

ارزیابی کارایی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه آبریز اهرچای

فریبا کرمی^۱ - استاد ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مریم بیاتی خطیبی - استاد ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

منصور خیری زاده - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

ابوالفضل مختاری اصل - کارشناس اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۷

چکیده

برای کاهش خطرات احتمالی و مدیریت اراضی، ترسیم نقشه حساسیت زمین‌لغزش، در مناطق مستعد ضروری است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه آبریز اهرچای در شمال غرب ایران، است. رخداد زمین‌لغزش به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل و مخاطرات محیطی این حوضه به شمار می‌آید. در ابتدا زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث مربوط به تابستان ۱۳۹۶ شناسایی شدند و پس از بازدیدهای میدانی متعدد برای شناسایی و مطابقت با واقعیت، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها ترسیم گردید. در حدود ۲۰۰ مورد زمین‌لغزش در حوضه آبریز اهرچای شناسایی شد. ۷۰ درصد از زمین‌لغزش‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد از آنها برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از ۱۴ معیار مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، شامل ارتفاع، جهت و زاویه شیب، تحدب دامنه، طول دامنه (LS)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، عمق دره (VD)، لیتولوژی، فاصله از گسل، کاربری اراضی، شاخص NDVI، فاصله از آبراهه، توان رودخانه (SPI) و بارش استفاده شد. در نهایت نقشه حساسیت زمین‌لغزش در ۵ کلاس بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم تهیه گردید. برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم از منحنی (ROC) و سطح زیرمنحنی (AUC) استفاده شد. نتایج ارزیابی ۴ تابع از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نشان داد که تابع پایه شعاعی (RBF) با سطح زیرمنحنی $AUC = 0.988$ و $AUC = 0.958$ به ترتیب برای داده‌های

آموزشی و صحت‌سنجی، در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی بهترین عملکرد را دارد. همچنین به دلیل قدرت تشخیص بالای آزمون، منحنی ROC بالای قطر مربع قرار می‌گیرد و بنابراین به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی نیز نشان داد که ۶۱/۲۶ درصد از اراضی منطقه که عمدتاً در غرب و بالادست حوضه و بخش‌های جنوبی آن واقع شده‌اند در کلاس با حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار گرفتند.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تابع پایه شعاعی (RBF)، حوضه آبریز اهرچای.

۱- مقدمه

زمین‌لغزش‌ها به عنوان بلایای ژئوفیزیکی و هیدرولوژیکی تعریف می‌شوند و اغلب حوادثی به صورت حرکات غیر منتظره و غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند. این حوادث از شایع‌ترین مخاطرات طبیعی با پیامدهای مهم بر زندگی انسان هستند و دارای عواقب اجتماعی - اقتصادی غیر قابل تخمین می‌باشند (Tsangaratos and Benardos, 2014). علیرغم تمامی پیشرفت‌ها در زمینه علوم و تکنولوژی، این حوادث در سرتاسر دنیا تلفات انسانی، اقتصادی و محیطی زیادی به دنبال دارند، به طوری که در بین بزرگ‌ترین بلایای طبیعی، هفتمین رتبه را از نظر تلفات جانی دارد و حدود ۱۷ درصد از مرگ و میرهای ناشی از بلایای طبیعی را در برمی‌گیرد (Alimohammadlou et al, 2013). همچنین سالانه حدود ۱۲۰۰ مرگ و میر و خسارات ۳/۵ میلیارد دلاری را در جهان موجب می‌شوند (Zhang, 2019). زمین‌لغزش‌ها در مورفولوژی چشم‌اندازها هم تغییرات شدیدی به وجود می‌آورند و حاصلخیزی زمین را تقلیل می‌دهند (Gomez and Kavzoglu, 2005). در واقع، حرکت حجم زیادی از خاک یا سنگ از ارتفاع بالا به پایین در امتداد دامنه، علت دائمی تغییرات توپوگرافیکی زمین و تغییر شکل فعلی آنها است (Alimohammadlou et al, 2013). این رویداد در مناطق آسیب‌پذیر و مراکز انسانی، زیان‌های جدی در جنبه‌های مختلف زندگی انسان وارد می‌سازد.

ایران با داشتن مناطق کوهستانی وسیع که بیش از نیمی از وسعت کشور را تشکیل می‌دهد و با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی، بارندگی و شرایط آب و هوایی و توپوگرافی متنوع از جمله کشورهای است که وقوع زمین‌لغزش‌های متعددی را تجربه کرده است. از طرفی دیگر، رشد روزافزون جمعیت کشور، افزایش فعالیت‌های عمرانی، صنعتی و کشاورزی را در مناطق پرشیب در پی داشته است. تعرض انسان‌ها در محیط‌زیست طبیعی، تغییر کاربری اراضی دامنه‌ای و توسعه مناطق مسکونی و فعالیت‌های مشابه در دامنه‌های پرشیب بر میزان خسارات ناشی از این پدیده افزوده است (اجل‌لوئیان و همکاران، ۱۳۹۲). در این میان، حوضه آبریز اهرچای که در شمال غرب کشور ایران واقع شده است، به دلیل شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی، سازندهای سست و سایر عوامل مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. بررسی‌های اولیه این پژوهش نشان داد در حدود ۲۰۰ زمین‌لغزش بزرگ و کوچک

در سطح حوضه وجود دارد که اغلب آنها در جنوب حوضه متمرکز شده‌اند. چنین وضعیتی لزوم پهنه‌بندی حساسیت و ارزیابی پتانسیل منطقه به وقوع زمین‌لغزش را در راستای برنامه‌ریزی و اجرای برنامه‌های عمرانی آشکار می‌سازد. در ادبیات مربوط به ارزیابی پایداری زمین، اغلب می‌گویند گذشته و حال کلیدی برای آینده است؛ یعنی آینده را می‌توان براساس گذشته و حال پیش‌بینی کرد (Pavel et al, 2011). حساسیت زمین‌لغزش تمایل خاک یا سنگ به تولید انواع متعدد زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. یک نقشه حساسیت زمین‌لغزش (LSM)^۱، با ترکیب برخی از عوامل مهمی که در وقوع زمین‌لغزش‌های گذشته مشارکت داشته‌اند، مناطق با پتانسیل وقوع را در آینده نشان می‌دهد (Chalkias et al, 2014). چنین نقشه‌هایی ابزار مفید و مطمئنی برای ارزیابی پتانسیل خطر زمین‌لغزش محسوب می‌شوند و یک منطقه را با توجه به پتانسیل پایداری و ناپایداری‌شان و بر اساس تعداد عوامل اولیه (مقدماتی) مانند لیتولوژی، ژئومورفولوژی و عوامل تحریک کننده مانند لرزه‌خیزی و بارندگی و غیره طبقه‌بندی می‌کنند (Zhang, 2019; Chauhan et al, 2010). با توجه به اینکه در جهان حدود ۶۶ میلیون نفر در مناطقی با خطر زیاد زمین‌لغزش زندگی می‌کنند (Chen et al, 2018)، نیاز به ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش افزایش یافته است. از آغاز دهه ۱۹۷۰ توجه دانشمندان علوم زمین و مهندسان به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و افزایش استفاده از تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، روش‌های کمی زیادی را در این زمینه توسعه داده است. برای مثال مدل شاهد وزنی (کریمی، ۱۳۹۰؛ Wang et al, 2019)، شبکه عصبی (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Chauhan et al, 2010؛ Pham et al, 2016؛ Tsangaratos and Benardos, 2014)، رگرسیون لجستیک (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Raja et al, 2017)، فازی عصبی (Lee et al, 2017؛ Chen et al, 2019؛ Aghdam et al, 2016) و غیره مورد مطالعه قرار دادند. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۲ یکی از جدیدترین این روش‌ها است، که برپایه تئوری یادگیری آماری بنا نهاده شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). الگوریتم‌های SVM برای ارزیابی و آزمون مجموعه‌ای از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yao et al, 2008). این مدل در سال‌های اخیر به دلیل عملکرد خوب طبقه‌بندی و قابلیت تحمل خطا و تعمیم مناسب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴). برای مثال، یمانی و همکاران (۱۳۹۱) خطر وقوع زمین‌لغزش را در حوضه درکه تهران با استفاده از الگوریتم‌های مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) پهنه‌بندی کردند. نتیجه مطالعه نشان داد بین توابع اجرا شده، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین عملکرد را دارد. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل SVM پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش را در آزاد راه خرم‌آباد- پل زال شناسایی کردند. نتیجه نشان داد تابع چند جمله‌ای در شناسایی سطوح مستعد دقت بیشتری داشته است. قاسمیان و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تابع (RBF) ماشین بردار پشتیبان در شهرستان کامیاران پرداختند. نتایج نشان داد که سطح زیر منحنی (AUC) با استفاده از مجموعه

1 Landslide Susceptibility Map (LSM)

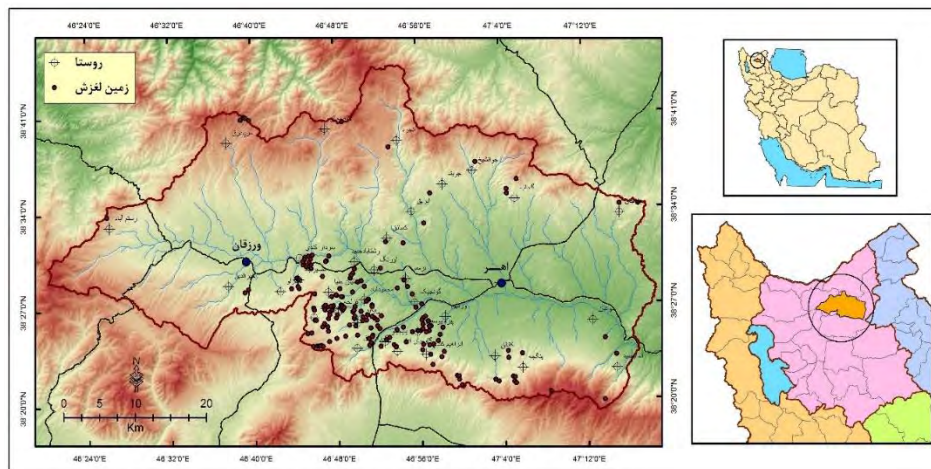
2 Support Vector Machine(SVM)

داده‌های آموزشی (۰/۹۷) و با استفاده از داده‌های صحت‌سنجی (۰/۸۸۲) می‌باشد. لذا تجزیه و تحلیل نتایج نشان دهنده آن بود که تابع مدل، عملکرد خوبی جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه دارد. در بخشی از منطقه مورد مطالعه، عابدینی و همکاران (۱۳۹۷) به شناسایی و طبقه‌بندی انواع مختلف زمین‌لغزش‌ها با رویکرد روش شی‌گرا در حدفاصل بین روستای نصیرآباد و سدستارخان اهر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۳۴/۰۲ درصد منطقه دارای پتانسیل خیلی زیاد و زیاد برای وقوع زمین‌لغزش می‌باشند. در بین محققان خارجی، Bui (2012) در استان Hoa Binh ویتنام با مقایسه چهار مدل رگرسیون لجستیک، ماشین پشتیبان بردار با دو تابع پایه شعاعی و چندجمله‌ای، درخت تصمیم و تئوری بیزین، حساسیت زمین‌لغزش را پهنه‌بندی کردند. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مدل (SVM) با تابع شعاعی $AUC = 0.96$ و تابع چند جمله‌ای $AUC = 0.956$ بیش‌ترین قدرت پیش‌بینی مناطق لغزشی را دارند. Pham et al (2016) در Uttarakhand هند با استفاده از ۵ روش یادگیری ماشین به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش پرداختند. نتیجه تحلیل و مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل (SVM) با $AUC = 0.95$ دارای بهترین عملکرد در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. Lee et al (2017) در پژوهشی به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از تابع پایه شعاعی مدل SVM در دو منطقه Pyeongchang and Inje ایالت Gangwon کره اقدام کردند. نتیجه مطالعه دقت اجرای مدل را به ترتیب ۸۱/۳۶ درصد و ۷۷/۴۹ درصد نشان داد. در راستای این مطالعات، هدف پژوهش حاضر ارزیابی کارایی توابع الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه اهرچای می‌باشد.

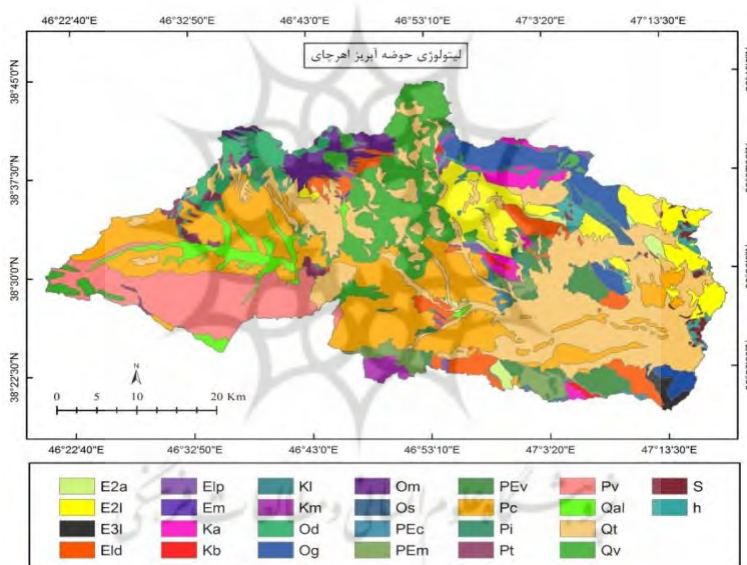
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز اهرچای در شمال استان آذربایجان شرقی و محدوده سیاسی-اداری شهرستان‌های اهر و ورزقان واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه مورد مطالعه در حدود ۲۱۹۵ کیلومتر مربع می‌باشد که در مختصات جغرافیایی $46^{\circ} 20' 02''$ تا $47^{\circ} 18' 40''$ طول شرقی و $38^{\circ} 20' 40''$ تا $38^{\circ} 44' 40''$ عرض شمالی قرار گرفته است. اهرچای با روند عمومی غربی-شرقی از بخش‌های زیادی از محدوده شهرستان‌های اهر و ورزقان عبور می‌کند و به عنوان یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز ارس محسوب می‌شود. متوسط ارتفاع حوضه اهرچای ۱۸۱۶ متر از سطح آزاد دریاها و میانگین شیب آن ۱۶ درصد می‌باشد. حدود ۶۲ درصد سازندهای سطح حوضه آبریز اهرچای مربوط به دوره پلیو-کواترنری می‌باشند که عمدتاً شامل سیلت و کنگلومرا (Qt)، کنگلومرا و سیلتستون (Pc)، آندزیت و بازالت (Qv) و کنگلومرا و ولکانوسدیمانتر (Pv) می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه آبریز اهرچای و پراکنش زمین لغزش‌ها در سطح حوضه

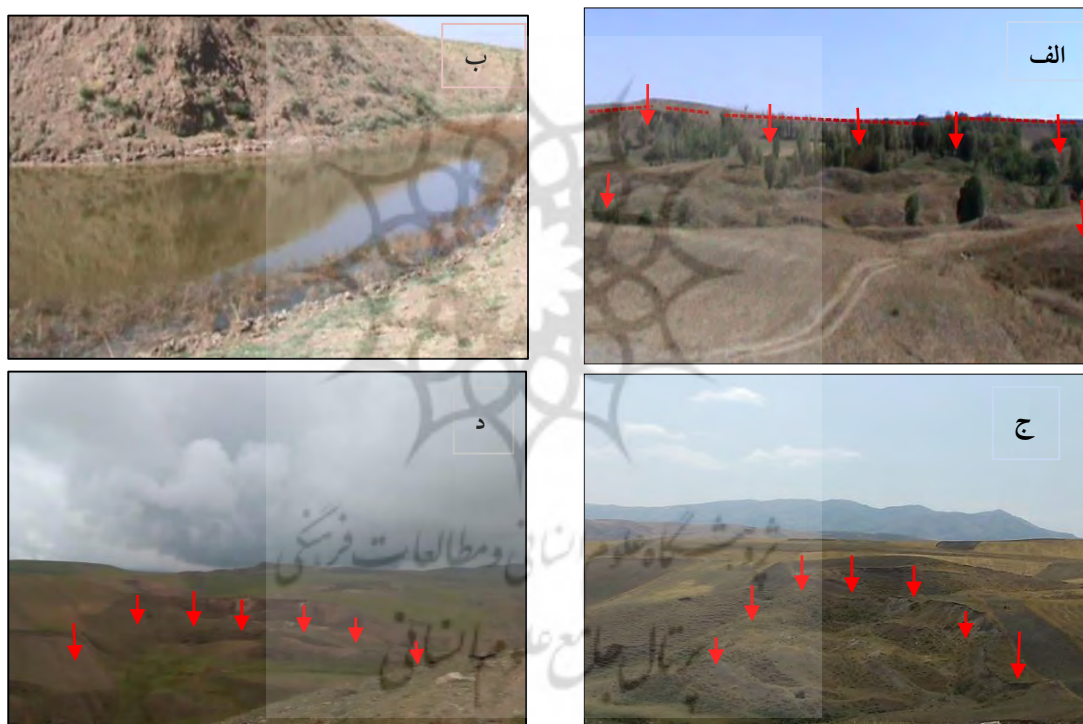


شکل ۲- نقشه واحدهای لیتولوژی حوضه اهرچای

۲-۲- تهیه نقشه توزیع مکانی زمین لغزش‌های حوضه اهرچای

برای ترسیم این نقشه؛ از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث (با قدرت تفکیک ۰/۵ متر) و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel مربوط به تابستان ۱۳۹۶ استفاده شد. برای شناسایی زمین لغزش‌ها و مطابقت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت با واقعیت بازدیدهای میدانی متعدد انجام شد. در حوضه آبریز اهرچای در حدود ۲۰۰ توده لغزشی شناسایی شد که مجموع مساحت این توده‌های لغزشی در حدود ۱۴۶۲ هکتار می‌باشد. اکثر زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی در جنوب حوضه اهرچای رخ داده‌اند و اغلب از نوع انتقالی، چرخشی و زمین لغزش‌های کم عمق هستند.

زمین لغزش‌های بزرگ منطقه مورد مطالعه عمدتاً با روند شمال غرب- جنوب شرق از شرق شهر ورزقان (از مجاورت روستاهای سردارکندی و نصیرآباد) تا روستاهای انداب و بهل رخ داده‌اند (شکل ۱). در سایر قسمت‌های حوضه مطالعاتی زمین لغزش‌ها هم از نظر تعداد و هم از نظر بزرگی بسیار محدود می‌باشند. از زمین لغزش‌های بزرگ می‌توان به زمین لغزش‌های نصیرآباد (در حدود ۱۰۵ هکتار)، شمال شرق و شمال غرب روستای ملالار (۵۶ و ۱۱۵ هکتار)، شمال غرب روستای قزلجه (۳۶ و ۲۰ هکتار) و زمین لغزش‌های زنجیربلاغ و پیره یوسفیان (در حدود ۱۴۵ هکتار) اشاره کرد. بر روی این توده‌های لغزشی بزرگ چندین چشمه فعال و نیز آثاری از چشمه‌های خشک شده وجود دارد که در برخی موارد به علت بافت درهم توده لغزشی باعث شکل‌گیری برکه‌های کوچک بر سطح توده‌های لغزشی شده است (شکل ۳).

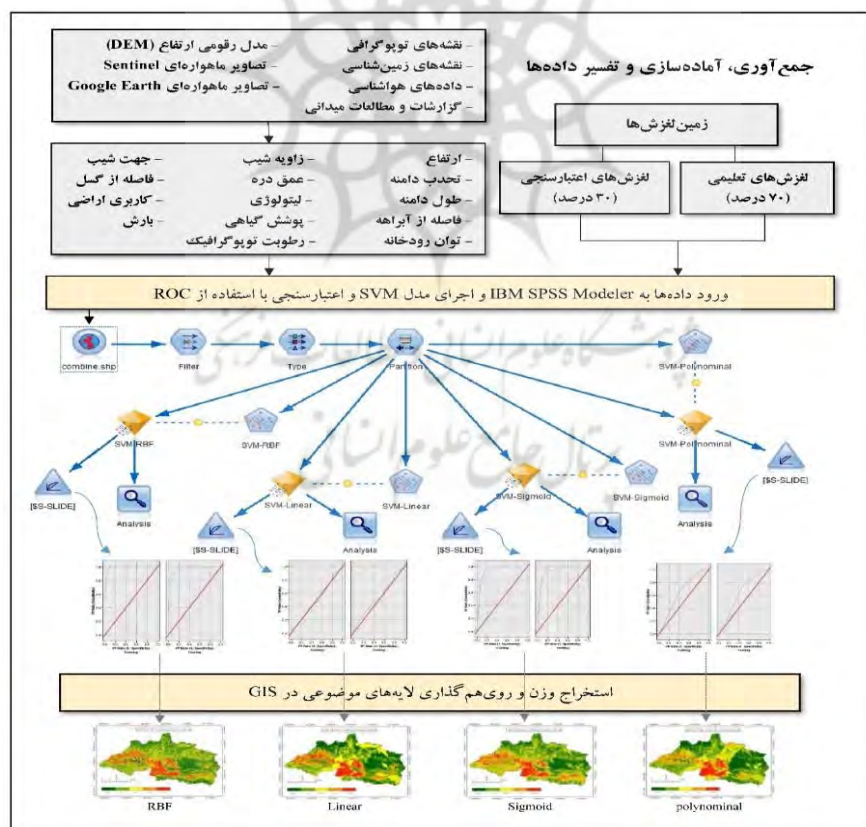


شکل ۳- نمونه‌ای از زمین لغزش‌های منطقه: الف) روستای پیریوسفیان ب) تشکیل برکه کوچک در نتیجه تراوش چشمه بر روی توده لغزشی ج و د) نمونه‌هایی از زمین لغزش‌های منطقه

۲-۳- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، معیارهای ارتفاع، جهت و زاویه شیب، لیتولوژی، تحدب دامنه، طول دامنه (LS)، عمق دره (VD)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، شاخص NDVI، توان

رودخانه (SPI) و بارش جهت بررسی مناطق حساس به زمین لغزش انتخاب شدند. بدین منظور لایه‌های مکانی معیارهای مذکور به پایگاه داده مکانی وارد و پس از استانداردسازی، توابع ماشین بردار پشتیبان (حلقوی، چندجمله‌ای، پایه شعاعی و خطی) اجرا شد تا پهنه‌های حساس به زمین لغزش در حوضه اهرچای مشخص شوند. مراحل انجام مدل SVM در پژوهش حاضر در شکل (۴) ترسیم شده است. لایه‌های توزیع فضایی ارتفاع، شیب، جهت شیب، تحدب دامنه، توان رودخانه، رطوبت توپوگرافیک، عمق دره و طول دامنه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۲۷ متر در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS و SAGA تهیه شدند. آبراهه‌های منطقه مطالعاتی از روی تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) با استفاده از الحاقی ArcHydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. لایه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از روی تصویر ماهواره‌ای Google Earth با قدرت تفکیک بالا و تصویر ماهواره‌ای Sentinel مربوط به تابستان ۱۳۹۶ و به روش طبقه‌بندی نظارت شده در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد. همچنین، شاخص NDVI به عنوان معرف تراکم پوشش گیاهی منطقه از روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel استخراج شد. برای تهیه لایه لیتولوژی و گسل‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور) استفاده شد.



شکل ۴- فلوجارت انجام تحقیق

۲-۴- اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) بر پایه تئوری یادگیری آماری بنا نهاده شده است. بر اساس این تئوری می توان کران نرخ خطای ماشین یادگیری را برای داده های طبقه بندی نشده، به عنوان نرخ خطای تعمیم یافته، در نظر گرفت. این کران ها به عنوان تابعی از مجموع نرخ خطاهای آموزشی هستند که میزان پیچیدگی طبقه بندی کننده را نشان می دهند. به منظور کمینه کردن نرخ خطاهای تعمیم یافته، باید نرخ خطای آموزشی و پیچیدگی های طبقه بندی کاهش یابد. این کار را می توان با بیشینه کردن حاشیه جداسازی انجام داد؛ بنابراین، از آنجایی که حاشیه جداسازی به بعد داده های ورودی بستگی ندارند، این طبقه بندی کننده، کارایی مناسبی دارد. اگر X_i مجموعه ای از سلول های آموزشی به صورت رابطه (۱) باشد:

$$X_i = (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{رابطه (۱)}$$

سلول های آموزشی شامل دو کلاس (وقوع زمین لغزش و عدم وقوع آن) می باشد که به صورت $y_i = \pm 1$ مشخص می شوند. هدف مدل SVM جستجوی یک فراطرح افتراق N -ابعادی در دو کلاس بوده که به وسیله شکاف حداکثری آن ها مشخص می شود. از نظر ریاضی این می تواند به صورت رابطه (۲) بیان شود:

$$\frac{1}{2} \|W\|^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که منوط به محدوده کردن رابطه (۳) است:

$$Y_i((W \cdot X_i) + b) \geq 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که $\|W\|$ قاعده ای از فراطرح نرمال یک پایه عددی بوده و (۰) مشخص کننده عمل تولید عددی است ارزش آن با استفاده از چند ضریبی لاگرانژیان^۱ محاسبه می شود که عملکرد آن بصورت رابطه (۴) تعریف می شود:

$$L = \frac{1}{2} \|W\|^2 - \sum_i \lambda_i (Y_i((W \cdot X_i) + b) - 1) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که λ_i چند ضریبی لاگرانژیان است و می تواند صفر یا غیر صفر باشد و فقط مجموعه داده هایی که ضرایب آنها غیر صفر است در معادله نهایی وارد می شوند و این مجموعه داده ها به عنوان بردار پشتیبان شناخته می شوند (قاسمیان

1 L:agrangian

و همکاران، ۱۳۹۶). انتخاب توابع مختلف کرنل در مدل SVM از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر چه توابع هسته‌ای $K(X_i, X_j)$ زیادی قبلاً پیشنهاد و استفاده شده‌اند. تنها بعضی از آن‌ها برای کار در طیف گسترده‌ای از کاربردها مفید شناخته می‌شوند. آن‌هایی که این مهارت‌ها را نشان می‌دهند عبارتند از:

$K(X_i, X_j) = X_i^T \cdot X_j$	تابع خطی
$K(X_i, X_j) = y \cdot X_i^T \cdot X_j + r, y > 0$	تابع چندجمله‌ای
$K(X_i, X_j) = e^{-\gamma(X_i \cdot X_j)^2}, \gamma > 0$	تابع پایه شعاعی
$\tanh(\gamma \cdot X_i^T \cdot X_j + r)$	تابع حلقوی

که γ و d پارامترهای توابع هسته‌ای هستند و به صورت دستی وارد می‌شوند (قاسمیان، ۱۳۹۶).

ارزیابی عملکرد مدل و اعتبار سنجی آن بر اساس داده‌های آموزشی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه از معیار آماری درصد مساحت زیر منحنی ROC^۱ استفاده شد. بر این اساس، در مدلی که مقادیر معیارهای اشاره شده به سمت یک تمایل داشته باشند، مدل مناسبی شناخته می‌شود (Shirzadi et al, 2017). هر اندازه قدرت تشخیص یک آزمون بیشتر باشد منحنی ROC نیز بالای قطر مربع قرار می‌گیرد و بنابراین به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد بود. از سوی دیگر، چنانچه آزمونی توان تشخیص پایین داشته باشد در این حالت منحنی ROC منطبق بر قطر مربع خواهد بود. بر اساس یک سیستم طبقه‌بندی قراردادی، سطح زیر منحنی را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی و تفسیر نمود: ۰/۹-۱: عالی، ۰/۸-۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط و ۰/۵-۰/۶: ضعیف (Yeslinsar, 2005).

۳- نتایج و بحث

در بررسی عوامل مؤثر مشخص شد، اکثر زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات بین ۱۵۳۴ تا ۲۰۴۴ متری با فراوانی نسبی ۲/۷۱۴ رخ داده‌اند. در حدود ۴۴/۵ درصد زمین‌لغزش‌ها با نسبت فراوانی ۱/۳ در شیب‌های ۲۰-۱۰ درصد دیده می‌شوند. دامنه‌های با جهات شمالی (۳۱/۵۷ درصد)، شمال شرق (۱۷/۵۳ درصد) و شمال غرب (۱۹/۲۸ درصد) از شرایط مساعدتری برای رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه برخوردار می‌باشند. از نظر واحدهای لیتولوژی سازندهای PC (کنگلومرالهای کمتر تحکیم یافته، دارای میان‌لایه‌های مارنی ماسه‌ای و سیلتی پلیوسن) و Qt (سیلت و کنگلومرای کواترنری) از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشند (جدول ۱). همچنین زمین‌لغزش‌ها در دامنه‌های با تقعر کم با

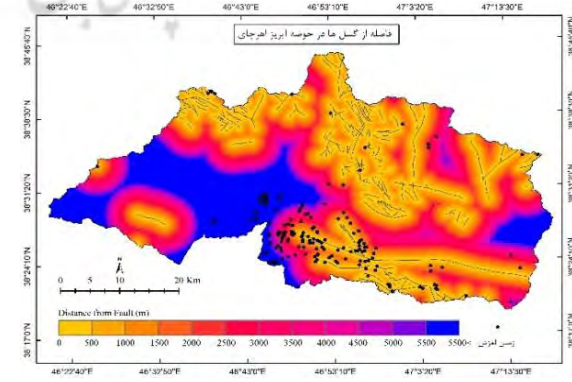
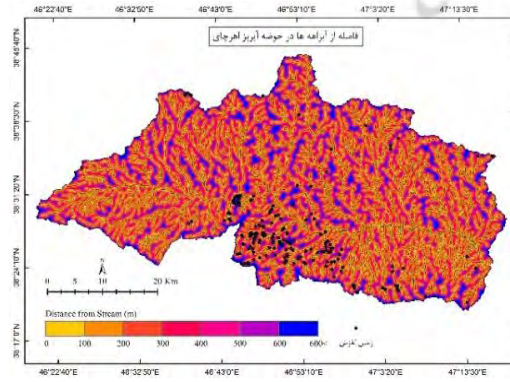
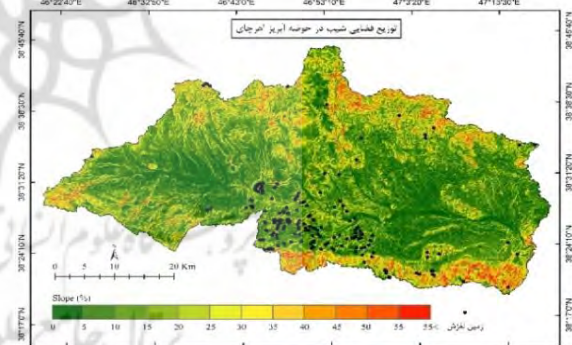
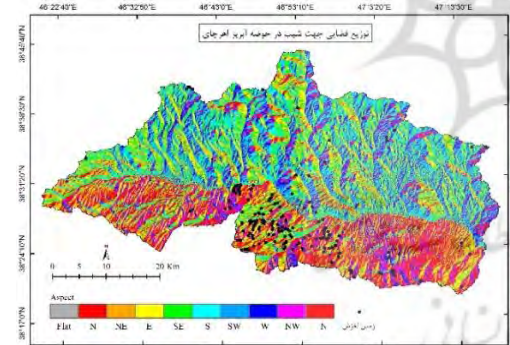
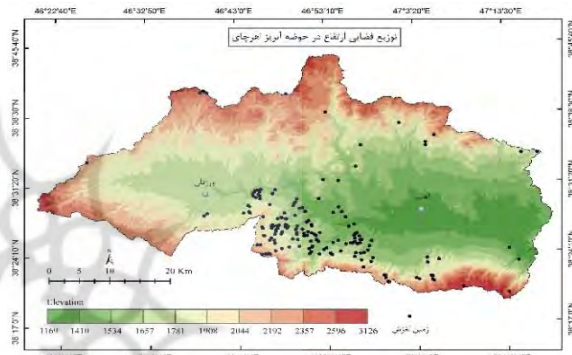
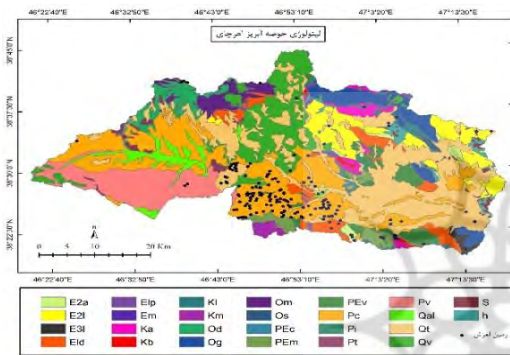
1 Area Under the Curve (ROC)

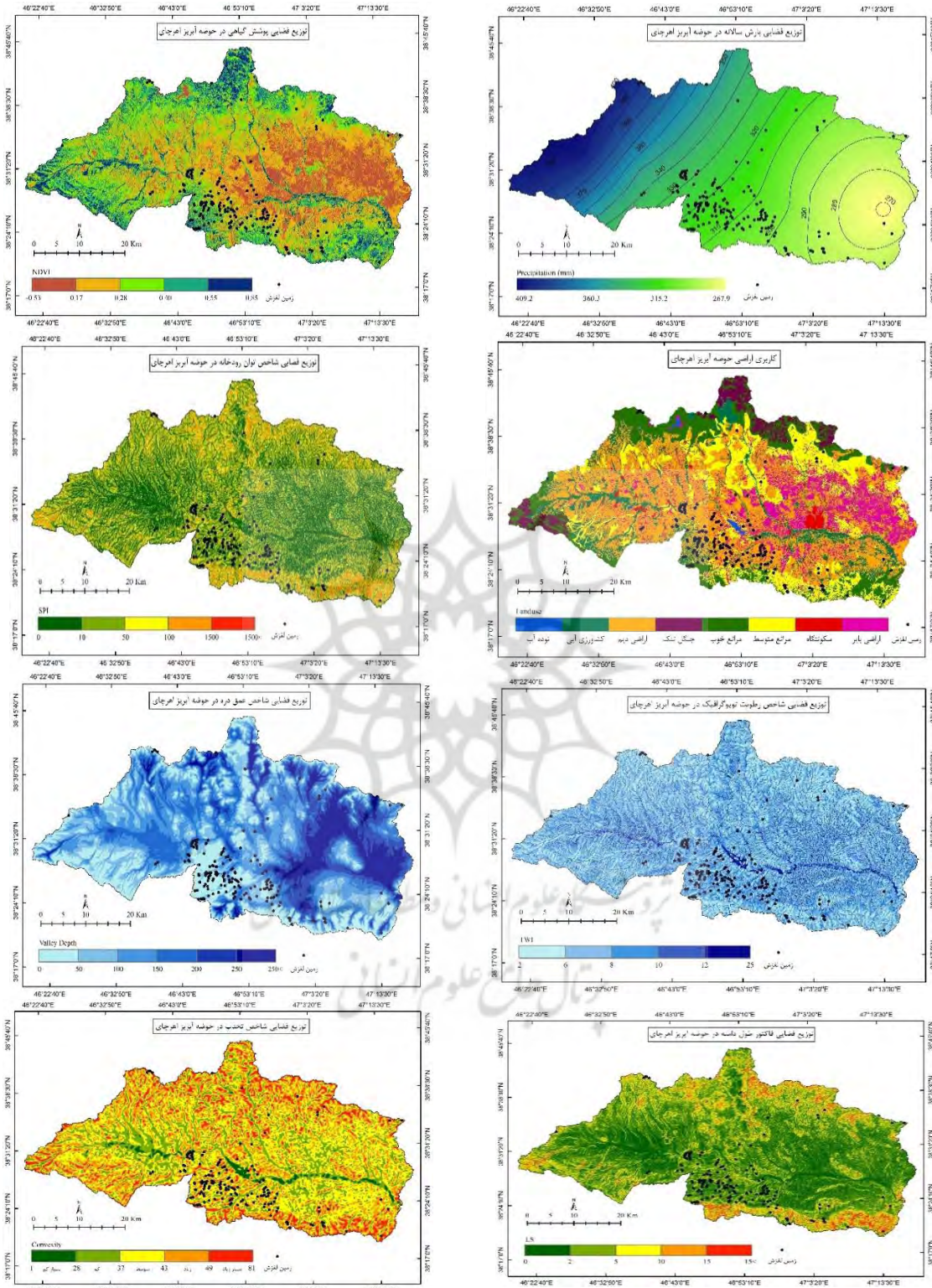
فراوانی نسبی ۱/۲۷۵ و تفرع متوسط با فراوانی نسبی ۱/۲۴۵ دارای احتمال وقوع بالاتری هستند. از نظر عامل فاصله از آبراهه‌ها، در حدود ۵۵ درصد توده‌های لغزشی منطقه در فاصله صفر تا ۲۰۰ متری آبراهه‌ها واقع شده‌اند. همچنین اراضی دیم حوضه اهرچای با ۵۴/۹۷ درصد و زمین‌های زراعی آبی با ۱۷/۶۹ درصد بیشترین مقادیر وقوع زمین‌لغزش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. در فواصل ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متری گسل‌ها نیز در حدود ۲۰/۶۵ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه بوقوع پیوسته‌اند. در حدود ۸۰ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در طبقات ۰ تا ۱۰۰ شاخص عمق دره رخ داده‌اند. از نظر شاخص (TWI) بیش‌ترین درصد وقوع زمین‌لغزش‌ها در مقادیر ۸-۶ شاخص دیده می‌شوند. در شاخص طول دامنه نیز ۵۹ درصد زمین‌لغزش‌ها در طبقات ۱۰-۲ متری اتفاق افتاده‌اند. شکل (۵) توزیع زمین‌لغزش‌های حوضه اهرچای را در روی هر یک از عوامل مورد نظر نشان می‌دهد.

جدول ۱- فراوانی نسبی وقوع زمین لغزش در واحدهای لیتولوژی حوضه آبریز اهرچای

فراوانی نسبی	مساحت زمین لغزش (ha)	مساحت واحدهای لیتولوژی km ²	نوع لیتولوژی	واحدها	فراوانی نسبی	مساحت زمین لغزش (ha)	مساحت واحدهای لیتولوژی km ²	نوع لیتولوژی	واحدها
۰/۱۵۱	۲/۱۶	۲۱/۵۵	لاتیت و آندزیت	E2a	۰/۰۴	۱/۶۲	۶۰/۲۰	آبرفت‌های جدید	Q al
۰/۲۱۲	۱۲/۸۱	۹۰/۷۹	داسیت، تراکی آندزیت و اینگمیریت	Eld	۰/۷۳۱	۲۵۰/۲۶	۵۱۴/۶۳	سیلت، کنگلومرا و تراورتن	Q t
۰	۰	۱/۶۷	مارن و سنگ آهک	Em	۰/۴۱۴	۵۷/۹۷	۲۱۰/۴۷	آندزیت و بازالت	Qv
۰	۰	۸۳۵	لایت میاپورفیریتیک	Elp	۳/۲۹۸	۹۷۸/۷۲	۴۴۵/۸۹	کنگلومرا و سیلتستون	Pc
۰/۲۵	۱۱/۶۶	۷/۱	ولکانیک‌های زیر دریایی، پیروکسن، آندزیت و تراکیت	PEv	۰/۲۴۷	۳۱/۶۵	۱۹۲/۶۹	کنگلومرای ولکانوسدیماتری	Pv
۰	۰	۷/۲۹	کنگلومرا و برش	PEc	۰	۰	۵/۰۲	اینگمیریت	Pi
۰/۲۲۴	۶۳۳	۴۲/۳۶	مارن، سنگ آهک و ماسه سنگ	PEm	۰	۰	۲۱/۱۲	گنبد تراکی آندزیتی	Pt
۰/۰۱۷	۰/۰۸	۶/۹۶	سنگ‌های ولکانیکی زیر دریایی اصلی	Kb	۰/۰۱۱	۰/۳۹	۵۲/۶۶	میکروموزونیت و دایک‌های تراکی آندزیتی	Om
۰	۰	۳۶/۰۶	ولکانیک‌های زیر دریایی از متوسط تا اسیدی	K a	۰/۰۰۶	۰/۲۳	۵۷/۴۳	برش داسیتی	Od
۰/۰۱۱	۰/۱۵	۲۰/۷۲	مارن، سنگ آهک و کنگلومرا	Kl	۰	۰	۵/۱۹	سینیت	O s

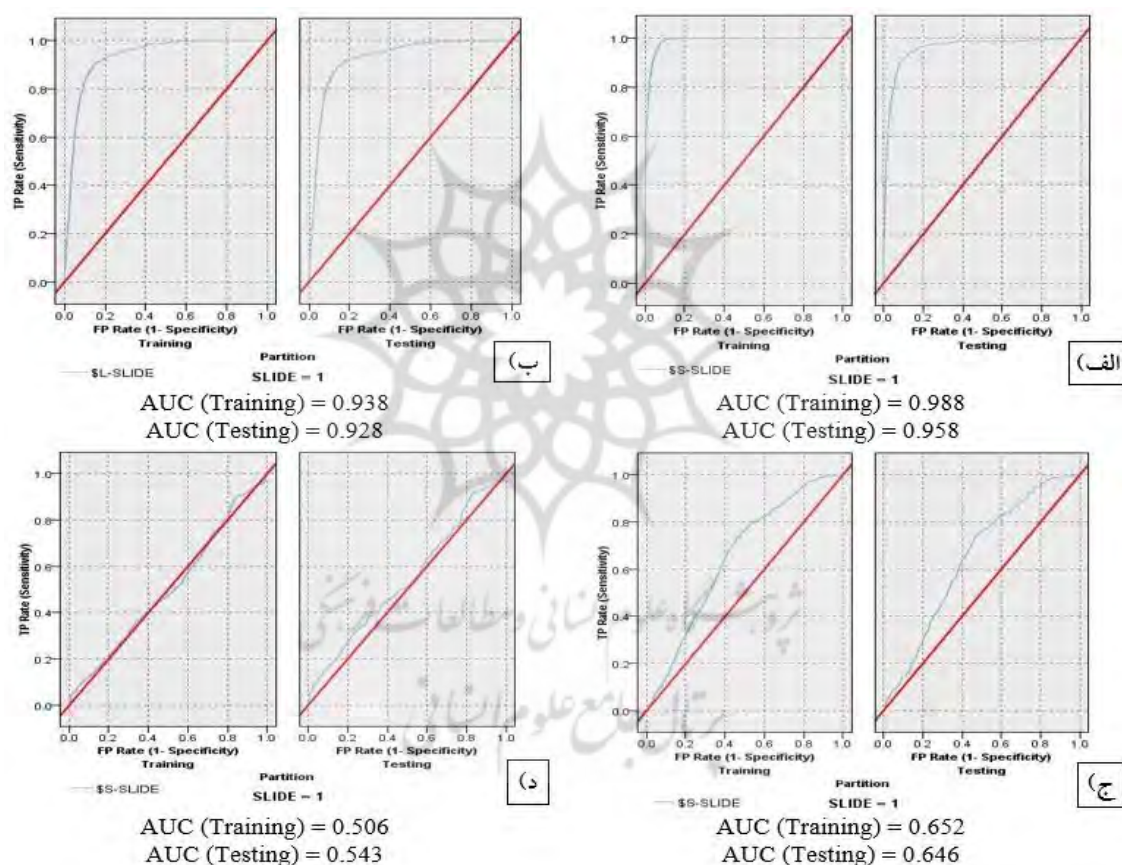
واحد‌ها	نوع لیتولوژی	مساحت واحد‌های لیتولوژی km ²	مساحت زمین لغزش (ha)	فراوانی نسبی	واحد‌ها	نوع لیتولوژی	مساحت واحد‌های لیتولوژی km ²	مساحت زمین لغزش (ha)	فراوانی نسبی
Og	موزونیت، گرانیت و آپلیت	۹۸/۵۳	۱۰۵/۱۴	۱/۶۰۳	Km	مارن، مولاس و ماسه سنگ	۱۹/۳۲	۰	۰
E3l	لاتیت	۱۰/۷۹	۱/۳۱	۰/۱۸۳	h	زون‌های تحول یافته هیدروترمالی	۳۳/۱۹	۰/۰۸	۰/۰۰۳
E2l	لاتیت و ایگنمبریت	۱۵۰/۶۶	۰/۳۱	۰/۰۰۳	S	زون‌های سیلیکاتی	۱۱/۱۸	۰	۰





شکل ۵- نقشه‌های توزیع زمین‌لغزش‌های حوضه آبریز اهرچای در عوامل مورد نظر

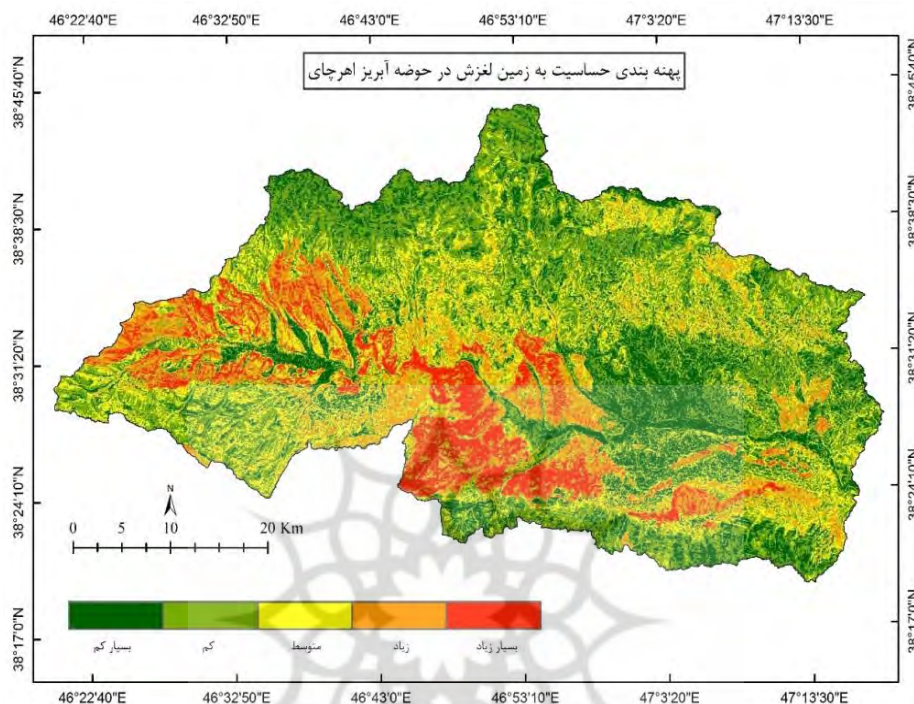
در ارزیابی کارایی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از چهار تابع (حلقوی، چندجمله‌ای، پایه شعاعی و خطی) مدل SVM استفاده شد. ۷۰ درصد زمین لغزش‌های منطقه برای آموزش و ۳۰ درصد جهت صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی عملکرد توابع به منظور پیش‌بینی حساسیت زمین لغزش‌های منطقه از معیار درصد مساحت زیرمنحنی (ROC) استفاده شد. با توجه به مقادیر AUC برای داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی مدل که به ترتیب برابر ۰/۹۸۸ و ۰/۹۵۸ می‌باشد و به سمت یک تمایل بیشتری دارد، تابع پایه شعاعی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (RBF-SVM) عملکرد عالی مدل را نشان می‌دهد (شکل ۶). همچنین به دلیل قدرت تشخیص بالای آزمون، منحنی ROC بالای قطر مربع قرار گرفته و بنابراین به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌باشد.



شکل ۶- ارزیابی کارایی توابع الگوریتم SVM در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه اهرچای براساس داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی (الف: تابع پایه شعاعی، ب: حلقوی، ج: چندجمله‌ای، د: خطی)

شکل (۷) نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش‌های حوضه اهرچای را با استفاده از تابع پایه شعاعی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نشان می‌دهد. براساس این پهنه‌بندی، ۲۰/۷۳ درصد از مساحت حوضه در پهنه با حساسیت

متوسط قرار دارد و ۲۶/۶۱ درصد اراضی منطقه که اغلب در غرب و بالادست حوضه و بخش‌های جنوبی آن واقع شده‌اند دارای کلاس با حساسیت زیاد و بسیار زیاد هستند (جدول ۲).



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌های حوضه اهرچای براساس تابع پایه شعاعی الگوریتم SVM

جدول ۲- مساحت کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش‌های و درصد آنها در حوضه اهرچای

کلاس حساسیت	مساحت (km ²)	مساحت به درصد
بسیار کم	۴۲۹/۱۱	۱۹/۵۹
کم	۷۲۴/۷۵	۳۳/۰۸
متوسط	۴۵۴/۰۴	۲۰/۷۳
زیاد	۴۰۴/۱۱	۱۸/۴۵
بسیار زیاد	۱۷۸/۶۶	۸/۱۶

ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۷

۴- نتیجه گیری

حوضه آبریز اهرچای در شمال غرب ایران، در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی کوهستانی و شرایط اقلیمی منطقه، هدف پژوهش حاضر پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و

ارزیابی کارایی توابع چهارگانه الگوریتم SVM می‌باشد. نتایج ارزیابی نشان داد که سطح زیرمنحنی به ترتیب برای داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی، تابع پایه شعاعی (RBF) $AUC = 0/988$ و $AUC = 0/958$ ، تابع حلقوی $0/938$ ، $AUC = 0/928$ و $AUC = 0/652$ ، تابع چندجمله‌ای $AUC = 0/646$ و تابع خطی $AUC = 0/506$ می‌باشد. بدین ترتیب، مشخص شد تابع پایه شعاعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی بهترین عملکرد را دارد. توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی و نتایج مدل SVM نشان می‌دهد که لیتولوژی نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارد. این امر مخصوصاً در مورد زمین‌لغزش‌های بزرگ منطقه مشاهده می‌شود. در این رابطه، در حدود ۶۷ درصد زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی بر روی سازند کنگلومرانی پلیوسن اتفاق افتاده‌اند. فرسایش‌پذیری و آسیب‌پذیری بالای این سازند در مقابل فرایندهای فرسایشی و هوازدهی باعث شده است که سطح دامنه‌های منطبق بر این سازند پوشیده از مواد هوازده باشد. علاوه بر این، واحد مذکور دارای میان‌لایه‌های ماری ماسه‌ای است که شرایط مساعدی را برای زمین‌لغزش‌های بزرگ و انتقالی منطقه فراهم ساخته‌اند. همچنین ترسیم نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌ها نیز نشان داد که قسمت‌های جنوبی و بالادست اهرچای در قسمت غربی حوضه مطالعاتی از حساسیت بالایی در رخداد زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند، بطوریکه حدود ۲۲ درصد از سطح حوضه مطالعاتی در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. وجود سازندهای مستعد لغزش (کنگلومراها با میان‌لایه‌های ماری - ماسه‌ای و آبرفت‌های کواترنری)، کوهستانی و پرشیب بودن منطقه، وجود چشمه‌های متعدد، هوازدهی شدید سطح دامنه‌ها و وجود مواد هوازده و سایر متغیرها باعث شده است که عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش به صورت ترکیبی عمل کنند و در برخی از موارد باعث زمین‌لغزش‌های بسیار بزرگ شوند. در ضمن در حدود ۵۲ درصد از مساحت حوضه اهرچای که شامل بخش‌های از شمال، شرق و شمال شرقی می‌شود دارای حساسیت کم و بسیار کم از نظر وقوع زمین‌لغزش می‌باشند. چنین وضعیتی لزوم رعایت برنامه‌های مدیریتی مناطق با حساسیت بالا را نشان می‌دهد.

کتابنامه

اجل لوثیان، رسول؛ میرصانعی، رضا؛ فاتحی، لیلی؛ ۱۳۹۲. شناخت و تحلیل کاربردی زمین‌لغزش. انتشارات جهاد دانشگاهی. اصفهان.

احمدآبادی، علی؛ رحمتی، مریم؛ ۱۳۹۴. کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل SVM (مطالعه موردی: آزاد راه خرم آباد - پل زال). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال چهارم. شماره ۳. صص ۲۱۳-۱۹۷.

- بختیاری، محسن؛ گومه، زینت؛ معماریان، هادی؛ ۱۳۹۷. مقایسه سه روش فرایند تحلیل سلسه مراتبی فازی، شبکه عصبی و تراکم سطح در ارزیابی کمی و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سیمره هرمیان). جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره بیست و هفت. صص ۱۹-۴۰.
- عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ فتحی، محمد حسین؛ ۱۳۹۷. شناسایی و طبقه بندی انواع زمین لغزش‌ها با استفاده از ویژگی‌های طیفی و مکانی با رویکرد روش شیء گرا (نصیرآباد تا سد ستارخان اهر). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی. شماره ۲۲ (۶۶). صص ۲۰۵-۱۷۸.
- عابدینی، موسی؛ قاسمیان، بهاره؛ شیرزادی، عطالله؛ ۱۳۹۳. مدل‌سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار). فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۱۲ (۳۷). صص ۸۵-۱۰۲.
- عمیدی، م؛ (-----). نقشه زمین‌شناسی ورقه اهر. مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور. فریدی، م.، حق فرشی، ع؛ ۱۳۸۵. نقشه زمین‌شناسی ورقه خوجا، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- قاسمیان، بهاره؛ عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ شیرزادی، عطالله؛ ۱۳۹۶. ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران: استان کردستان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال ششم. شماره ۳. صص ۳۶-۱۵.
- کریمی، فریبا؛ ۱۳۹۱. ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه‌های کوهستانی نیمه خشک، با استفاده از روشهای آماری و مدل شاهد وزنی (مطالعه موردی: حوضه زهکشی سعیدآبادچای، شمال غرب ایران). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. شماره ۱۰۶. صص ۲۱-۴۴.
- مهدوی، م.ع.، امینی فضل، ج؛ ۱۳۶۷. نقشه زمین‌شناسی ورقه اهر، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- مهرپر تو، م.، امینی فضل، آ.، رادفر، ج؛ ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی ورقه ورزقان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی؛ زارع، غلامرضا؛ ۱۳۹۱. به کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه). جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره سوم. صص ۱۲۵-۱۴۲.

Aghdam IN, Varzandeh MHM, Pradhan, B. (2016). Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model at alborz mountains (iran). *Environ. Earth Sci* 75: 1–20.

Alimohammadlou Y, Najafi A, Yalcin A. (2013). Landslide process and impacts: A proposed classification method, *Catena* 104:219-232.

- Bui TD, Parahan B, Lofman O, Revhaug I. (2012). Landslide susceptibility assessment in Vietnam, Using Support Vector Machines, Decision Tree and Naïve Bayes Models. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 974638, 26 pages.
- Chalkias Ch, Ferentinou M, Polykretis Ch. (2014). GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece, *Geosciences* 4(3): 176-190.
- Chauhan S, Sharma M, Arora MK, Gupta Nk. 2010. Landslide susceptibility zonation through ratings derived from artificial neural network, *International Journal of Applied Earth observation and Geoinformation* 12: 340-350.
- Chen W, Panahi M, Tsangaratos P, Shahabi H, Ilia I, Panahi S, Li S, Jaafari A, Ahmad BB. (2019). Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. *Catena* 172: 212–231.
- Chen W, Shahabi H, Zhang Sh, Khosraveri Kh, Shirzadi A, Chapi K, Pham TB, Zhang T, Zhang H, Chai H, Ma J, Chen Y, Wang X, Li R, Ahmad BB. (2018). Landslide susceptibility modeling based on GIS and novel bagging-based kernel logistic regression. *applied sciences* 8, 2540: 1-21.
- Gomez H, Kavzoglu T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78(1–2): 11–27.
- Lee S, Hong SM, Jung HS. (2017). A Support Vector Machine for landslide susceptibility mapping in Gangwon Province, Korea. *Susceptibility* 9(48): 1-15.
- Pavel M, Nelson JD, Fannin RJ. (2011). An analysis of landslide susceptibility zonation using a subjective geomorphic mapping and existing landslides. *Computers & Geosciences* 37(4):554-566.
- Pham BT, Pradhan B, Bui DT, Prakash I, Dholakia MB. (2016). A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: A case study of Uttarakhand area (India). *Environmental Modelling & Software* 84:240–50.
- Pourghasemi HR, Goli Jirandeh A, Pradhan B, Xu CH, Gokceoglu C. (2013). Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *J. Earth. Syst. Sci* 122(2): 349-369.
- Pradhan B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Comput Geosci* 51:350–365.
- Raja NB, Çiçek I, Türkoğlu N, Aydin O, Kawasaki A. (2017). Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Nat. Hazards* 85 (3): 1323–1346.
- Shirzadi A, Tien Bui D, Pham B TH, Solaimani K, Chapi K, Kavian A, Shahabi H. (2017.) Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach, *Environmental Earth Sciences* 76(60): 1-18.
- Tsangaratos P, Benardos A. (2014). Estimating Landslide susceptibility through a artificial neural network classifier, *Nat Hazards* 74: 1489-1516.
- Wang Q, Guo Y, Li W, He J, Wu Zh. (2019). Predictive modeling of landslide hazards in Wen County, Northwestern China: Based on information value, weight of evidence and certainty factors, *Geomatics. Natural Hazards and Risk* 10(1): 820-835.
- Yao X, Tham LG, Dai FC. (2008). Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101: 572–582.
- Yesilnacar E, Topal T. (2005). Landslide Susceptibility Mapping a Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in a Medium Scale (Turkey). *Engineering Geology*, 79: 251–266.