رده‌بندی این بخش‌ها براساس درجه خطر (استعداد) زمین لغزش‌ها به کار می‌رود (۵۰۵۰). ارزیابی خطر، اولین مرحله از مدیریت و کاهش خطر است و احتمال وقوع زمین لغزش را در یک مکان با یک دوره برگشت برآورد می‌کند (۴۹). در دهه گذشته سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های سنجش از دور، تهیه و ترسیم نقشه‌های حساسیت زمین لغزش را تسهیل کرده‌اند (۳۶۳۶). بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزار تحلیلی پایه در پهنه‌بندی وقوع زمین لغزش همراه با مدل‌های مناسب بسیار مؤثر است. تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش به طراحان و مهندسان برای انتخاب مکان مناسب اجرای طرح‌های توسعه کمک بزرگی می‌نماید (۴۳). تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش و برآورد شدت و ارزیابی این پدیده ارائه شده که به طور کلی به روش‌های کیفی، نیمه‌کمی و کمی دسته‌بندی می‌شوند. پژوهش‌های زیادی از مدل رگرسیون لجستیک جهت پیش‌بینی احتمال وقوع زمین لغزش با تحلیل روابط عاملی بین عناصر مؤثر و زمین لغزش در ایران و جهان استفاده نموده‌اند (۵۳، ۵۲، ۵۱، ۴۵، ۴۱، ۴۰، ۳۸، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۰، ۳۱، ۲۷، ۲۶، ۲۴، ۲۳، ۲۰، ۱۹، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۹، ۸، ۷، ۲، ۱). در این تحقیق پهنه‌بندی خطر وقوع حرکات توده‌ای

براساس روش داده مینا (Data Driven) انجام گردیده است. براساس این روش، پهنه‌بندی بر مبنای استفاده از داده‌های حرکات توده‌ای، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده، نقشه هم بارش و تراکم شبکه زه‌کشی انجام شده است. جهت صحت‌سنجی مدل از منحنی ROC استفاده شده است که یک روش نوین و کارآمد در صحت‌سنجی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

این منطقه بخشی از شهرستان فریدون شهر واقع در غرب استان اصفهان در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۳۶° ۴۹' تا ۱۹° ۵۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷° ۳۲' تا ۵° ۳۳' شمالی قرار دارد. وسعت منطقه مورد مطالعه ۷۷۶۴۶ هکتار است. در شکل ۱ موقعیت عمومی حوضه نسبت به مرز سیاسی استان و کشور نشان داده شده است. شهرستان فریدون شهر با ارتفاع میانگین ۲۵۰۰ متر از سطح دریا منطقه‌ای کوهستانی است که به صورت زبانه‌ای در میان استان‌های لرستان، خوزستان و چهارمحال و بختیاری واقع شده است (۴). این منطقه در بالاترین بخش‌های حوضه آبریز دو رودخانه بزرگ ایران، یعنی زاینده‌رود و کارون واقع است. واحدهای سنگ‌شناسی عمدتاً مربوط به دوران دوم و سوم زمین‌شناسی بوده و به دلیل واقع شدن در زون زمین‌شناسی زاگرس رورانده از نظر ژئومورفولوژیکی عمده منطقه کوهستانی با دامنه‌های پرشیب می‌باشد. پوشش گیاهی مرتعی نسبتاً انبوه عمدتاً پوشیده از درختچه‌های گونی در منطقه گسترش دارد. منطقه مورد مطالعه با داشتن اقلیم کوهستانی و متوسط بارندگی ۶۰۰ میلی‌متر دارای ۱۱۰ روز یخبندان به طور متوسط در طول سال می‌باشد. عمدتاً نوع بارش آن به صورت برف می‌باشد که بعضاً ارتفاع برف در محل پیست اسکی در سال‌های پربارش بالغ بر ۳ متر می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

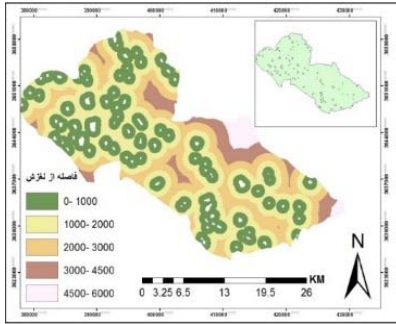
روش شناسی

به منظور آماده سازی اطلاعات در محیط GIS، از نقشه های زمین شناسی، توپوگرافی، اطلاعات مربوط به بارش و همچنین تصاویر ماهواره ای ETM+ استفاده گردید. براساس مقیاس، موقعیت منطقه مطالعاتی و روش پهنه بندی استفاده شده، مجموعاً ۱۰ عامل شامل حرکات توده ای، سنگ شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده، نقشه هم بارش و تراکم شبکه زهکشی مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از GPS نقاط لغزشی حوضه را ثبت و وارد ArcGIS 10.2 و نقشه حرکات توده ای از این طرق تهیه گردید. در مرحله بعد با استفاده از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، وضعیت زمین شناسی منطقه به خوبی بررسی، سپس با مطالعه و بررسی فتوژئولوژیکی عکس های هوایی ۱:۴۰۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور (۶)، نقشه های زمین شناسی سازمان زمین شناسی کشور (۵) و بررسی های میدانی، اقدام به تهیه نقشه زمین شناسی گردید. پس از تهیه نقشه واحد های سنگی و خطواره ها، اقدام به رقومی نمودن آنها گردید. نقشه های لیتولوژی، تراکم شبکه زهکشی، فاصله از گسل و آبراهه به همین ترتیب در محیط ArcGIS تهیه گردید. به منظور تهیه نقشه مدل ارتفاعی رقومی DEM، نقشه شیب، جهت شیب و طبقات مربوط به آنها از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح استفاده

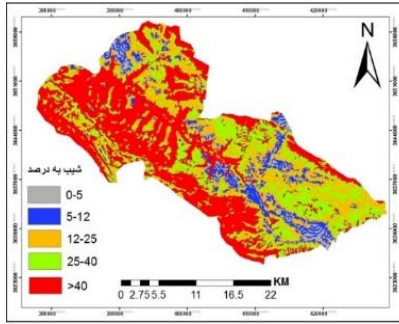
شده است (۴). تمامی نقاط ارتفاعی و منحنی های میزان ۱۰۰ متری حوضه مورد مطالعه رقومی و تمامی اقدامات لازم جهت استفاده از این اطلاعات در محیط نرم افزار ILWIS3.8 (Integrated Land and Water Information System) انجام گرفت. با استفاده از منحنی های میزان و نقاط ارتفاعی رقومی شده و روش درون یابی، اقدام به تهیه مدل ارتفاعی رقومی گردید. پس از ایجاد مدل رقومی ارتفاعی، نقشه شیب و جهت شیب با دقت ۳۰ در ۳۰ مترمربع تهیه گردید. با استفاده از آمار ۳۰ ساله ایستگاه های واقع در محدوده مورد مطالعه و روش میان یابی Krigging در محیط Surfer12 اقدام به تهیه منحنی های هم باران سالیانه در حوضه مورد مطالعه گردید. نقشه کاربری اراضی منطقه نیز از طریق تصاویر سنجنده ETM+ در محیط نرم افزار ENVI 4.8 تصحیح و تهیه گردید.

لایه های اطلاعاتی مورد استفاده

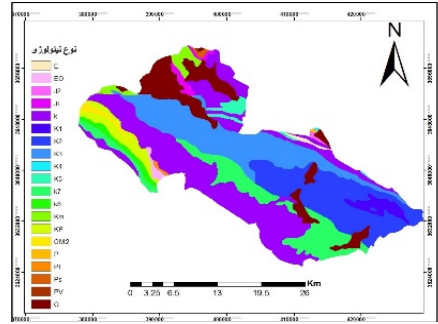
لایه حرکات توده ای به عنوان متغیر وابسته در مدل، مهم ترین لایه مورد استفاده در این مدل می باشد. پراکنندگی حرکات توده ای در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. عامل سنگ شناسی به عنوان یکی از پارامترهای (متغیر مستقل) در ایجاد حرکات توده ای به شمار می رود (۱۳). نقشه سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) پس از انجام بررسی های میدانی و تلفیق نقشه زمین شناسی براساس داده های



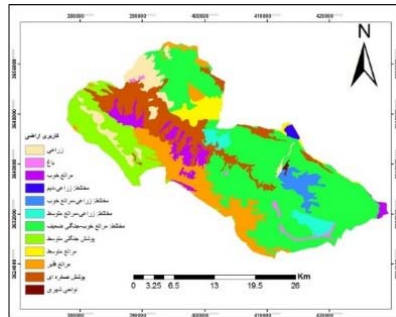
شکل ۴. نقشه فاصله از لغزش



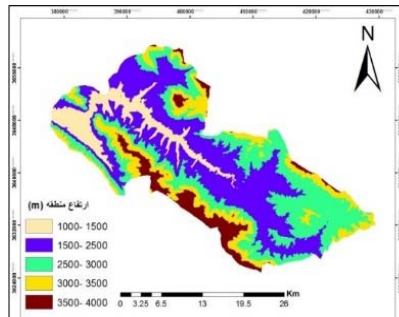
شکل ۳. نقشه شیب



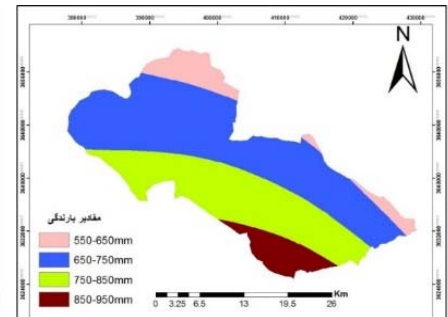
شکل ۲. نقشه لیتولوژی



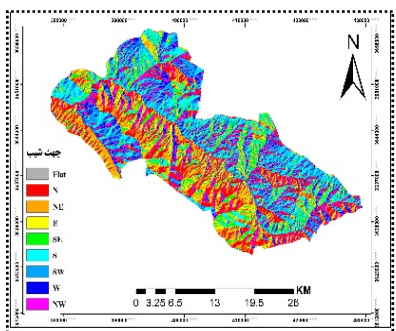
شکل ۷. نقشه کاربری اراضی



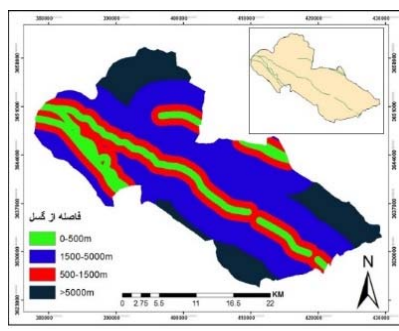
شکل ۶. نقشه طبقات ارتفاعی



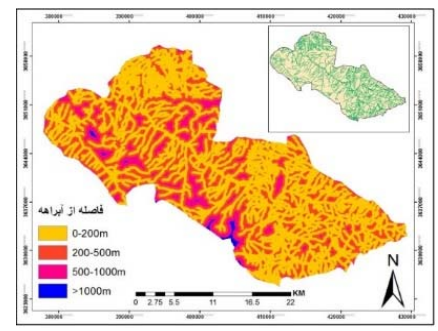
شکل ۵. نقشه همبارش



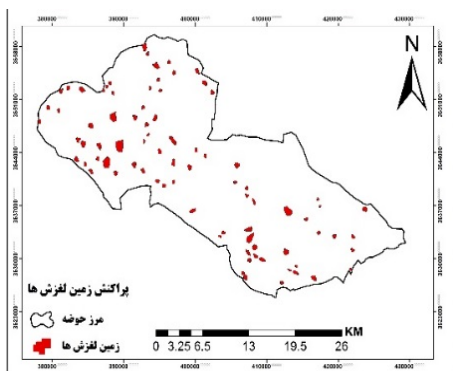
شکل ۱۰. نقشه جهت شیب



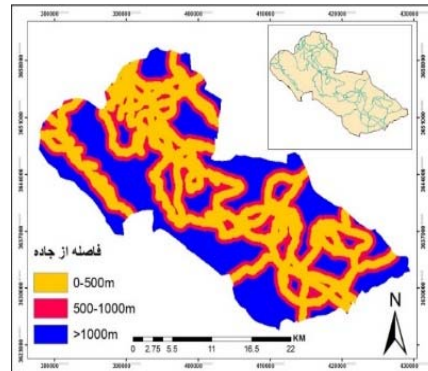
شکل ۹. نقشه فاصله از گسل



شکل ۸. نقشه فاصله از آبراهه



شکل ۱۲. نقشه پراکنش زمین لغزشها



شکل ۱۱. نقشه فاصله از جاده



شکل ۱۵. رسوبات آهکی توده‌ای

شکل ۱۴. لغزش لیستریک بر روی شیل

شکل ۱۳. رسوبات آبرفتی قدیمی

مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و Slope در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 در ۹ رده تهیه گردید (شکل ۱۰). از آنجا که نوع پوشش گیاهی و کاربری زمین‌ها در رخداد زمین لغزش مؤثر می‌باشد، بنابراین با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور (۶) و همچنین پیمایش صحرائی، نقشه پوشش گیاهی تهیه گردید (شکل ۷). نقشه فاصله از جاده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور (۶) و اعمال توابع Distance, Reclassify و Union طبقات فاصله از جاده به سه رده در ArcGIS10.2 تقسیم گردید (شکل ۱۱). نقشه بارندگی سالیانه طبق آمار ۳۰ ساله ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو (شامل اسلام آباد پیشکوه، دره بادام علیا، افسوس، فریدون‌شهر، ده‌شور علیا، بزمه، کلبعلی، سرداب سفلی، زمستانه، مصیر و بهرام آباد) و کلیماتولوژیک فریدون‌شهر مربوط به سازمان هواشناسی واقع در محدوده مورد مطالعه تهیه گردیده است. (شکل ۵). برای اندازه‌گیری میزان تراکم شبکه زهکشی از تابع تراکم در نرم‌افزار ArcGIS10.2 استفاده گردیده است. این تابع براساس شعاع مشخص در هر نقطه، مجموع طول آبراهه را بر مساحت تقسیم می‌کند. نقشه تراکم شبکه زهکشی در شکل ۸ نشان داده شده است.

نقشه پراکنش زمین لغزش

نقشه پراکنش زمین لغزش در تمامی مطالعات مربوط به زمین لغزش از شناسایی، پایش، پهنه‌بندی حساسیت

ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و صحرائی تهیه گردید (۴، ۵ و ۶). در جدول ۲ علائم، توصیف سنگ‌شناسی و مقادیر وزنی واحدهای مختلف آورده شده است. تشکیلات شیل، مارن و کنگلومرا بیشترین تأثیر را در رخداد زمین لغزش‌ها دارند (شکل ۱۳). در مرتبه بعد واحد آبرفتی (آلوویم) و پادگانه‌های قدیمی متعلق به عهد حاضر (Q) قرار دارد (شکل ۱۴). رسوبات آهک دولومیتی، رادیولاریت و کنگلومرا متعلق به کرتاسه و آهک‌های خاکستری و صخره‌ساز به ترتیب تأثیر کمتری در رخداد زمین لغزش دارند (شکل ۱۵). وجود گسل‌ها و خطواره‌ها به‌عنوان عامل ثانویه و یک متغیر مستقل در ایجاد حرکات توده‌ای بسیار قابل توجه است. برای تهیه نقشه گسل‌های منطقه از داده‌های ماهواره ای ETM+2002 در محیط نرم‌افزار ENVI4.8 استفاده گردید. (شکل ۹). برخی از محققین از ارتفاع به‌عنوان یک عامل کنترلی در وقوع زمین لغزش‌ها استفاده می‌کنند (۳۹). برای ترسیم نقشه ارتفاعی از مدل رقومی ارتفاعی محدوده مورد مطالعه (۳۰ متر) استفاده گردید و در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.2 استخراج گردید (شکل ۶). وجود شیب دامنه، تأثیر بسیار زیادی در وقوع زمین لغزش دارد (۳۲). وجود این عامل به‌صورت بحرانی، نقش تأثیرگذار عوامل دیگر در حرکات توده‌ای را تشدید می‌نماید (۲۴). نقشه شیب در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 منطقه بر حسب درصد به ۵ رده تقسیم گردید (شکل ۳). نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ (۶) و Topo to Raster به‌منظور ایجاد نقشه

ثابت، X_1 تا X_n متغیر مستقل و β_1 تا β_n نیز به ترتیب ضرایب این متغیرها می باشند. در واقع در رابطه ۱ مقادیر $\text{Logit}(p)$ برآورد شده و سپس براساس آن مقادیر P استخراج می گردد. برای حل معاله فوق از روش کمترین توان های دوم وزنی می توان استفاده کرد، ولی این روش مشکلاتی از قبیل نامشخص بودن مقادیر P دارد. به جای آن از روش حداکثر شباهت استفاده می شود. در این روش برای استخراج ضرایب مقادیر تابع حداکثر شباهت، از رابطه ۲ استفاده می شود.

[۲]

$$L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{(1-y_i)} \quad [L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{(1-y_i)}]$$

که در آن، P_i احتمال وقوع لغزش می باشد و براساس رابطه ۱ برآورد می گردد، y_i مقادیر مشاهده شده حرکت توده ای است که بنابر تعریف، مقادیر صفر یا یک خواهد بود. مدل خطی که رگرسیون لجستیک آن را ارائه می دهد، بسته به لغزش های روی داده در رابطه با متغیرهای مستقل با شرایطی که قبلاً باعث حرکات توده ای شده است، می باشد (۳۴۳۴).

استانداردسازی بر روی هر یک از لایه ها مطابق رابطه ۳ انجام گردیده است (۳ و ۱۰).

$$X_{\text{Standardized}} = \frac{X_{\text{standardi}}}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)} \quad [۳]$$

چنانچه X به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شود، مقادیر استاندارد شده براساس رابطه فوق به دست خواهد آمد. با استفاده از رابطه فوق به یکسان سازی لایه ها و قرارگیری دامنه مقادیر بین صفر و یک پرداخته شده است. در نهایت این لایه ها به عنوان متغیر پیش گو وارد مدل رگرسیون لجستیک خواهد گردید. به منظور ارزیابی بهترین برآزش مدل از دو آماره Chi

و Pseudo R Square استفاده گردیده است (رابطه ۴)

$$\text{Pseudo R Square} = 1 - \left(\frac{\text{Log}(L)}{\text{Log}(L_0)} \right) \quad [۴]$$

$$\text{Square} = 1 - (\text{Log}(L) / \text{Log}(L_0))$$

به این ترتیب چنانچه مقدار Pseudo R Square برابر با یک باشد، نشان دهنده برآزش کامل مدل خواهد بود، و در صورتی که

(Susceptibility)، خطر (Hazard)، ریسک (Risk) و خصوصاً ارزیابی و تحلیل خطر و ریسک زمین لغزش جزء لاینفک و به عنوان لایه مبنایی و مهم می باشد. بدیهی است صحت و دقت هر چه بیشتر این نقشه موجب تهیه نقشه های حساسیت، خطر و ریسک دقیق تر و در نتیجه منجر به ارزیابی درست و واقعی از این نقشه ها می گردد. جهت به نقشه در آوردن انواع لغزش های رخ داده در محدوده مطالعاتی، ابتدا عکس های هوایی منطقه با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ به روش استریوسکوپی و همچنین داده های ماهواره ای لندست هفت با استفاده از نرم افزار ENVI تفسیر شده اند و مناطق مشکوک به لغزش تعیین شد، در مرحله بعد با انجام پیمایش صحرائی دقیق، موقعیت لغزش ها با استفاده از دستگاه GPS با دقت زیاد به نقشه درآمد (شکل ۱۲)

مدل رگرسیون لجستیک

اساس این روش، پهنه بندی بر مبنای استفاده از داده های وقوع حرکات توده ای است. یکی از مدل های آماری مناسب جهت اجرای پهنه بندی براساس داده های موجود، استفاده از مدل رگرسیونی می باشد (۳۴۳۴). در مدل رگرسیون براساس داده های موجود، معادله ای جهت پیش بینی مقادیر متغیر وابسته (Y) براساس یک یا چند متغیر پیشگوی مستقل (X_i) به دست خواهد آمد. اما چنانچه مقادیر متغیر وابسته (Y) کیفی بوده و همواره دارای دو حالت باشند (وقوع و عدم وقوع) در آن صورت بدیهی است که الگوی رگرسیون عادی جوابگو نخواهد بود. در چنین حالتی احتمال وقوع پدیده (P) برآورد می گردد و مدل اصطلاحاً رگرسیون لجستیک نامیده می شود که معادله آن مطابق رابطه زیر می باشد.

[۱]

$$\begin{aligned} Y = \text{Logit}(p) &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_n X_n \\ &= \text{Logit}(p) \\ &= \beta_0 + \beta_1 X_1 \\ &\quad + \beta_2 X_2 \dots \dots + \beta_n X_n \end{aligned}$$

که در آن احتمال وقوع $Y = \text{Logit}(P) = \text{Ln} \left(\frac{P}{1-P} \right)$ ، β_0 عدد

جدول ۱. وزن کلاس های جهات شیب

جهت شیب	شمال	شمال شرق	شرق	جنوب شرق	جنوب	جنوب غرب	غرب	شمال غرب	هموار
وزن	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۱

جدول ۲. رده بندی واحدهای زمین شناسی

طبقات سنگ شناسی	نام طبقه	امتیاز
K8	شیل و مارن با میان لایه های آهک مارنی	۹
Q	آبرفت ها و پادگانهای قدیمی	۸
K7	آهک مارنی، رسی ماسه ای	۷
PI	کنگومرا و ماسه سنگ سخت (سازند بختیاری)	۶
OM2	آهک مارنی و ماسه سنگی (سازند آسماری)	۵
EO	آهک سفید، مارنی و دولومیتی (سازند شهبازان، جهرم و	۴
K3	آسماری)	۳
K2	آهک نازک لایه رسی	۳
K	آهک ریفی با میان لایه های شیل	۲
JI	آهک اوربیتولین دار	۲
KP	آهک دولومیتی	۱
KM	رادیولاریت و کنگومرا (سازند امیران و تارپور) و آهک خاکستری	۱

جدول ۳. ضرایب و انحراف از معیار حاصل از رابطه رگرسیون لجستیک

متغیرهای مستقل	ضرایب	انحراف از معیار
عدد ثابت	-۶/۵	-
جهت شیب	۰/۱	۱
طبقات ارتفاعی	۲/۳	۱
تراکم شبکه آبراهه	-۰/۰	۱
گسل	-۰/۱	۱
کاربری اراضی	-۰/۰۵	۱
لیتولوژی	-۰/۴	۰/۹
بارندگی	۰/۱	۱
فاصله از جاده	-۰/۲	۱
شیب	۰/۲	۰/۹

جدول ۴. شاخص های آماری حاصله برای ارزیابی مدل

شاخص	مقدار
Pseudo R_square	۰/۱
ChiSquare	۹۶۱/۷۹
ROC	۰/۹

استفاده گردید (۴۴ و ۳۷). منحنی ROC از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (۴۸، ۳۶). سطح زیر منحنی ROC که AUC یا Area Under Curve نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین لغزش) آن است. نرخ پیش‌بینی (منحنی ROC) بیانگر ارزیابی مدل و متغیرهای پیش‌بینی کننده که زمین لغزش را پیش‌بینی می‌کند، می‌باشد (۱۸).

نتایج

اجرای مدل رگرسیون لجستیک

برای رسیدن به ضرایب بهینه رگرسیون در این پژوهش، لایه حرکات توده‌ای به عنوان متغیر پاسخ (Y) انتخاب گردیده است. به طوری که به رویداد وقوع حرکات توده‌ای عدد یک و به رویداد عدم وقوع آن عدد صفر اختصاص داده شده است و سایر لایه‌های استخراج شده (فاصله از جاده، شیب، کاربری اراضی، بارش، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، تراکم زه کشی) به عنوان متغیر پیش‌گو (X) در نظر گرفته شده است. دو لایه کیفی زمین‌شناسی و جهت شیب پس از وزن‌دهی براساس نظر کارشناسی ۶ کارشناس شامل سه نفر دکتری ژئومورفولوژی و سه نفر دکتری زمین‌شناسی به لایه‌های کمی تبدیل گردیده‌اند. جداول ۱ و ۲ وزن‌های تخصیص داده شده به هر کلاس در لایه‌های جهت شیب و سازندهای زمین‌شناسی را نشان می‌دهند. جدول ۳ ضرایب و انحراف از معیار حاصل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک با ۹ متغیر را نشان می‌دهد. در نهایت معادله رگرسیون حاصله مطابق رابطه ۶ ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{logit(LANDSLIDE)} &= -6.5632 + [6] \\ &+ 0.109353 * \text{Aspect} - 2.379035 * \text{DEM} \\ &+ 0.091840 * \text{Drainage} - 0.103738 * \text{Fault} \\ &+ 0.057024 * \text{Landuse} - 0.413482 * \text{Litology} \\ &+ 0.180882 * \text{Rain} - 0.285445 * \text{Road} + \\ &0.229955 * \text{Slope} \end{aligned}$$

این مقدار برابر با صفر باشد، نشان دهنده عدم رابطه عوامل انتخابی با عامل وابسته را نشان می‌دهد. چنانچه مقدار Pseudo R Square بزرگ‌تر از ۰/۲ باشد نشان دهنده برازش نسبتاً خوب مدل می‌باشد. مقدار آماره Chi Square نیز مطابق با رابطه ۵ محاسبه می‌گردد؛

[۵]

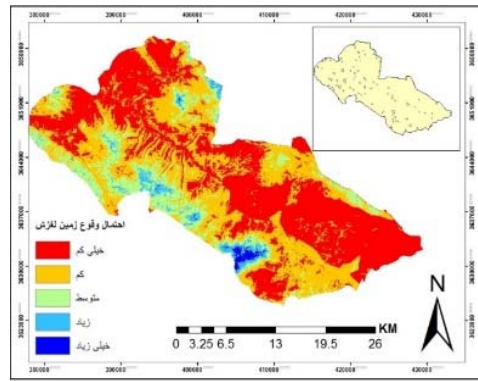
$$\text{Chi Square}(K) = -2 (\text{Log}(\text{Likelihood}) - \text{Log}(L_0))$$

$$\text{Square}(K) = -2 (\text{Log}(\text{Likelihood}) - \text{Log}(L))$$

آماره فوق، فرض خنثی (صفر بودن تمامی ضرایب رگرسیون) را براساس تابع توزیع مربع کای با درجه آزادی K را آزمون می‌کند K برابر با تعداد متغیرهای مدل می‌باشد. چنانچه این آماره در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار باشد ($\text{Chi Square} > 14.1$) H_0 رد می‌شود.

ارزیابی و اعتبارسنجی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

به منظور ارزیابی صحت مدل آماری لجستیک با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) یا Relative Operating Characteristics Curve صحت روش و با استفاده از نسبت فراوانی (FR) یا Frequency Ratio و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) یا Seed Cell Area Index دقت تفکیک بین طبقات در مدل لجستیک مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. با توجه به این که برای ارزیابی مدل نمی‌توان از همان لغزش‌هایی استفاده نمود که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند (۲۹)، از بین نقاط لغزشی، ۷۰ درصد برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت (۲۲). نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI دو شاخص هستند که دقت طبقه‌بندی مدل را می‌توانند تعیین کنند (۲۸ و ۲۵). در حقیقت نسبت فراوانی (FR) نسبت مساحت سطح لغزشی در هر طبقه به مساحت سطح آن طبقه می‌باشد (۴۲) و شاخص SCAI نسبت درصد مساحت هر یک از طبقات پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش به درصد لغزش‌های اتفاق افتاده در هر طبقه است (۴۶، ۴۷ و ۵۴). هر دو شاخص که از نظر مقدار، رابطه عکس با همدیگر دارند، برای ارزیابی دقت تفکیک طبقات مدل استفاده می‌گردد (جدول ۶). به منظور اعتبارسنجی یا صحت مدل از منحنی ROC



شکل ۱۶. نقشه نهایی زمین لغزش

جدول ۶. نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش به روش آماری چند متغیره لجستیک

شماره	رده‌های خطر لغزش	مساحت لغزش (مترمربع)	مساحت لغزش (مترمربع)	درصد مساحت هر رده خطر (مترمربع)	درصد مساحت رده	نسبت فراوانی (FR)	درصد SCAI Seed	SCAI
۱	خیلی کم	۳۴۳۹۶۸۳۰۰	۴۲۳۲۷۰۰	۲۷/۸	۳۴۸۲۰۱۰۰۰	۴۴/۸	۷/۷	۵/۸
۲	کم	۲۹۲۲۱۸۳۰۰	۵۷۰۷۸۰۰	۳۷/۵	۲۹۷۹۲۶۱۰۰	۳۸/۴	۱۲/۱	۳/۱
۳	متوسط	۹۷۴۱۵۱۰۰	۳۷۱۹۷۰۰	۲۴/۴	۱۰۱۱۳۴۸۰۰	۱۳	۲۳/۳	۰/۵
۴	زیاد	۲۱۸۷۱۸۰۰	۱۳۹۱۴۰۰	۹/۱	۲۳۲۶۳۲۰۰	۳	۳۷/۹	۰/۰
۵	خیلی زیاد	۵۱۱۶۵۰۰	۱۵۶۶۰۰	۱	۵۲۷۳۱۰۰	۰/۶	۱۸/۸	۰/۰

SCAI: شاخص سطح سلول هسته

سایر شاخص ها مطابق جدول ۴ به دست آمده است.

زیاد تقسیم گردیده است (جدول ۶ و شکل ۱۶).

نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

بر اساس نقشه حاصل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک، مقادیر احتمال وقوع به دست آمده از ۰ تا ۰/۳۱ متغیر می‌باشد. جهت پهنه‌بندی لایه احتمال وقوع حرکات توده‌ای از ترکیبی از نظرات کارشناسی و روش‌های معمول طبقه‌بندی استفاده گردیده است. جهت پهنه‌بندی این لایه‌ها، روش‌های مختلفی از جمله شکست طبیعی، فاصله برابر، مقادیر صفت، انحراف استاندارد و فاصله ژئومتریک مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت بر اساس روش طبقه‌بندی فاصله ژئومتریک به دلیل تطابق بیشتر آن با واقعیت منطقه، انتخاب و به پنج رده خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی

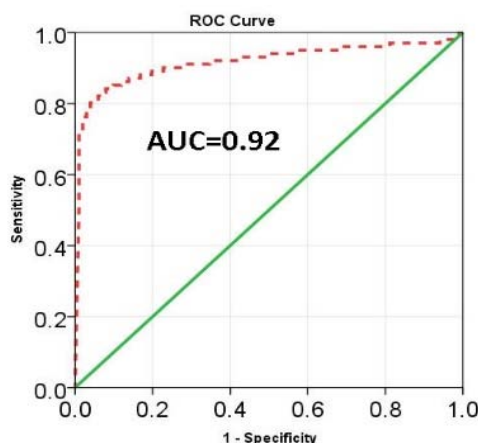
نتایج ارزیابی دقت و اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک

در منطقه مورد مطالعه

نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی بر مبنای مدل رگرسیون لجستیک با استفاده از شاخص SCAI در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش حساسیت خطر از خیلی کم به خیلی زیاد مقادیر نسبت فراوانی (FR) تقریباً روند صعودی داشته اما شاخص SCAI روند نزولی قابل توجه را نشان می‌دهد و نشان دهنده همبستگی بالای رده‌های خطر لغزش با مناطق لغزشی موجود و باز دیده‌های میدانی منطقه مورد مطالعه است. بنابراین از این حیث ترتیب تفکیک‌پذیری بین

جدول ۷. مساحت زیر منحنی (ROC) به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان آن

Area	Std. Error	Asymptotic Sig.	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
۰/۹۲	۰/۰	۰/۰	۰/۸	۰/۹



شکل ۱۷. منحنی نرخ پیش‌بینی (ROC) مدل لجستیک برای منطقه مورد مطالعه

مقدار ضرایب می‌توان گفت که لایه طبقات ارتفاعی مهم‌ترین عامل در وقوع زمین لغزش و پس از آن به ترتیب لایه‌های لیتولوژی، فاصله از جاده، شیب، بارندگی، جهت شیب، فاصله از گسل، تراکم آبراهه و کاربری اراضی می‌باشد. طبق نتایج طبقات ارتفاعی مهم‌ترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش‌های منطقه داشته است. آیالا و همکاران (۱۴) نیز در جزیره سادو ژاپن ارتفاع را به‌عنوان مهم‌ترین عامل حرکات توده‌ای معرفی کرده است. بررسی زمین‌شناسی منطقه به‌عنوان دومین عامل مؤثر در وقوع زمین لغزش نشان داده است که بیشترین وزن را رسوبات ماری به خود اختصاص داده است. دلیل این امر شاید جذب آب بیشتر و آب‌گذاری کمتر خاک‌هایی با بافت متوسط و ریز، در نتیجه اشباع راحت‌تر این خاک‌ها باشد. گریکو و همکاران (۲۷) و نفیسیگلو و همکاران (۳۷) نیز به نقش مؤثر واحدهای سنگ‌شناسی بر روی حرکات توده‌ای در پژوهش‌های خود تأکید نموده‌اند. طبق نتایج عامل فاصله کمتر از ۲۰۰ متری از جاده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش‌ها به حساب آمده است و هرچه از جاده فاصله می‌گیریم

طبقات، مناسب ارزیابی گردید. براساس نتایج منحنی ROC، مقدار سطح زیر منحنی منطقه مورد مطالعه (۰/۹۲ یا ۹۲ درصد) با انحراف استاندارد ۰/۰۲۳ میزان دقت یا اعتبار مدل به‌صورت کمی برآورد گردید (جدول ۷). شکل ۱۷ نشان دهنده ارزیابی خیلی خوب مدل رگرسیون لجستیک برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک در منطقه دز علیا پرداخته شده است. ضرایب به‌دست آمده در جدول ۳ بیانگر این است که وقوع حرکات توده‌ای در منطقه مورد مطالعه با عوامل شیب، بارندگی و ارتفاع رابطه مثبت و با جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از جاده، تراکم زهکشی، فاصله از گسل و کاربری اراضی رابطه منفی دارد و نشان می‌دهد که احتمال وقوع حرکات توده‌ای با افزایش ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارندگی افزایش و با افزایش فاصله از جاده و کاهش تراکم زهکشی کاهش می‌یابد. با توجه به

از شدت وقوع لغزش‌ها کاسته می‌شود. علت اصلی این موضوع آن است که جاده‌ها وضعیت طبیعی و به‌عبارت دیگر شیب تعادلی منطقه را به هم زده و بریدگی‌های عمودی به وجود می‌آورند و بر بخش‌های پایین جاده فشار اضافی وارد می‌کنند و باعث افزایش زمین لغزش در نزدیکی‌های جاده می‌شوند. محققین به نقش مؤثر جاده‌سازی در وقوع زمین لغزش‌ها تأکید کرده‌اند (۲۷، ۳۶). نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که کلاس شیب بیشتر از ۴۵ درجه تأثیر بیشتری نسبت به کلاس‌های دیگر شیب در وقوع زمین لغزش داشته است. در شیب‌های کم برآیند نیروها به گونه‌ای است که نیروهای مقاوم بیشتر از نیروی محرکه بوده و شرایط وقوع زمین لغزش ایجاد نمی‌شود. بررسی عامل بارش در منطقه نشان می‌دهد که بین میزان بارندگی در هر کلاس و امتیاز کسب شده توسط آن کلاس رابطه مستقیمی وجود دارد که بیانگر حساسیت بالای چشم انداز به عامل بارش در منطقه است. جهت شیب‌های شمال و شمال‌غربی نیز نقش مؤثری در وقوع زمین لغزش داشته‌اند که بیانگر نقش مؤثر جهت شیب‌های شمال‌غربی و شمالی در ایجاد زمین لغزش به‌علت وجود بارندگی و رطوبت بیشتر در این دامنه‌ها و انتقال رطوبت بین سازندها به‌عنوان عامل درونی در کاهش فشار نرمال و مقاومت برشی خاک است که با نظر کن و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت دارد (۱۹). بررسی کاربری اراضی منطقه نشان می‌دهد که کاربری مرتع و دیمزار بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشته است که دلیل آن را می‌توان به نقش مؤثر انسان در اکوسیستم‌های طبیعی و تخریب‌هایی که به‌واسطه تغییر کاربری اراضی در منطقه به‌وجود می‌آید نسبت داد. نتایج حاصل از عامل تراکم شبکه زهکشی بیانگر آن است که با افزایش تراکم شبکه زهکشی تأثیر آن در وقوع زمین لغزش افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که اهمیت لایه‌های فوق تنها در رابطه ۶ صادق بوده و به‌علت وجود هم‌خطی احتمالی، میزان اهمیت هر یک از لایه‌ها در خارج از رابطه فوق احتمالاً دستخوش تغییراتی خواهد شد. در خصوص شاخص‌های آماری مرتبط با مدل رگرسیون لجستیک نیز

می‌توان گفت که با توجه به این که در این پژوهش مقدار شاخص Pseudo R_Square برابر با ۰/۱۷ انتخاب گردیده است و همچنین با توجه به این که این مقدار بزرگ‌تر از آستانه ۰/۲ می‌باشد، این مدل برازش قابل قبولی را نشان می‌دهد. مقدار شاخص Chi Square نیز برابر ۹۶۱/۷۹ انتخاب گردیده است که با توجه به این که مقدار آن بسیار بیشتر از مقدار آستانه تعیین شده است در نتیجه فرض صفر بودن تمام ضرایب نیز رد می‌گردد. سطح زیر منحنی ROC نیز برابر ۰/۹۲ انتخاب گردیده است که مقدار بسیار بالایی را نشان می‌دهد و حاکی از آن است که حرکات توده‌ای مشاهده شده، رابطه قوی با مقادیر احتمال حاصل از مدل رگرسیون لجستیک دارد. در نهایت منطقه مورد مطالعه به ۵ کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد. از کل حوضه مورد مطالعه به وسعت ۷۷۶۴۶ هکتار ۴۴/۸۸ درصد آن در کلاس خیلی کم (۳۴۸۲/۰۱ هکتار)، ۳۸/۴۰ درصد آن در کلاس کم (۲۹۷۹۲/۶۱ هکتار)، ۱۳/۰۴ درصد آن در کلاس متوسط (۱۰۱۱۳/۴۸)، ۳ درصد آن در کلاس زیاد (۲۳۲۶/۳۲ هکتار) و ۰/۶ درصد آن در کلاس خیلی زیاد (۵۲۷/۳۱ هکتار) قرار گرفته است. در مجموع می‌توان گفت در صورت وجود داده‌های وقوع حرکات توده‌ای، پهنه‌بندی خطر وقوع آنها با استفاده از روش‌های داده مینا امکان پذیر خواهد بود و با توجه به ماهیت حرکات توده‌ای مدل آماری رگرسیون لجستیک مدلی مناسب جهت پهنه‌بندی احتمال وقوع آنها به شمار می‌رود. نتایج حاصله با نتایج کن و همکاران (۱۹)، چائو و چان (۲۱)، گریکو و همکاران (۲۷)، لی (۳۱)، لی و سمبات (۳۵)، لی و پرادهان (۳۳)، اوهلامچر و دیویس (۴۰) و نفسلیگلو و همکاران (۳۷)، که همگی بر کارایی بالای روش رگرسیون لجستیک تأکید داشته‌اند، مطابقت دارد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از صحت بالای نقشه پهنه‌بندی از مدل لجستیک، می‌توان اظهار داشت که این مدل دارای قابلیت لازم جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر در شرایط آبخیزهای مشابه با حوزه آبخیز دز است.

سیاسگزاری

قدردانی خود را از آن مرکز و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به خاطر فراهم آوردن این تحقیق اعلام نمایند.

این مقاله بخشی از یافته‌های طرح پژوهشی است که در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به اجرا در آمده است، لذا نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاس و

منابع مورد استفاده

۱. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، م. محمدی و م. ر. مهدی‌فر، ۱۳۸۷، تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش و ارزیابی آن با استفاده از اپراتورهای فازی، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۴۶): ۳۸۹ - ۳۷۵.
۲. پورقاسمی، ح. ر.، ح. ر. مرادی، ر. مصطفی‌زاده و ع. گلی جیرنده، ۱۳۹۰، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تئوری بی‌زین، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۶(۶۲): ۱۰۹-۱۲۱.
۳. خالدی، ش.، خ.، درفشی، ا. مهرجونژاد، س.، قره‌چاهیوش، خالدی، ۱۳۹۱. ارزیابی عامل‌های مؤثر در رویداد زمین لغزش و پهنه بندی آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز طالقان)، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱: ۶۵-۸۲.
۴. سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، چقاگرگ برگ ۵۹۵۶۱۷، دره ساری ورقه II ۵۵۵۶، چاله پره ورقه 59551V، وهرگان شیت ۵۹۵۵I، فریدون‌شهر ۱:۵۰۵۵I.
۵. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۷، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰، برگه‌های گلپایگان و شهرکرد.
۶. سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۷۶، عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، منطقه پیشکوه فریدون‌شهر.
۷. شیرانی، ک.، چاوشی، س. و غیومیان، ج.، ۱۳۸۵، بررسی و ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در پادنا‌ی علی‌ای سمیرم، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان (علوم پایه)، ویژه نامه زمین‌شناسی ۲۳-۳۸.
۸. شیرانی، ک.، حاجی‌هاشمی جزی، م.، نیک‌نژاد، ع.، رخشا، س.، ۱۳۹۱، پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین لغزش به روش تحلیل سلسله مراتبی و رگرسیون چندمتغیره (مطالعه موردی: سراب حوضه کارون شمالی)، نشریه مرتع و آبخیزداری، نشریه منابع طبیعی ایران ۶۵(۳): ۴۰۹-۳۹۵.
۹. موسوی خطیر، س.، ز.، کاویان، ع.، ا.، 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 ۱۴(۵۳): ۱۱۱-۹۹.
۱۰. متولی، ص.، ر.، اسماعیلی و م. م.، حسین‌زاده ۱۳۸۸. تعیین حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستی کدر حوضه آبریز و از (استان مازندران)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دوم ۵: ۷۳-۸۳.
11. Agricultural Jihad Ministry. 2004. Report of Nation Landslide Database. Landslide Study Group, Watershed, Ranges and Forests Organization.
12. Atkinson, P. M., R. Massari. 1998. Generalised linear modelling of susceptibility of landsliding in the Central Apennines. J. Computers & Geosciences 24: 373 - 385.
13. Ayalew, L., H. Yamagishi. 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the kakuda-yahiko Moun-tains, central Japan. J. Geomorphology 65.15-31
14. Ayalew, L., H. Yamagishi, H. Marui, T. Kanno. 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. J. Geol. 81: 432-445.
15. Bai, S., G. Lü, J. Wang, P. Zhou, L. Ding. 2011. GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. J. Environmental Earth Sciences 62: 139-149.

16. Bai, S. B., J. Wang, G. Lü, P. Zhou, S. S. Hou, S. N. Xu. 2010. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *J. Geomorphology* 115: 23-31.
17. Blöchl, A., B. Braun. 2005. Economic assessment of landslide risks in the Swabian Alb, Germany –research framework and first results of homeowners and experts surveys. *J. Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5. 389-396.
18. Bui D. T., B. Pradhan, O. Lofman, I. Revhaug, O. B. Dick. 2012. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *J. Computers and Geosciences* doi:10.1016/j.cageo.2011.10.031.
19. Can, T., H. A. Nefeslioglu, C. Gokceoglu, H. Sonmez and Y. Duman. 2005. Susceptibility Assessment of Shallow Earth Flows Triggered by Heavy Rainfall at three Catchments by Logistic Regression Analysis. *J. Geomorphology* 82: 250-271.
20. Chang, K., S. Chiang, M. Hsu. 2007. Modeling typhoon and earthquake induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression. *J. Geomorphology* 89: 335-347.
21. Chau, K.T and J. E. Chan. 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression for Hong Kong Island. *J. Landslides* 3: 280-290.
22. Constantin, M., M. Bednarik, M. C. Jurchescu and M. Vlaicu. 2010. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *J. Environmental Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-010-0724-y:10.
23. Das, I., S. Sahoo, C. Van Western, A. Stein, R. Hack. 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). *J. Geomorphology* 114: 627 – 637.
24. Dai, F. C., C. F. Lee. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *J. Geomorphology* 31:181-216.
25. Demir, G., M. Aytakin, A. Akgun, S. B. Ikizler and O. Tatar. 2009. A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods. *J. Environ. Earth Sci.* 60:505-519.
26. Ercanoglu, M., F. A. Temiz. 2011. Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *J. Environ. Earth Sci.* 64: 949-964.
27. Greco, R., M. Sorriso-Valvo, E. Catalano. 2007. Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. *J. Eng. Geology* 89: 47-66.
28. Kayastha, P., M. R. Dhital, F. D. Smedt. 2012. Landslide susceptibility mapping using the weight of evidence method in the Tinau watershed, Nepal. *J. Nat Hazards* 63:479-498.
29. Komac, M. 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *J. Geomorphology* 74(1-4): 17-28.
30. Lee, S. 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *J. Environ. Manag.* 34: 223-232.
31. Lee, S. 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *J. Remote Sensing* 26: 1477 –1491.
32. Lee S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *J. Environ. Geology* 50: 847-855.
33. Lee, S. and B. Pradhan. 2007. Landslide Hazard Mapping at Selangor Malaysia using Frequency Ratio and Logistic Regression models. *J. Landslide* 4: 33-41.
34. Lee, S. A. 2004. Verification of spatial logistic regression for landslide susceptibility analysis: A case study of Korea. *J. Geomorphology* 44: 15-18.
35. Lee, S., T. Sambath. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area. Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *J. Environ. Geol.* 50: 847-855.
36. Nefeslioglu, H. A., T. Y. Duman and S. Durmaz. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea Region of Turkey). *J. Geomorphology* 94: 401-418.
37. Nefeslioglu, H. A., C. Gokceoglu and H. Sonmez. 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *J. Eng. Geol.* 97: 171-191.
38. Oh, H. J., S. Lee. 2010. Cross validation of logistic regression model for landslide susceptibility mapping at Gyeongju areas, Korea. *J. Disaster Advances* 3: 44–55 .
39. Oehorst, B. A. N., O. Kjekstad, D. Patel, Z. Lubkowski, J. G. Knoeff and G. J. Akkerman. 2005. Workpackage 6, Determination of Socio-Economic Impact of Natural Disasters. *J. Assessing socio-economic Impact in*

- Europe:173.
40. Ohlmacher, G. C. and J. C. Davis. 2003. Using Multiple Logistic Regression and GIS Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas USA. *J. Eng. Geology* 69: 331-343.
 41. Pradhan, B., S. Lee. 2009. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *J. Environ. Earth Sci.* 60: 1037-1054.
 42. Pradhan, B. 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *J. Adv Space Res* 45(10):1244-1256.
 43. Pradhan, B. 2011. An Assessment of the Use of an Advanced Neural Network Model with Five Different Training Strategies for the Preparation of Landslide Susceptibility Maps. *J. Data Sci.* 9:65-81.
 44. Regmi, N. R., J. R. Giardino and J. D. Vitek. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *J. Geomorphology* 115:172-187.
 45. Shirani, K., A. Seif and A. Nasr. 2011. The Effects of Various Factors on Landslide and Its Hazard Zonation Using GIS (Case Study of Karoon Basin of Iran), 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, IPCBEE, IACSIT Press, Singapore, 6:184-187.
 46. Suzen, M. L., V. Doyuran. 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *J. Eng Geol.* 71:303-352.
 47. Suzen M. L., V. Doyuran, 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *J. Environ. Geol.* 45:665-679.
 48. Swets, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *J. Science.* 240:1285-1293.
 49. Van Westen, C. J., Th. W. J. Van Asch, R. Soeters. 2006. Landslide hazard and risk zonation, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65: 167-184.
 50. Varnes, D. J. 1978. Slope movement and types and processes, in landslides analysis and control. *J. Transportation Res, Board Nat. Ac. Sci. Washington Spec.* 176:11-33.
 51. Yalcin, A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *J. Catena.* 72: 1-12.
 52. Yalcin, A., S. Reis, A. C. Aydinoglu, T. Yomralioglu. 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. *J. Catena.* 85: 274-287.
 53. Yesilnacar, E., T. Topal. 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *J. Eng. Geol.* 79: 251-266.
 54. Yilmaz, C., T. Topal and M. L. Suzen. 2012. GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). *J. Environ. Earth Sci.* 65: 2161-2178.