

ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل‌های آماری و لجستیک برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه ونک)

علیرضا عرب عامری*

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

کوروش شیرانی

استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، اصفهان، ایران

امیرحسین حلییان

دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۸

تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۸/۱۱

چکیده

هدف از این پژوهش تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری بر اساس سیستم اطلاعات جغرافیایی در جنوب غرب استان اصفهان، حوضه ونک است. نخست، موقعیت زمین‌لغزش‌ها در منطقه مطالعاتی با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی و پیمایش‌های میدانی متعدد تعیین گردید. از ۲۰۰ زمین‌لغزش شناسایی شده ۱۴۰ مورد (۷۰٪) به صورت تصادفی برای اجرای مدل و ۶۰ مورد (۳۰٪) برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. عوامل مؤثر در زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، بارندگی، فاصله از گسل، تراکم آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی از پایگاه داده‌های مکانی استخراج گردید. با استفاده از این فاکتورها، حساسیت زمین‌لغزش و وزن هر فاکتور به وسیله روش‌های رگرسیون لجستیک، تراکم سطح و فاکتور اطمینان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌ها با استفاده از روش جمع کیفی نشان داد مدل تراکم سطح بالاترین میزان جمع کیفی (۳۵/۰) و بعد از آن مدل‌های فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک به ترتیب با مقادیر جمع کیفی ۲۹/۰ و ۱۱/۰ در رده‌های بعدی قرار گرفتند. تفسیر نقشه‌های زمین‌لغزش نشان داد که پارامترهای طبقات ارتفاعی، بارندگی و جهت شیب نقش اصلی را در وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه بازی می‌کنند. این نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش می‌تواند به منظور برنامه‌ریزی کاربری اراضی، ساخت جاده در آینده و کاهش خطرهای مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: ارزیابی، زمین‌لغزش، روش‌های آماری، شاخص جمع کیفی، حوضه ونک.

مقدمه

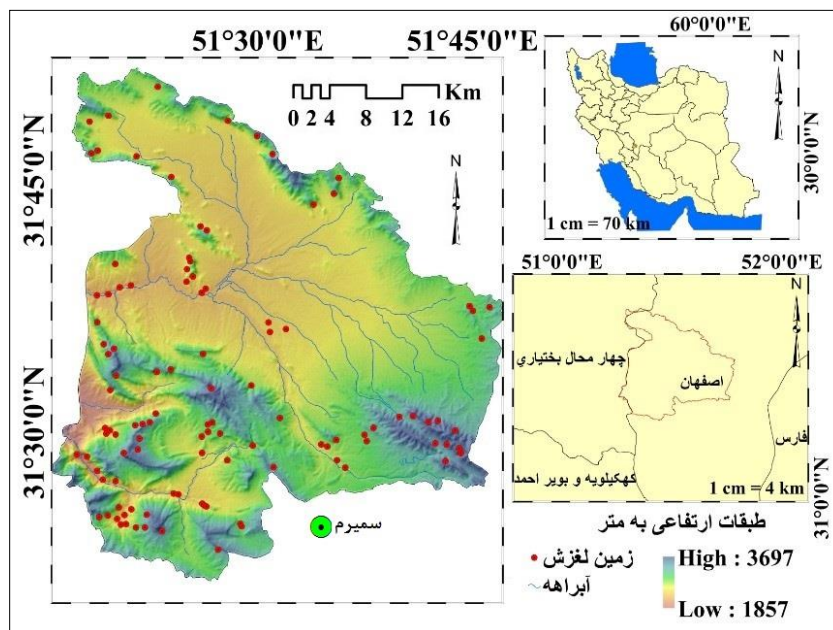
زمین‌لغزش‌ها از پدیده‌های رایج در مناطق کوهستانی و تپه ماهوری در سراسر جهان می‌باشند و در بسیاری از کشورها باعث آسیب‌های مالی و جانی زیادی می‌شوند و به همین دلیل پژوهش‌گران توجه خاصی به این بالای طبیعی دارند Alexakis et

(al., 2013; Hong et al., 2016). در دهه‌های آتی، مناطق حساس به زمین‌لغزش به خاطر شهرنشینی، فعالیت‌های توسعه‌ای، جنگل‌زدایی و الگوهای تغییرات آب و هوایی در حال افزایش است (Zhu et al., 2014). با توجه به اهمیت زمین‌لغزش‌ها در فرسایش خاک و نتایج مخرب آن برای انسان، پژوهش در خصوص عوامل مؤثر در زمین‌لغزش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (Chen et al., 2014). توپوگرافی عمدتاً مهم‌ترین فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته می‌شود (Youssef et al., 2015c). وابسته به لند فرم، چندین فاکتور می‌توانند باعث ایجاد و یا سرعت بخشیدن به زمین‌لغزش شوند. طبق مطالعه‌های گذشته، فعالیت‌های انسان (Pourghasemi and Kerle, 2016)، مورفولوژی زمین (Pradhan et al., 2014)، ویژگی‌های خاک (Nampak et al., 2014)، شیب (Youssef et al., 2015c)، جهت شیب (Youssef et al., 2015a)، شرایط آب و هوایی (Peng et al., 2014) و ویژگی‌های حوضه آبخیز مانند رودخانه و گسل (Girma et al., 2015) مهم‌ترین پارامترها هستند. شناخت روابط بین این فاکتورها و وقوع زمین‌لغزش برای ارزیابی کیفی خطرات زمین‌لغزش مهم است. ارزیابی قابل قبول به کیفیت و مقیاس داده‌های در دسترس و انتخاب روش مناسب برای تجزیه و تحلیل و مدله کردن بستگی دارد. زمین‌لغزش‌ها به دلیل تأثیرهای اجتماعی و اقتصادی‌شان باعث آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌شود، همچنین ممکن است باعث مرگ و یا از دست دادن دارایی، آسیب‌ها به منابع طبیعی و پروژه‌های زیربنایی مانند راه‌ها، پل‌ها و راه‌های ارتباطی شوند (Yesilnacar and Topal, 2005; Ilinca and Gheuca, 2011). در ایران اکثر زمین‌لغزش‌ها در کوه‌های البرز در شمال شرق، شمال غرب و کوه‌های زاگرس در قسمت‌های شمال غرب و شمال شرق اتفاق می‌افتد (Shoaei et al., 2005). در حال حاضر، گزارش معتبری که مقدار آسیب‌های ایجاد شده به وسیله زمین‌لغزش در ایران را تأیید کند وجود ندارد، اما برخی گزارش‌های غیر رسمی تخمین زده‌اند که تنها آسیب‌های مستقیم ناشی از آن ۵۰ میلیون دلار است (بلورچی و انصاری، ۱۳۷۸). به علت این آسیب‌ها سیاستمداران توجه زیادی به پژوهش در خصوص زمین‌لغزش برای تهیه نقشه پهنه‌بندی برای شناسایی مناطق حساس و مناطق باثبات برای توسعه آینده دارند (Yu et al., 2016)؛ بنابراین تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش یک گام اساسی در مدیریت جامع خطر زمین‌لغزش است (عربی و همکاران، ۱۳۹۳). در سال‌های اخیر استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مدله کردن خطرهای زمین‌لغزش به علت توسعه سیستم‌های تجاری مانند Arc/Info (ESRI) و دسترسی سریع به اطلاعات به دست آمده به وسیله سیستم موقعیت‌یاب جهانی و سنجش از دور افزایش یافته است (Regmi et al., 2010). سیستم اطلاعات جغرافیایی معمولاً به عنوان مجموعه قدرتمند از ابزار برای جمع‌آوری، ذخیره، نمایش و انتقال اطلاعات فضایی تعریف می‌گردد (Burrough and McDonnel, 1998). به کمک GIS تلفیق اطلاعات فضایی از لایه‌های مختلف برای تعیین تأثیر فاکتورها در وقوع زمین‌لغزش امکان‌پذیر است. مطالعات زیادی احتمال وقوع زمین‌لغزش را با استفاده از تکنولوژی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزیابی کرده‌اند و بیشتر این مطالعات از مدل‌های احتمالاتی استفاده کرده‌اند (Yilmaz, 2010; Oh and Lee,)

2010; Regmi et al., 2010; Intarawichian and Dasananda, 2011; Lepore et al., 2011; Oh and Lee, 2011a, 2011b; Suh et al., 2011). تاکنون برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با روش‌های ابتکاری، قطعی و آماری پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. در زمینه روش‌های آماری می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد (Dai and Lee, 2002; Can et al., 2005; Komac, 2006; Ayalew et al., 2007; Chang and Chiang, 2007; Lee and Pradhan, 2007; Yalcin, 2008; Pradhan and Youssef, 2010; Bednarik et al., 2010; Pradhan and Lee, 2010; Akgu'n et al., 2011; Oh et al., 2011; Intarawichian and Dasananda, 2011; Choi et al., 2012; Hamza and Raghuvanshi, 2016; Devkota et al., 2012; Regmi et al., 2014). از مهم‌ترین اهداف این پژوهش در مرحله نخست می‌توان به شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی اشاره کرد و در گام بعد تهیه نقشه پهنه‌بندی با استفاده از روش‌های آماری فاکتور اطمینان، تراکم سطح و رگرسیون لجستیک و در آخرین گام به مقایسه کارایی روش‌ها و انتخاب مناسب‌ترین روش برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش می‌توان اشاره نمود. در این پژوهش جهت ارزیابی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از روش جمع کیفی استفاده شده است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

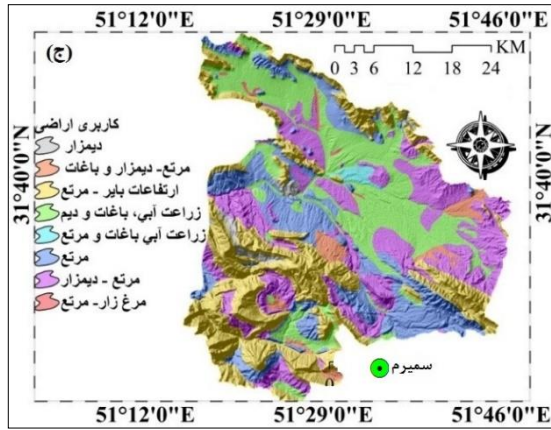
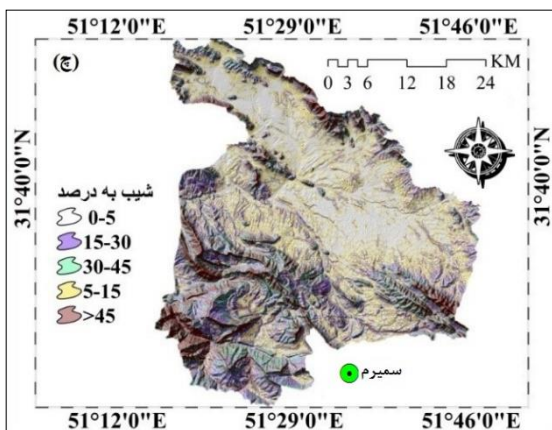
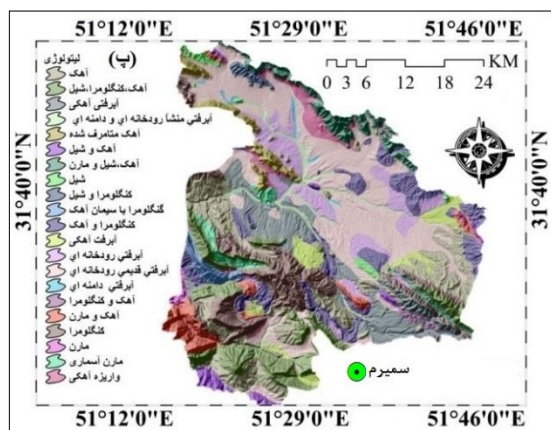
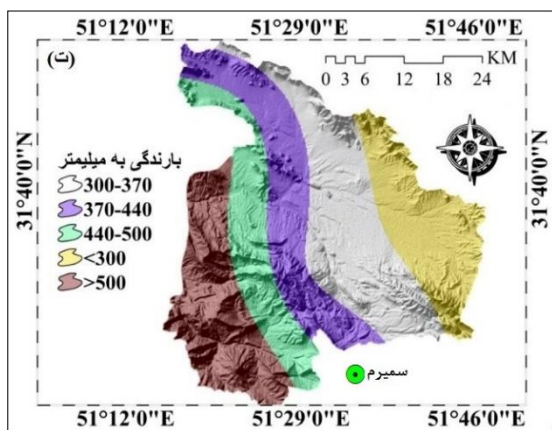
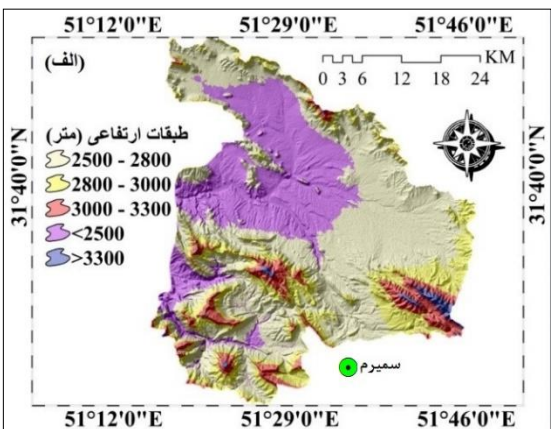
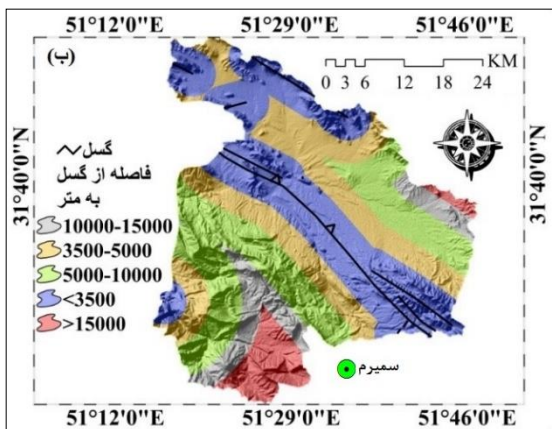
حوضه آبخیز سمیرم در محدوده‌ی سیاسی شهرستان سمیرم از استان اصفهان واقع شده است. وسعت حوضه در حدود ۱۶۸۵۴۷ هکتار بوده و در محدوده‌ی طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}14'50''$ تا $51^{\circ}48'15''$ و عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ}21'05''$ تا $31^{\circ}52'10''$ قرار دارد (شکل ۱). این حوضه در زون ساختاری سنندج - سیرجان و زاگرس مرتفع قرار دارد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی سازندهای رخنمون یافته از قدیم به جدید شامل شیل، آهک و ماسه‌سنگ سازند سورمه در ژوراسیک، سازندهای فهلپان، گدوان، داریان، تاربور و واحدهای آهکی کرتاسه، تناوب مارن، آهک و دولومیت، ماسه سنگ و کنگلومرا مربوط به سازندهای کشکان، شهبازان، چهرم، پابده، آسماری، رازک، آغاچاری مربوط به دوران دوم و کنگلومرای بختیاری همراه با رسوب‌های آبرفتی قدیمی و جدید، مخروط افکنه‌ها، پهنه‌های رسی و سیلتی و ماسه‌ای و رسوب‌های بستر رودخانه متعلق به عهد حاضر است.

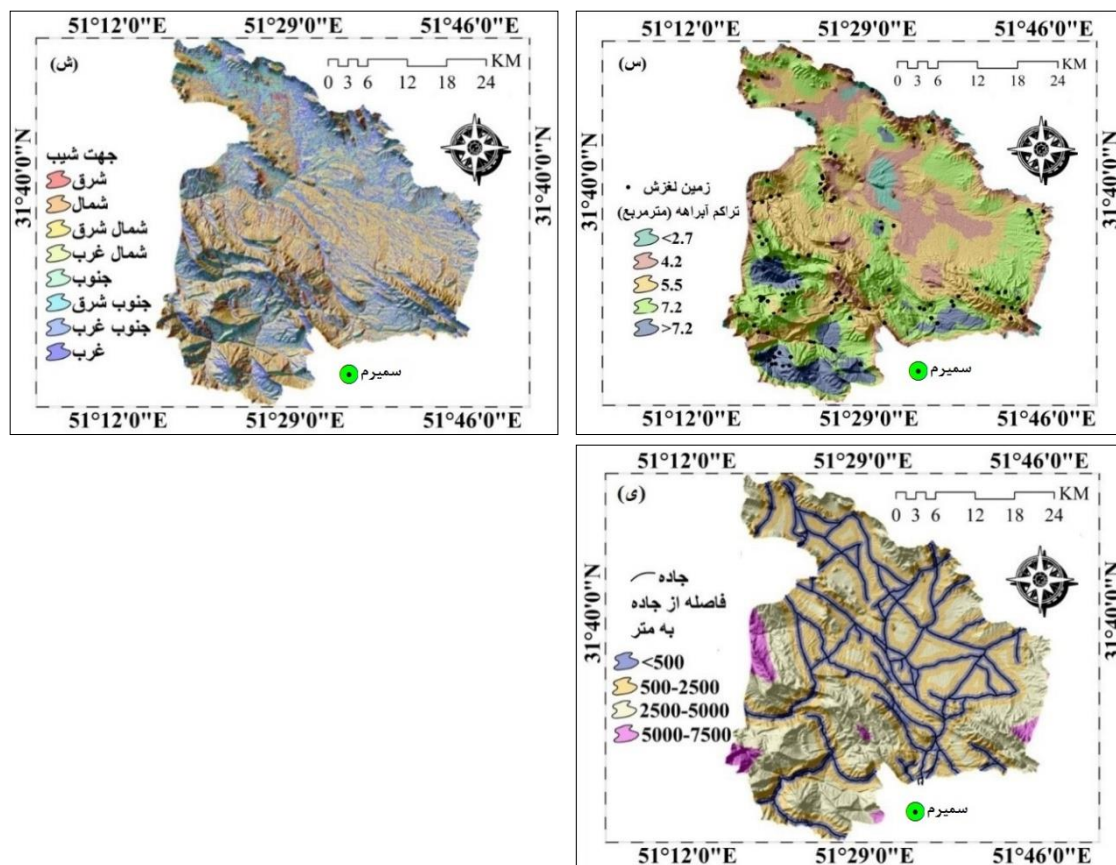


شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

معیارهای به‌کاررفته در این پژوهش بر اساس پژوهش‌های پیشین در این مورد شناسایی شده‌اند (Van Westen et al., 2003, Dahal et al., 2008, Concha-Dimas et al., 2007). عامل اولیه مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه شامل لیتولوژی (شکل ۴)، کاربری اراضی (شکل ۶)، شیب (شکل ۷)، جهت شیب (شکل ۹)، کاربری اراضی (شکل ۶)، بارش (شکل ۵)، فاصله از گسل (شکل ۳)، فاصله از جاده (شکل ۱۰)، تراکم آبراهه (شکل ۸) می‌باشند. نقشه‌های پایه مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی در مقیاس ۱:۴۰۰۰۰، نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و با استفاده از آمار بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی، نقشه هم‌باران تهیه گردید. نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر ذکر شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 تهیه و جهت پردازش آماده شدند. درجه شیب، جهت شیب تهیه گردید. با اعمال فرمول گرادیان بارندگی منطقه بر مدل رقومی ارتفاع، نقشه طبقات بارش منطقه تهیه شد. برای تهیه نقشه فاصله از گسل از داده‌های ماهواره‌ای ETM+2002 در محیط نرم‌افزار ENVI4.7 استفاده گردید. نقشه فاصله از جاده و تراکم زه‌کشی با طبقه‌بندی فواصل معین از شبکه جاده و شبکه هیدروگرافی رقومی شده از نقشه توپوگرافی منطقه تهیه شدند. بر اساس طبقه‌بندی نظارت‌نشده تصویر ماهواره‌ای تصحیح‌شده لندست ETM+ و بازدید صحرایی و کنترل صحت، نقشه کاربری اراضی منطقه تهیه گردید. همچنین بر اساس تفکیک و رقومی کردن پلی‌گون‌های واحدهای سنگ‌شناسی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه شد.





شکل ۲. پارامترهای مؤثر در لغزش. الف) طبقات ارتفاعی، ب) فاصله از گسل، پ) لیتولوژی، ت) بارندگی، ج) کاربری اراضی، چ) شیب، س) تراکم آبراهه، ش) جهت شیب، ی) فاصله از جاده. منبع: نگارندگان

نقشه پراکنش زمین‌لغزش

نقشه پراکنش زمین‌لغزش در تمامی مطالعات مربوط به زمین‌لغزش از شناسایی، پایش، پهنه‌بندی حساسیت^۱، خطر^۲، ریسک^۳ و خصوصاً ارزیابی و تحلیل خطر و ریسک زمین‌لغزش جزء لاینفک و به‌عنوان لایه مبنایی و مهم است. بدیهی است صحت و دقت هر چه بیشتر این نقشه موجب تهیه نقشه‌های حساسیت، خطر و ریسک دقیق‌تر و در نتیجه منجر به ارزیابی درست و واقعی از این نقشه‌ها می‌گردد. نقشه‌های پراکنش در واقع موقعیت تمامی لغزش‌هایی که دارای اشکال و آثار بجا مانده‌ای از خود هستند و زمان رخداد و نوع حرکت توده‌ای را گزارش می‌کنند را در بر دارند (Hansen, 1984) نقشه‌های پراکنش بر اساس هدف و اطلاعات در دسترس در مقیاس‌های مختلفی تهیه می‌گردند. نقشه‌های پراکنش متوسط مقیاس در مطالعات ژئومورفولوژی، در تجزیه و تحلیل توزیع منطقه‌ای انواع و الگوهای زمین‌لغزش (Lee, 2004) و در ایجاد پایگاه داده به‌منظور ارزیابی آماری خطر و ریسک زمین‌لغزش کاربرد دارند. جهت به نقشه در آوردن انواع لغزش‌های رخ داده در محدوده مطالعاتی،

¹ Susceptibility

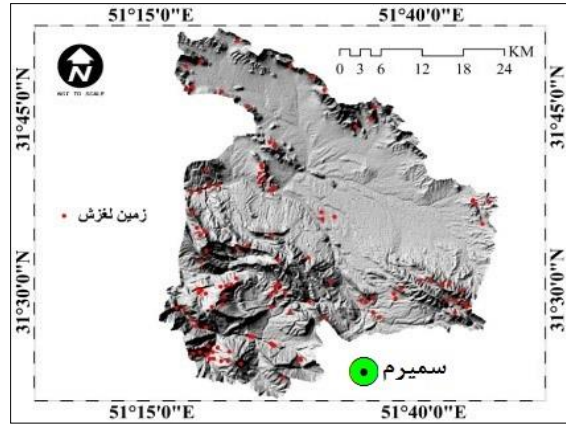
² Hazard

³ Risk

ابتدا عکس‌های هوایی منطقه با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ به روش استریوسکوپ و همچنین داده‌های ماهواره‌ای لندست هفت با استفاده از نرم‌افزار ENVI تفسیر شده‌اند و مناطق مشکوک به لغزش تعیین شد، در مرحله بعد با انجام پیمایش صحرایی دقیق، موقعیت لغزش‌ها با استفاده از دستگاه GPS با دقت زیاد به نقشه درآمد (شکل ۳). نمونه‌ای از زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: زمین‌لغزش سطحی



شکل ۳: نقشه پراکنش زمین‌لغزش منبع: نگارندگان

بحث و یافته‌ها

اجرای مدل رگرسیون لجستیک

یکی از مدل‌های آماری مناسب جهت اجرای پهنه‌بندی بر اساس داده‌های موجود، استفاده از مدل رگرسیونی است Lee, (2004) در مدل رگرسیون بر اساس داده‌های موجود، معادله‌ای جهت پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته (Y) بر اساس یک یا چند متغیر پیش‌گویی مستقل (Xi) 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 می‌گردد و مدل اصطلاحاً رگرسیون لجستیک نامیده می‌شود که معادله آن مطابق رابطه زیر است.

$$Y = \text{Logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

که در آن احتمال وقوع $P = \text{Logit}(P) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right)$ ، β_0 عدد ثابت، X_1 تا X_n متغیر مستقل و β_1 تا β_n نیز به ترتیب ضرایب این متغیرها می‌باشند. در واقع در رابطه (۱) مقادیر $\text{Logit}(p)$ برآورد شده و سپس بر اساس آن مقادیر P استخراج می‌گردد. برای حل معادله فوق از روش کمترین توان‌های دوم وزنی می‌توان استفاده کرد، ولی این روش مشکلاتی از قبیل نامشخص بودن مقادیر P دارد. به‌جای آن از روش حداکثر شباهت استفاده می‌شود. در این روش برای استخراج ضرایب مقادیر تابع حداکثر شباهت، از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{(1 - y_i)} \quad (2)$$

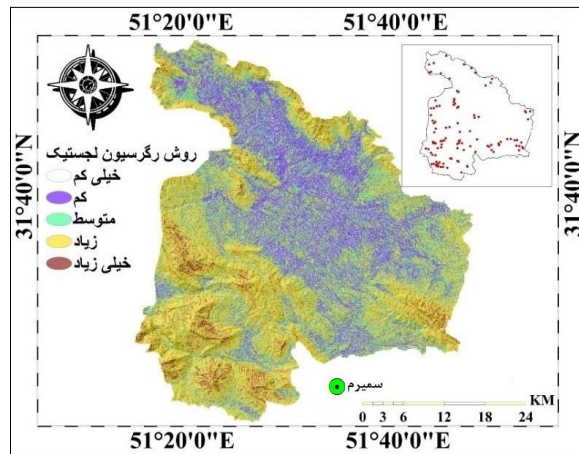
که در آن، P_i احتمال وقوع لغزش است و بر اساس رابطه (۱) برآورد می‌گردد، y_i مقادیر مشاهده‌شده حرکت توده‌ای است که بنا بر تعریف، مقادیر صفر یا یک خواهد بود. مدل خطی که رگرسیون لجستیک آن را ارائه می‌دهد، بسته به لغزش‌های روی داده در رابطه با متغیرهای مستقل با شرایطی که قبلاً باعث حرکات توده‌ای شده است می‌باشد (Lee, 2004) از آنجایی که کاربرد مدل آماری رگرسیون لجستیک ایجاد ارتباط بین عوامل ناپایدار شیب و متغیر وابسته دوحالتی یعنی وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش است، علاوه بر ۱۹۹ نقطه لغزشی شناسایی‌شده در منطقه ۱۹۹ نقطه رستری دیگر به صورت تصادفی در سراسر حوضه انتخاب‌شده و پس از همپوشانی با نقشه عوامل مؤثر به کلاس‌های شامل حضور نقاط وقوع کد ۱ و به سایر کلاس‌ها کد صفر تعلق گرفت، همچنین در مورد نقاط غیر لغزشی، به طبقات عوامل مؤثر شامل حضور نقاط غیر لغزشی عدد یک و به سایر طبقات کد صفر تعلق گرفت. با ورود داده‌ها به مدل تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفت و در نهایت ضرایب به کلاس‌های متغیرهای مستقل همبسته با متغیر وابسته اختصاص داده شد. پس از اعمال ضرایب به دست‌آمده از مدل به طبقات متغیرهای مستقل پارامتر خطی Z تهیه‌شده که با جای گذاری آن در معادله اصلی رگرسیون لجستیک و انتقال آن به نرم‌افزار ArcGIS 10.2 نقشه اولیه احتمال خطر با محدوده بین صفر و یک تهیه شد. سپس این نقشه به ۳۰ طبقه با فواصل احتمالی ۰/۰۴ تقسیم‌بندی و پس از همپوشانی با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوزه، هیستوگرام درصد فراوانی زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید و در نهایت ۵ کلاس خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم برای نقشه نهایی خطر زمین‌لغزش به دست آمد شکل (۵). دولایه کیفی زمین‌شناسی و جهت شیب پس از وزن دهی بر اساس نظر کارشناسی به لایه‌های کمی تبدیل گردیده‌اند. جدول (۱) ضرایب، میانگین و انحراف از معیار حاصل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک با ۹ متغیر را نشان می‌دهد. در نهایت معادله رگرسیون حاصله مطابق رابطه ۳ ارائه گردید:

$$\text{Logit (LANDSLIDE)} = -9.5400 + (0.237819 \times \text{Aspect}) + (0.524297 \times \text{Altitude}) + (-0.188468 \times \text{Drainage}) \quad (3) \\ + (-0.161814 \times \text{Fault}) + (0.141 \times \text{Geology}) + (-0.398539 \times \text{Landuse}) + (0.505626 \times \text{Rain}) + (-0.008911 \times \text{Road}) + (-0.036615 \times \text{Slope})$$

جدول ۱: ضرایب، میانگین و انحراف از معیار حاصل از رابطه رگرسیون لجستیک

متغیرهای مستقل	ضرایب	میانگین	انحراف از معیار
عدد ثابت	-۹/۵۳	-	-
جهت شیب	۰/۲۳۷	۰/۰۰۳	۰/۹۹۹
طبقات ارتفاعی	۰/۵۲۴	۰/۰۰۹	۱/۰۰۲
تراکم آبراهه	-۰/۱۸۸	۰/۰۰۵	۱/۰۰۳
فاصله از گسل	-۰/۱۶۱	۰/۰۰۴	۱/۰۰۶
لیتولوژی	۰/۱۴۱	-۰/۰۰۰	۰/۹۹۷
بارندگی	۰/۵۰۵	۰/۰۰۷	۱/۰۰۴
فاصله از جاده	-۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۱/۰۰۴
شیب	-۰/۰۳۶	۰/۰۰۳	۱/۰۰۱
کاربری اراضی	-۰/۳۹۸	۰/۰۰۳	۰/۹۹۸

منبع: نگارندگان



شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با روش رگرسیون لجستیک منبع: نگارندگان

اجرای روش تراکم سطح^۱

در این روش از طریق روابط (۴) و (۵) برای هر نقشه عامل یا پارامتر، تراکم زمین‌لغزش محاسبه می‌شود و سپس اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش می‌شود (Lee and kyungduck.) 2001

$$D_{area} = \frac{N_{pix}(SX_i)}{N_{pix}(X_i)} \quad (۴)$$

$$W_{area} = 1000 \left[D_{area} - \frac{\sum N_{pix}(SX_i)}{\sum N_{pix}(X_i)} \right] \quad (۵)$$

که در آن D_{area} : تراکم زمین‌لغزش در هر رده از پارامتر، $N_{pix}(SX_i)$: تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر رده از پارامتر مشخص، $N_{pix}(X_i)$: تعداد کل پیکسل‌ها در هر رده از پارامتر مشخص، W_{area} : وزن متغیر هر رده از هر پارامتر.

اجرای روش فاکتور اطمینان

از میان روش‌های آماری دومتغیره، مدل فاکتور اطمینان بررسی‌های موشکافانه‌ای را انجام می‌دهد (Binaghi et al., 1998). این مدل مشکل ترکیب لایه‌های اطلاعاتی ناهمگن را برطرف می‌کند. در واقع تفاوت اصلی این مدل با دیگر مدل‌های دومتغیره نحوه تلفیق نقشه‌ها در آن است. به این صورت که ابتدا نقشه‌ها کلاسه‌بندی شده، سپس با استفاده از رابطه (۶) وزن هر یک از پیکسل‌ها به دست می‌آید.

$$F = \left\{ \begin{array}{l} \frac{PPa - PP_s}{PPa(1 - PP_s)} \text{ if } PP_s \geq PP_s \\ \frac{-PPa - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} \text{ if } PP_a < PP_s \end{array} \right\} \quad (۶)$$

¹ Density Area

که در اینجا PPa: نسبت تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس به کل پیکسل‌های آن کلاس و PPs: نسبت کل پیکسل‌های لغزشی منطقه به کل پیکسل‌های نقشه است. با کمک این فرمول هر کلاس به صورت -۱ و +۱ ارزش‌گذاری می‌شود. اگر ارزش کلاس مربوطه مثبت باشد نشان‌دهنده این است که اطمینان وقوع زمین‌لغزش بالاست و اگر ارزش کلاس مربوطه منفی باشد یعنی اطمینان وقوع لغزش کم است و اگر ارزش آن کلاس صفر باشد یعنی در اینجا اطلاعات کافی در مورد متغیر وجود نداشته است و بنابراین عدم اطمینان در وقوع زمین‌لغزش وجود دارد. در مرحله بعد ترکیب لایه‌ها بر اساس قانون فاکتور اطمینان انجام می‌گیرد، بدین صورت که یک نقشه را با عنوان X و نقشه دیگر Y در نظر گرفته و آن‌ها را طبق رابطه (۷) ترکیب می‌کند که سه فرمول برای حالت‌های مختلف X و Y وجود دارد. دوباره نقشه X و Y جدید بر اساس همین رابطه باهم ترکیب می‌شوند. این ترکیب نقشه‌ها تا آخرین نقشه انجام شده و وزن نهایی محاسبه می‌گردد.

$$Wf = \frac{(TWi) - (TWi_{min})}{(TWi_{max}) - (TWi_{min})} \times 100 (V)$$

که W_F : مقدار وزن عامل‌ها برای هر عامل، TW_i : مجموع مقادیر W_i مربوط به سلول‌هایی که در محدوده زمین‌لغزش‌ها قرار گرفته‌اند و برای هر عامل محاسبه می‌شوند، $TW_{i_{min}}$: کمینه مجموع مقادیر W_i در میان عوامل انتخاب شده و $TW_{i_{max}}$: بیشینه مجموع مقادیر W_i در میان عوامل انتخاب شده است. برای اجرای روش‌های آماری در این پژوهش، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها، با نقشه‌های عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش‌ها تلفیق شده و تراکم لغزش‌ها در هر یک از طبقه‌های عامل‌های تأثیرگذار به دست آمد. سپس وزن هر یک از کلاس‌ها با بهره‌گیری از مدل‌های عامل اطمینان W_{CF} و تراکم سطح W_{DA} به دست آمد. نتایج به دست آمده در جدول (۲) ارائه شده است. پس از محاسبه وزن‌ها و ترکیب آن‌ها، نقشه پهنه‌بندی با بهره‌گیری از هر مدل به دست آمد و بر اساس شکست‌های طبیعی به ۵ کلاس (عرب عامری و حلییان، ۱۳۹۴؛ عرب عامری و شیرانی، ۱۳۹۵؛ شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴) طبقه‌بندی که در اشکال (۷ - ۶) نشان داده شده است.

جدول ۲: وزن دهی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش با مدل‌های عامل اطمینان و تراکم سطح منبع: نگارندگان

عوامل مؤثر	رده‌های عوامل مؤثر	کل پیکسل‌ها	پیکسل‌های لغزشی	W_{DA}	W_{CF}
	<۲۵۰۰	۵۰۶۸۹۳	۲۰	-۰/۰۱۹	-۰/۳۳۲
طبقه‌های ارتفاعی	۲۸۰۰	۸۹۹۸۲۴	۵۴	۰/۰۰۲	-۰/۰۳۰
	۳۰۰۰	۳۱۲۳۸۲	۱۹	۰/۰۰۳	۰/۰۴۳
	۳۳۰۰	۱۳۳۷۳۰	۱۳	۰/۰۳۹	۰/۴۰۱
	>۳۳۰۰	۱۹۸۱۷۵	۳	۰/۰۹۳	۰/۶۱۴
جهت شیب	شمال	۱۸۱۲۵۹	۱۶	۰/۰۳۰	۰/۳۴۱
	شمال‌شرق	۲۴۱۴۷۵	۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۴
	شرق	۲۲۴۶۷۰	۱۳	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۶
	جنوب‌شرق	۲۴۹۱۰۱	۱۱	-۰/۰۱۴	-۰/۲۴۱
	جنوب	۲۷۷۸۸۶	۱۱	-۰/۰۱۹	-۰/۳۳۰

-۰/۲۰۰	-۰/۰۱۲	۱۳	۲۷۹۰۵۲	جنوب غرب
۰/۱۸۲	۰/۰۱۳	۱۲	۱۶۸۷۰۴	غرب
۰/۲۳۲	۰/۰۱۸	۱۹	۲۵۰۵۵۷	شمال غرب

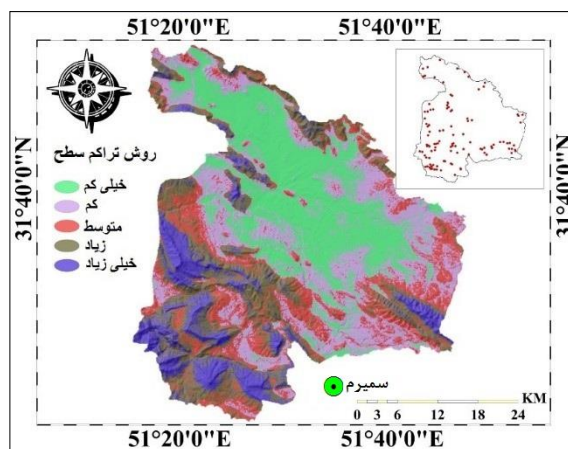
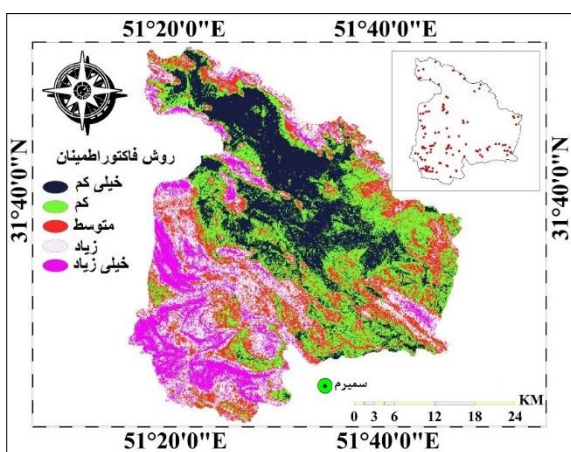
ادامه جدول ۲

W _{CF}	W _{DA}	پیکسل‌های لغزشی	کل پیکسل‌ها	رده‌های عوامل مؤثر	عوامل مؤثر
-۰/۶۱۰	-۰/۰۳۶	۱۱	۴۸۵۱۰۰	۰-۵	شیب
-۰/۵۴۲	-۰/۰۳۲	۱۲	۴۵۰۴۰۳	۵-۱۵	
-۰/۱۳۹	-۰/۰۰۸	۱۹	۳۷۹۱۸۵	۱۵-۳۰	
۰/۴۰۲	۰/۰۳۹	۲۴	۲۴۶۳۹۹	۳۰-۴۵	
۰/۵۷۸	۰/۰۸۰	۴۳	۳۱۱۶۱۷	>۴۵	
۰/۵۹۲	۰/۰۸۴	۹	۶۳۰۶۸	<۵۰۰	فاصله از جاده
۰/۳۷۹	۰/۰۳۵	۶۲	۶۶۱۸۶۳	۵۰۰-۲۵۰۰	
-۰/۲۸۸	-۰/۰۱۷	۲۷	۶۵۱۸۲۴	۲۵۰۰-۵۰۰۰	
-۰/۶۱۹	-۰/۰۳۶	۱۱	۴۹۵۹۴۹	۵۰۰۰-۷۵۰۰	
-۰/۴۲۳	-۰/۰۲۵	۲	۵۸۵۰۸	<۲/۷	تراکم آبراهه
-۰/۷۸۸	-۰/۰۴۷	۴	۳۱۸۸۹۹	۴/۲	
۰/۰۲۲	۰/۰۰۱	۴۴	۷۲۵۹۴۵	۵/۵	
۰/۱۳۹	۰/۰۱۰	۴۲	۶۰۹۸۲۶	۷/۲	
۰/۵۰۲	۰/۰۶۰	۱۹	۱۵۹۶۲۶	>۷/۲	
۰/۴۷۸	۰/۰۵۳	۱۸	۱۶۱۵۸۵	<۳۵۰۰	فاصله از گسل
۰/۰۴۴	۰/۰۰۳	۲۸	۶۲۳۸۹۵	۳۵۰۰-۵۰۰۰	
-۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۲۸	۴۸۳۹۶۳	۵۰۰۰-۱۰۰۰۰	
-۰/۰۳۸	-۰/۰۰۲	۷	۱۲۵۰۵۱	۱۰۰۰۰-۱۵۰۰۰	
-۰/۳۵۳	-۰/۰۲۱	۱۸	۴۷۸۲۱۰	>۱۵۰۰۰	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۶۵۹۳	کنگلومرا	لیتولوژی
-۰/۵۶۵	-۰/۰۳۳	۴	۱۵۷۹۳۱	کنگلومرا و سنگ آهک	
-۰/۲۸۸	-۰/۰۱۷	۱	۲۴۱۴۵	کنگلومرا باسیمان آهکی	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۴۴۵۰۶	واریزه‌های آهکی	
۰/۴۱۲	۰/۰۴۱	۳۱	۳۱۳۰۴۶	سنگ آهک	

ادامه جدول ۲

W _{CF}	W _{DA}	پیکسل‌های لغزشی	کل پیکسل‌ها	رده‌های عوامل مؤثر	عوامل مؤثر
-۰/۷۶۳	-۰/۰۴۴	۳	۲۱۷۶۷۸	آبرفتی آهکی	لیتولوژی
۰/۳۶۳	۰/۰۳۳	۱۶	۱۷۵۰۴۴	آهکی و کنگلومرا	
-۰/۴۴۰	-۰/۰۲۶	۱	۳۰۶۸۲	آهکی کمی متمرف شده	
۰/۶۱۱	۰/۰۹۱	۲۴	۱۶۰۴۰۲	سنگ آهک، کنگلومرا و شیل	
۰/۶۵۶	۰/۱۱۱	۴	۲۳۶۲۹	سنگ آهک، شیل و مارن	
۰/۴۳۷	۰/۰۴۵	۸	۷۷۴۲۶	کنگلومرای متمرف	
۰/۶۷۵	۰/۱۲۱	۸	۴۴۶۲۰	مارن آسماری و پابنده	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۲۸۳۲۳	آهک دگرگونی و شیل	
-۰/۶۱۲	-۰/۰۳۶	۹	۳۹۸۴۱۳	آبرفت‌های منشأ دامنه‌ای	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۱۲۳۳۲۵	آبرفت‌های رودخانه‌ای	

-۱	-۰/۰۵۸	۰	۴۶۹۴۱	آبرفت‌های منشأ رودخانه‌ای و دامنه‌ای	
-۰/۶۲۴	-۰/۰۳۷	۹	۴۲۲۵۸۸	زراعت آبی، باغ‌ها و دیم	کاربری اراضی
-۰/۱۵۸	-۰/۰۰۹	۱۷	۳۴۶۸۷۳	مراتع	
-۰/۴۸۸	۰/۰۵۵	۶۳	۵۵۴۱۶۴	ارتفاع‌های بایر، دامنه مراتع	
-۰/۴۲۵	-۰/۰۲۵	۱۵	۴۴۷۸۶۳	مرتع، دیمزار	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۸۵۸۴	مرغزار، مرتع	
-۰/۶۵۷	۰/۱۱۱	۴	۲۳۵۹۸	مرتع، دیمزار	
-۰/۶۸۶	-۰/۰۴۰	۱	۵۴۷۹۴	مرتع، دیمزار و باغ‌ها	
-۱	-۰/۰۵۸	۰	۰/۱۴۲۴۰	زراعت آبی، باغ‌ها، دیمزار و مرتع	
-۰/۲۹۸	-۰/۰۱۷	۱۴	۳۴۲۴۳۰	۳۰۰ <	بارندگی
-۰/۳۳۶	-۰/۰۲۰	۱۹	۴۹۱۵۹۴	۳۰۰ - ۳۷۰	
-۰/۴۹۴	-۰/۰۲۹	۱۱	۳۷۳۳۴۹	۳۷۰ - ۴۴۰	
۰/۱۶۸	۰/۰۱۲	۲۰	۲۸۵۷۴۲	۴۴۰ - ۵۰۰	
۰/۵۰۹	۰/۰۶۰	۴۵	۳۷۹۵۸۹	۵۰۰ >	



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی با روش تراکم سطح منبع: نگارندگان
شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی با روش فاکتور اطمینان

ارزیابی روش‌های آماری

در این مرحله باتلاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش‌های آماری ارزش اطلاعات، فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک در محیط GIS، ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش انجام گرفت. استفاده از شاخص‌های نسبت تراکمی (Dr)^۱، به‌منظور مقایسه بین پهنه‌های خطر در هر روش و شاخص‌های مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) برای مقایسه روش‌ها نسبت به هم کاربرد دارند، به‌عبارت‌دیگر، شاخص مجموع

^۱ Density Area

کیفیت و دقت، مدل مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی و شاخص نسبت تراکم، دقت تفکیک بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از مدل‌های پهنه‌بندی را معرفی می‌کند (Guzzetti et al., 2000).

درستی یا مجموع کیفیت (Qs)^۱: برای تعیین مجموع کیفیت ابتدا باید نسبت تراکم محاسبه گردد که در قالب رابطه (۸) محاسبه می‌گردد (Gee, 1992)

$$D_r = \frac{\sum_i A_i}{\sum_i S_i} \quad (۸)$$

که در آن S_i : مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده خطر، A_i : مساحت i مین رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی و n : تعداد رده‌های خطر است. هرچه تفکیک بین رده‌های خطر توسط شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش از دقت بالاتری برخوردار است. مقدار مجموع کیفیت (Qs) نشان‌دهنده درستی یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر رانش زمین در منطقه است. معمولاً مقدار این شاخص در روش‌های مختلف در گستره صفر و ۷ قرار می‌گیرد. اگرچه از نظر تئوری، حدی برای آن وجود ندارد. در ارزیابی روش‌ها هر چه مقدار مجموع کیفیت (Qs) بیشتر باشد، روش از درستی و مطلوبیت بیشتری در تفکیک برخوردار است. مقدار مجموعه کیفیت از رابطه (۹) به دست می‌آید (Gee, 1991).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n ((D_r - 1) \times S) \quad (۸)$$

Q_s : مجموع کیفیت، D_r : نسبت تراکم، S : نسبت مساحت هر رده خطر نسبت به مساحت کل منطقه، n : تعداد کلاس خطر.

دقت روش (P)^۲ عبارت است از مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به مساحت آن پهنه‌ها (Jade and Sarkar, 1993) رابطه (۹).

$$P = KS/S \quad (۹)$$

P : دقت روش در پهنه‌بندی خطر زیاد و خیلی زیاد، KS : مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، S : مساحت پهنه‌های خطر مربوطه. در جدول (۳) دقت روش (P) در هر سه مدل مورد استفاده نشان داده شده است. دقت روش در مدل تراکم سطح نسبت به مدل‌های دیگر بیشتر است که بیانگر مطلوبیت این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. نتایج حاصل از نسبت تراکم نیز بیانگر آن است که در روش‌های تراکم سطح و فاکتور اطمینان، نسبت تراکمی (DR) ضمن تفکیک‌پذیری خوب، متناسب با افزایش خطر پهنه‌ها، افزایش یافته است. این موضوع بیانگر دقت خوب تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر در هر دو روش بوده است. این در حالی است که این دقت تفکیک‌پذیری در روش رگرسیون لجستیک ملاحظه نمی‌شود. همچنین مقدار شاخص مجموع کیفیت (Qs) که در جدول (۳) نشان داده شده است، نشانگر این است که

¹ Quality Summation

² Percision

روش تراکم سطح، بیشترین مقدار (۰/۳۵) را نسبت به روش‌های دیگر کسب کرده است یا به عبارت دیگر روش تراکم سطح نسبت به دو روش دیگر مطلوبیت بیشتری دارد.

جدول ۳: ارزیابی مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

روش پهنه‌بندی	کلاس خطر	مساحت (ha)	سطح لغزش در کلاس (ha)	نسبت مساحت	نسبت تراکم (Dr)	مجموع کیفیت (Qs)	دقت (P)
تراکم سطح (DA)	خیلی کم	۳۱۳۴۶۷	۷۲۰۰	۷/۳۴	۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۰۹
	کم	۳۳۵۱۸۷	۷۲۰۰	۷/۳۴	۰/۴۱		
	متوسط	۴۸۱۲۵۹	۱۷۱۰۰	۱۷/۴۳	۰/۶۸		
	زیاد	۵۱۰۰۵۲	۴۴۱۰۰	۴۴/۹۵	۱/۶۵		
فاکتور اطمینان (CF)	خیلی کم	۲۲۲۷۵۶	۳۶۰۰	۳/۶۷	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۰۸
	کم	۳۲۷۷۲۵	۸۱۰۰	۸/۲۶	۰/۴۷		
	متوسط	۴۶۰۷۶۷	۱۷۱۰۰	۱۷/۴۳	۰/۷۱		
	زیاد	۵۶۲۸۱۶	۳۹۶۰۰	۴۰/۳۷	۱/۳۴		
رگرسیون لجستیک	خیلی کم	۴۵۱۳۳۴	۲۸۸۰۰	۲۹/۳۶	۱/۲۲	۰/۱۱	۰/۰۳
	کم	۵۸۹۷۴۰	۳۶۹۰۰	۳۷/۶۱	۱/۱۹		
	متوسط	۳۶۶۸۰۴	۲۰۷۰۰	۲۱/۱۰	۱/۰۸		
	زیاد	۳۱۵۷۰۷	۴۵۰۰	۴/۵۹	۰/۲۷		
	خیلی زیاد	۱۴۶۹۳۱	۷۲۰۰	۷/۳۴	۰/۹۳		

منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها به‌طور ساده از عملکرد نیروی گرانش زمین بر دامنه‌ها ناشی می‌شوند و تا زمانی که مقاومت توده سنگ یا خاک بزرگ‌تر یا مساوی نیروی گرانش باشد، نیروها در حال تعادل هستند و حرکتی رخ نمی‌دهد. به دیگر سخن، زمین‌لغزش را می‌توان نمود تغییرات تعادلی سطوح شیب‌دار، به دنبال اغتشاشات محیطی وارد بر ژئوسیستم تلقی نمود. پایداری و حفظ شرایط تعادلی در برابر این نیروی وارده، به اکولوژی و ساختار هیدروژئومورفولوژیکی سطوح برمی‌گردد (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲). در این پژوهش به شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های آماری در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پرداخته شده است. نتایج ارزیابی مدل‌ها با استفاده از روش جمع کیفی (QS) نشان داد مدل تراکم سطح بالاترین میزان جمع کیفی (۰/۳۵) را به خود اختصاص داده است. بعدازآن مدل‌های فاکتور اطمینان و رگرسیون

لجستیک به ترتیب با مقادیر جمع کیفی ۰/۲۹ و ۰/۱۱ در رده‌های بعدی قرار دارند؛ بنابراین مدل تراکم سطح دارای کارایی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در منطقه بوده است. بالا بودن مقدار جمع کیفی در روش تراکم سطح بیانگر این است که اولویت‌بندی عوامل مؤثر در رخداد خطر زمین‌لغزش با دقت بالایی صورت گرفته است. نتایج حاصل از بررسی کلاس‌های عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش بیانگر این مطلب است که وقوع حرکات توده‌ای با عوامل شیب، طبقات ارتفاعی، بارندگی و تراکم شبکه زه‌کشی رابطه مثبت و با فاصله از جاده و فاصله از گسل رابطه منفی دارد، به عبارت دیگر وقوع حرکات توده‌ای با افزایش شیب، بارندگی، ارتفاع و تراکم آبراهه، افزایش و با فاصله از گسل و آبراهه کاهش می‌یابد. در نهایت پس از تعیین وزن کلاس‌های عوامل مؤثر در زمین‌لغزش، حوضه مورد نظر به ۵ کلاس از پتانسیل وقوع خیلی زیاد تا خیلی کم با استفاده از مدل‌های تراکم سطح، عامل اطمینان و رگرسیون لجستیک طبقه‌بندی گردید. در مدل تراکم سطح ۶۷/۸۹ درصد از منطقه در رده‌های خطر زیاد و خیلی زیاد و در مدل‌های فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک به ترتیب ۷۰/۶۵ و ۱۱/۹۳ درصد از منطقه در رده خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفت.

منابع

۱. بلورچی، م، انصاری، ف، (۱۳۷۸): سنگ افت در روستای آبی کار در استان چهارمحال و بختیاری، کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط، دانشگاه تربیت مدرس، صص ۵۹-۶۰.
۲. سپهر، ع، بهنیافر، ا، محمدیان، ع.ع، عبداللهی، ا، ۱۳۹۲: تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکتور، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۳۶-۱۹.
۳. شیرانی، ک، عرب عامری، ع.ر، (۱۳۹۴): پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک مطالعه موردی: دز علیا، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۷۲، صص ۳۳۴-۳۲۱.
۴. عرب عامری، ع.ر، کلورازان، ع، کرمی، ج، علیمرادی، م، شیرانی، ک، (۱۳۹۳): استفاده از شبکه عصبی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه ماربر، نشریه پژوهشی تحلیلی زمین پویا، شماره ۲، صص ۱۱۲-۱۲۸.
۵. عرب عامری، ع.ر، حلبیان، ا.ح، (۱۳۹۴): پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری دو متغیره وزنی AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه زرنند)، جغرافیای طبیعی، شماره ۲۸، صص ۸۶-۶۵.
۶. عرب عامری، ع.ر، شیرانی، ک، (۱۳۹۵): اولویت‌بندی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن با استفاده از تئوری احتمالاتی دمپسترشفر (مطالعه موردی: حوضه ونک، استان اصفهان)، مهندسی و مدیریت آبخیز، سال هشتم، شماره ۱، صص ۱۰۶-۹۳.
7. Akgu'n A., Kincal, C. and Pradhan, B. (2011): Application of Remote Sensing Data and GIS For Landslide Risk Assessment as an Environmental Threat to Izmir City (West Turkey). Environ Monit Assess. Doi: 10.1007/s10661-011-2352-8.
8. Alexakis, D.D., Agapiou, A., Tzouvaras, M., Themistocleous, K., Neocleous, K., Michaelides, S., Hadjimitsis, D.G., (2013): Integrated Use of GIS and Remote Sensing for Monitoring Landslides in Transportation Pavements: The Case Study of Pathos area in Cyprus. Nat. Hazards 72 (1), 119-141.

9. Bednarik, M., Magulova, B., Matys, M. and Marschalko, M. (2010): Landslide Susceptibility Assessment of The Kralovany–Liptovsky Mikulas Railway Case Study. *Phys Chem Earth Parts A/B/C* 35(3–5):162–171.
10. Binaghi, E., L. Luzi, P. Madella, F. Pergalani and A. Rampini. (1998): Slope Instability Zonation: a Comparison Between Certainty Factor and Fuzzy Dempster. *Shafer Approaches. Natural Hazards*, 17: 77-97.
11. Burrough, P.A. and Mc. Denel, R. (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. 2nd ed. Oxford University Press, London, 193p.
12. Concha-Dimas, A., M. Campos-Vargas and, C. Lopez-Miguel. (2007): Comparing Heuristic and Bivariate GIS-Based Methods for Refining Landslide Susceptibility Maps in Northern Mexico City. *Environmental & Engineering Geoscience*, 13: 277- 287.
13. 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, *Geomorphology*, 82: 250-271.
14. Chang, K.T. and S.H. Chiang. (2007): Modeling Typhoon and Earthquake Induced Landslide in a Mountainous Watershed using Logistic Regression. *Geomorphology*, 89: 335-347.
15. Chen, X.L., Liu, C.G., Yu, L., Lin, C.X., (2014): Critical Acceleration As A Criterion in Seismic Landslide Susceptibility Assessment. *Geomorphology* 217, 15–22.
16. Choi, J., Oh, H.J., Lee, H.J., Lee, C. and Lee, S. (2012): Combining Landslide Susceptibility Maps Obtained From Frequency Ratio, Logistic Regression, and Artificial Neural Network Models Using ASTER Images and GIS. *Eng Geol* 124:12–23
17. Dai, F.C. and C.F. Lee. (2002): Landslide Characteristics and Slope Instability Modeling Using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*. 31:181-216.
18. Dahal, R.K., S.H. Hasegawa, A. Nonoura, M. Yamanka, S. Dhakal and, P. Paudyal, (2008): Predictive Modeling of Rainfall- Induced Landslide Hazard in The Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights of Evidence. *Geomorphology* 102, 496- 510.
19. Devkota, K C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., Dhital, M. R. and Althuwaynee, O.F. (2012): 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*, doi: 10.1007/s11069-012-0347-6.
20. Gee, M.D. (1992): Classification of Landslides Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability, Bell, Davi, H(Ed), *Proceedings 6th International Symposium on Landslide*, 56-48.
21. Gee, M.D. (1991): Classification of Landslide Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability, *Landslides*, Bell (ed.), 1991 Balkema, Rotterdam: 947- 952.
22. Girma, F., Raghuvanshi, T.K., Ayenew, T., Hailemariam, T., (2015): Landslide Hazard Zonation in Ada Berga District, Central Ethiopia – a GIS Based Statistical Approach. *J. Geomatics* 90, 25–38 (i).
23. Gorsveski, P.V., Gessler, P.E., Boll, J., Elliot, W.E. and Foltz, R.B. (2006): Spatially and Temporally Distributed Modeling of Landslide Susceptibility, *Geomorphology*, 80: 178–198.
24. Guzzetti, F., M. Cardinali, P. Reichenbach and A. Carrara. (2000): Comparing Landslide Map: A Case Study in The Upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*, 25: PP. 247-263.
25. Hamza, T., Raghuvanshi, T.K. GIS Based Landslide Hazard Evaluation and Zonation – A Case From Jeldu District, Central Ethiopia. *Journal of King Saud University – Science* (2016): <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.002>.
26. Hansen, A. (1984): *Engineering Geomorphology: The Application of an Evolutionary Model of Hong Kong*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51: 39–50.

27. Hong, H., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S. (2016): Landslide Susceptibility Assessment in Lianhua County (China): A Comparison Between a Random Forest Data Mining Technique and Bivariate and Multivariate Statistical Models, *Geomorphology* 259 (2016) 105–118.
28. Ilinca, V. and Gheuca, I. (2011): The red lake landslide (Uciga :UMountain, Romania). *Carpathian Jour. Earth Environ. Sci.*,v, 6(1); 263-272.
29. Jade, S. and S. Sarkar. (1993): Statistical Models For Slope Instability Classifications *Engineering, Geology*, 36: PP. 91-98.
30. Lee, S. and B. Pradhan. (2007): Landslide Hazard Mapping at Selangor Malaysia Using Frequency Ratio and Logistic Regression Models. *Landslide*, 4: 33-41.
31. Lee, S.A. (2004): Verification of Spatial Logistic Regression for Landslide Susceptibility Analysis: A Case Study of Korea. *Geomorphology*, 44: 15-18.
32. Lee, S. and M. Kyungduck. (2001): Statistical Analysis of Landslide Susceptibility at Yonging, Korea. *Enviromented Geology*. 40: 1095–1113.
33. Lepore, C., Kamal, S.A., Shanahan, P. and Bras, R.L. (2011): Rainfall-induced landslide Susceptibility Zonation of Puerto Rico. *Environmental Earth Sciences*. Doi: 10.1007/s12665-011-0976-1.
34. Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M. A., (2014): Application of GIS Based Data Driven Evidential Belief Function Model To Predict Groundwater Potential Zonation. *J. Hydrol.* 513, 283–300.
35. Oh, H.J. and Lee, S. (2010): Cross-validation of Logistic Regression Model for Landslide Susceptibility Mapping At Geneon Areas, Korea. *Disaster Advances*, 3: 44–55.
36. Oh, H.J., and Lee, S. (2011a): Landslide Susceptibility Mapping on Panaon Island, Philippines Using a Geographic Information System. *Environmental Earth Sciences* 62: 935–951.
37. Oh, H.J. and Lee, S., (2011b): Cross-Application Used to Validate Landslide Susceptibility Maps Using a Probabilistic Model From Korea. *Environmental Earth Sciences*, 64: 395–409.
38. Peng, L., Niu, R., Huang, B., Wu, X., Zhao, Y., Ye, R., (2014): Landslide Susceptibility Mapping Based on Rough Set Theory and Support Vector Machines: a Case of The Three Gorges Area, China. *Geomorphology* 204, 287–301.
39. Pourghasemi, H.R., Kerle, N., (2016): Random Forest-Evidential Belief Function Based Landslide Susceptibility Assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environ. Earth Sci.* 75, 185.
40. Pradhan, B. and Youssef, A.M. (2010): Manifestation of Remote Sensing Data and GIS on Landslide Hazard Analysis Using Spatial-Based Statistical Models. *Arab J Geosci* 3(3):319–326.
41. Pradhan, B., Abokharima, M.H., Jebur, M.N., Tehrany, M.S., (2014): Land Subsidence Susceptibility Mapping at Kinta Valley (Malaysia) Using The Evidential Belief Function Modelin GIS. *Nat. Hazards* 1-24.
42. Regmi, N. R., Giardino, J. R. and Vitek, J. D. (2010): Modeling Susceptibility To Landslides Using The Weight of Evidence Approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115:172-187.
43. Regmi, A.D., Devkota, K.C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Kumamoto, T., Akgun, A. (2014): Application of Frequency Ratio, Statistical Index, and Weights-of-Evidence Models and Their Comparison in Landslide Susceptibility Mapping in Central Nepal Himalaya, *Arab J Geosci*, 7:725–742
44. Suh, J., Choi, Y., Roh, T.D., Lee, H.J. and Park, H.D. (2011): National-Scale Assessment of Landslide Susceptibility to Rank the Vulnerability to Failure of Rock-Cut Slopes Along Expressways in Korea. *Environmental Earth Sciences*, 63: 619–632.
45. Van Westen, C.J., N. Rengers and R. Soeters. (2003): Use of Geomorpha-Logical Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 30: 399- 419.

46. Yesilnacar, E. and Topal, T. (2005): Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in a Medium Scale Study, Hendek Region (Turkey). *Engg. Geol.*, 79: 251-261.
47. Yilmaz, I. (2010): Comparison of Landslide Susceptibility Mapping Methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional Probability, Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and Support vector machine. *Environmental Earth Sciences* 61: 821–836.
48. Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., El-Haddad, B.A., Dhahry, B.K., (2015a): Landslide Susceptibility Mapping Using Different Probabilistic and Bivariate Statistical Models and Comparison of Their Performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Bull. Eng. Geol. Environ.* <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-015-0734-9>.
49. Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z., Al-Katheeri, M. M., (2015b): Landslide Susceptibility Mapping Using Random Forest, Boosted Regression Tree, Classification and Regression Tree, and General Linear Models and Comparison of Their Performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Regio, Saudi Arabia. *Landslides*. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1>.
50. Youssef, A.M., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Abdullahi, A., (2015c): Landslide susceptibility assessment at Wadi Jawrah Basin, Jizan region, Saudi Arabia Using Two Bivariate Models in GIS. *Geosci. J.* 19 (3), 449–469.
51. Yu, X., Wang, Y., Niu, R. and Hu, Y. (2016): A Combination of Geographically Weighted Regression, Particle Swarm Optimization and Support Vector Machine for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study at Wanzhou in the Three Gorges Area, China, *Int J Environ Res Public Health*, 13 (5), doi: [10.3390/ijerph13050487](https://doi.org/10.3390/ijerph13050487).
52. Zhu, A., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y., Zhu, T., (2014): An Expert Knowledge-Based Approach To Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Fuzzy Logic. *Geomorphology* 214, 128–138.