

پهنه‌بندی زمین لغزش‌های محدوده کوهستانی استان گلستان با استفاده از روش الگوریتم ترکیبی کمترین مربعات ماشین بردار پشتیبان و کلونی زنبور عسل مصنوعی

واله طاهری^{۱*}، امیر کرم^۲، امیر صفاری^۳، شعبان شتایی جویباری^۳

^۱دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

^۲دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

^۳استاد جنگلداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۳۰

چکیده

پهنه‌بندی اراضی بر مبنای میزان خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های مناسب، یکی از راهکارهای مدیریت زمین‌لغزش است. تاکنون کارایی روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفته است تا بهترین و کاراترین روش و الگوریتم مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش کارایی الگوریتم ترکیبی نوین کمترین مربعات ماشین بردار پشتیبان و کلونی زنبورعسل مصنوعی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های محدوده کوهستانی استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت. روش تحقیق بر پایه روش کمی-تحلیلی و در محیط نرم‌افزارهای ARC GIS 10.5، SAGA GIS و MATLAB انجام شد و تعداد ۱۲ پارامتر شامل زاویه شیب، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع، انحنا سطح زمین (انحنای شیب)، فاصله از گسل، کاربری اراضی، بافت خاک، عمق دره، شاخص توان آبراهه، شاخص سختی زمین، شاخص میزان رطوبت و لیتولوژی به منظور اجرای مدل انتخاب شدند. نتایج نشانگر آن است که معیار صحت کلی برای داده‌های تعلیمی و اعتباری به ترتیب ۸۶/۲۶ و ۸۲/۳ درصد می‌باشد که بیانگر این مطلب است که مدل ذکر شده از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید است و در نهایت، منطقه مطالعاتی به پنج طبقه با حساسیت بسیار زیاد، زیاد، متوسط، خیلی کم و کم، طبقه‌بندی گردید که ارزیابی تمامی نتایج، نشان‌دهنده عملکرد بالا و ظرفیت پیش‌بینی خوب الگوریتم کمترین مربعات ماشین بردار پشتیبان-کلونی زنبورعسل مصنوعی در شناسایی پهنه‌های با پتانسیل بالای لغزشی است که می‌تواند برای مدیریت بهتر در استان گلستان مورد استفاده قرار گیرد. در نقشه نهایی پهنه‌بندی لغزش در استان، به ترتیب ۶۹/۰، ۲۸/۱۱، ۶۲/۹۳ و ۸/۲۷ درصد از مساحت نواحی کوهستانی استان در در پهنه‌های لغزشی با حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لغزش، سیستم اطلاعات جغرافیایی، پهنه‌بندی، کلونی زنبورعسل مصنوعی، کمترین مربعات ماشین بردار پشتیبان، استان گلستان

مقدمه

رخدادهای طبیعی فرآیندهای پیچیده‌ای هستند که بر تمامی بخش‌های کره زمین تأثیر می‌گذارند و در این بین پهنه‌بندی زمین‌لغزش شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی این مناطق بر اساس درجه واقعی یا قابلیت مخاطره‌ای ناشی از بروز زمین‌لغزش بر روی شیب دامنه‌ها است (شریعت

جعفری، ۱۳۷۵: ۲۶). حرکت توده‌ای مواد تشکیل‌دهنده زمین از یک شیب به سمت پایین را زمین‌لغزش یا ناپایداری دامنه می‌نامند. این حرکت رو به پایین مواد سطحی، تحت تأثیر گرانش زمین صورت گرفته و میزان تحرک این مواد با حضور آب موجود در رسوبات افزایش می‌یابد. زمین‌لغزش‌ها در دنیا هر ساله آسیب‌های زیادی به مناطق مسکونی، جاده‌ها، تأسیسات، زمین‌های کشاورزی، باغ‌ها، مراتع و غیره

وارد می‌کند (پورقاسمی، ۱۳۸۹: ۳). از این‌رو در دهه‌های اخیر، تحلیل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، توجه بسیاری از مهندسان و پژوهشگران حوزه علوم زمین را به خود معطوف کرده است، هدف از چنین بررسی‌هایی، به‌دست آوردن راه‌حلی برای مشکل پیچیده و چندبُعدی خطر زمین‌لغزش است که نیاز به تخصص‌های مختلف علوم زمین به‌ویژه زمین‌ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی، آمار، علوم کامپیوتر، فیزیک، فناوری اطلاعات و اقتصاد دارد (Guzzetti et al., 1999: 15). زمین‌لغزش یکی از پدیده‌های طبیعی است که هر سال سبب ایجاد خسارات مالی و جانی فراوانی در سطح کشور می‌شود. از این‌رو تشخیص مناطق مستعد لغزش، برای به‌کارگیری روش‌های پیش‌گیری یا مقابله با ناپایداری دامنه‌ها به‌منظور کاهش خطر و ریسک حاصل از آن‌ها، بسیار اهمیت دارد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۱: ۷). زمین‌لغزش هر سال در بیشتر استان‌های کشور موجب خسارات اقتصادی به راه‌ها، خطوط راه آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آبرسانی، تأسیسات معدنی، تأسیسات استخراج، پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی درون شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها، مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها می‌شود یا آن‌ها را مورد تهدید قرار می‌دهد. زمین‌لغزش‌ها و ناپایداری‌های دامنه‌ای مخاطرات مهمی برای فعالیت‌های انسانی هستند که اغلب سبب از دست رفتن منابع اقتصادی، آسیب به اموال و تأسیسات می‌شوند. این مخاطرات در شیب‌های طبیعی و یا شیب‌هایی که به دست انسان تغییر یافته‌اند اتفاق می‌افتد (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳: ۸).

کی فر (۱۹۸۴: ۴۱۰) نیز زمین‌لغزش‌ها را در سه دسته ریزش‌ها و لغزش‌های گسسته زمین، لغزش‌های پیوسته، جریان‌های خاکی سریع و گسترش‌های جانبی گروه‌بندی کرده است. هدف نهایی هر تحقیق در مورد فرایندهای توده‌ای، تهیه نقشه پهنه‌بندی و کلاس‌بندی درجات خطر در منطقه مورد مطالعه با هدف کاهش آسیب‌های ناشی از آنهاست. تاکنون روش‌های مختلفی

برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کشور ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به کارهای پیشین انجام‌شده به روش AHP (رنجبر و فلک، ۱۳۹۳: ۸۵-۹۷)، روش آمار دو متغیره (نصرآزادانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۶۵-۸۰). روش فازی (غلامی کلاته و همکاران، ۱۳۹۹: ۱-۱۴). روش رگرسیون لجستیک (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱-۱۸). روش رگرسیون چندمتغیره (حسین‌زاده، ۱۳۸۸: ۲۷-۳۷)، روش مدل آنتروپی (مقیم و همکاران، ۱۳۹۱: ۱-۱۶)، روش فاکتور اطمینان (بهشتی‌راد و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۹-۲۸) و روش شبکه عصبی مصنوعی (راکعی و همکاران، ۱۳۹۰: ۵۷-۶۴) اشاره کرد. کرم و تورانی (۱۳۹۱: ۱۷۷-۱۹۰) در پژوهشی استعداد به وقوع زمین لغزش بخشی از جاده‌ها با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و رگرسیون خطی را مورد مطالعه قرار دادند و برای این منظور از لایه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از گسل‌های اصلی، فاصله از گسل‌های فرعی، فاصله از آبراه اصلی، فاصله از آبراه فرعی، فاصله از جاده، فاصله از راه آهن، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و میانگین بارش استفاده شد و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی نقشه نهایی خطر وقوع زمین لغزش را تهیه کردند. نتایج نشان داد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی روش مناسب‌تری برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه است. بر اساس این روش حدود ۶۷/۸ درصد از مساحت محدوده استعداد بالایی برای وقوع زمین لغزش دارند. صفاری و معصومی (۱۳۹۵: ۴۳-۶۲) در پژوهشی به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از دو روش مدل آنتروپی و روش منطق فازی در شهرستان کرمانشاه پرداختند. بر اساس این پژوهش نه پارامتر لیتولوژی، فاصله از آبراه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی و بارش به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای احتمالی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه تشخیص داده شدند. با انطباق لایه‌های اطلاعاتی این عوامل بر نقشه زمین‌لغزش‌های منطقه

Ballabio & Sterlacchini, 2012: 47-70; Zhu & feng, 2006: 2007-2017.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان یکی از روش‌های ناپارامتریک بر پایه تئوری یادگیری آماری بنا شده است. براساس این تئوری می‌توان کران نرخ خطای ماشین یادگیری را برای داده‌های طبقه‌بندی نشده، به‌عنوان نرخ خطای تعمیم یافته، در نظر گرفت. یمانی (۱۳۹۱: ۱۲۵-۱۴۲) به پژوهشی تحت عنوان به‌کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش پرداختند. در این پژوهش با استفاده از توابع حلقوی، چندجمله‌ای و شعاعی و خطی در الگوریتم SVM معیارهای مؤثر در شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش شامل فاصله از گسل، شبکه زهکشی، سنگ‌شناسی، شیب (مقدار، زاویه) و سطح ارتفاعی به ارزیابی قابلیت وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز درکه در شمال شهر تهران پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان داد بر اساس تابع خطی بیشتر پهنه حوضه آبریز درکه حساسیت متوسطی به رخداد زمین‌لغزش دارد. بر اساس خروجی حاصل از تابع حلقوی اکثر پهنه این حوضه حساسیت متوسط تا بالایی را نشان می‌دهد. حداکثر و حداقل مساحت احتمالی حساس به زمین‌لغزش با ۳۰ و ۲۰ کیلومترمربع به ترتیب متعلق به توابع حلقوی و شعاعی است. بین توابع اجراشده، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین عملکرد و تابع خطی از نظر عملکرد، پایین‌ترین دقت را نشان داد.

منطقه مورد مطالعه

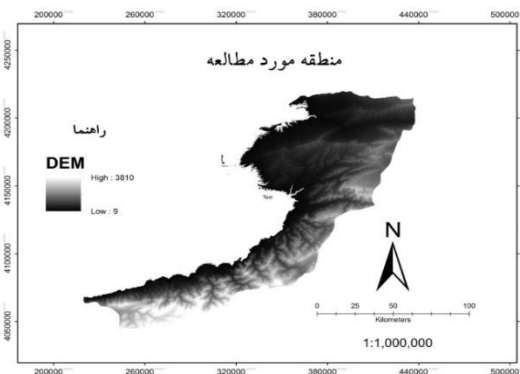
استان گلستان در قسمت شمالی کشور، بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است (شکل ۱). این استان از شمال به جمهوری ترکمنستان، از غرب به استان مازندران و دریای خزر، از جنوب به استان سمنان و از شرق به استان خراسان شمالی محدود می‌شود. مساحت استان ۲۲۰۲۲ کیلومترمربع بوده و حدود ۱/۳۳ درصد از کل مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. از این

در محیط GIS، اثر هر یک از عوامل در رخداد زمین‌لغزش‌ها ارزیابی شد و در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از ۹ پارامتر تهیه گردید. ارزیابی صورت‌گرفته با استفاده از شاخص احتمال تجربی نشان می‌دهد که مدل فازی با مقدار شاخص احتمال تجربی ۹۰٪ روش کارآمدتری نسبت به مدل انترپوی با مقدار شاخص ۵۰٪ در برآورد خطر زمین‌لغزش در شهرستان کرمانشاه می‌باشد.

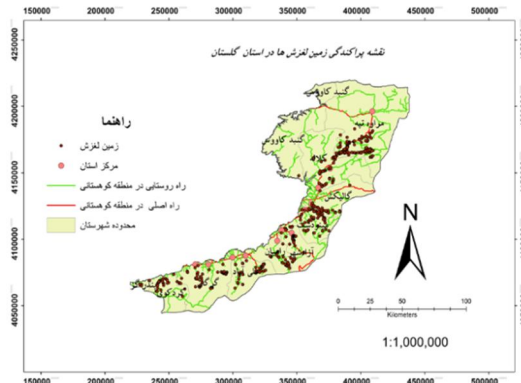
کشور ایران نیز با توجه به قرار گرفتن روی کمربند لرزه‌ای و بروز زلزله‌های متعدد و همچنین نوع مورفولوژی زمین، زمین‌شناسی و توپوگرافی در معرض زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله و خسارات ناشی از آن قرار دارد، از همین رو تلاش برای شناخت این پدیده و راه‌های پیش‌بینی، پیشگیری و مقابله با آن اهمیت زیادی دارد. شیرانی و همکاران (۱۳۹۶: ۴۵۱) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره به پهنه بندی زمین لغزش در حوضه ونک در استان اصفهان پرداختند. با استفاده از بررسی‌های میدانی و مطالعات انجام شده نه پارامتر لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش، فاصله از گسل، فاصله از جاده و تراکم شبکه زهکشی را در نظر گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی روش کارآمدتری برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه است. پژوهش‌های زیادی با استفاده از روش رگرسیون لجستیک پیرامون زمین‌لغزش در سال‌های اخیر صورت گرفته است (Dai & Lee, 2002: 213-228; Suzen et al, 2004: 303-321; Yesilnacar & Topal, 2005: 251-266; Zue & Feng, 2006: 2007-2017; Lin et al., 2010: 3423-3451). از جمله روش‌های آماری که در چند سال اخیر مورد توجه واقع شده‌اند، الگوریتم SVM است. این الگوریتم بر اساس نظریه یادگیری آماری و شامل یک مرحله آموزشی با ورودی همراه و ارزش‌های اهداف خروجی است. الگوریتم آموزشی برای ارزیابی و آزمون مجموعه‌ای از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yao et al, 2008: 572-582). این روش در چند سال اخیر مورد استفاده برخی از محققان قرار گرفته شده است (Cevik & Topal, 2003: 949-962).

تحقیق نواحی کوهستانی استان گلستان می باشد که حاشیه‌های جنوبی تا شمال شرقی استان را در بر می‌گیرد و تقریباً تمامی زمین لغزش‌های رخ داده در استان در این ناحیه رخ داده‌اند.

محدوده ۱۱۲۶۰۰۰ هکتار را مرتع و ۴۳۰۰۰۰ هکتار را جنگل و در مجموع حدود ۷۰ درصد از سطح استان را منابع طبیعی تشکیل می‌دهند (مطالعات آمایش استان گلستان، ۱۳۹۴). محدوده مورد مطالعه در این



ب



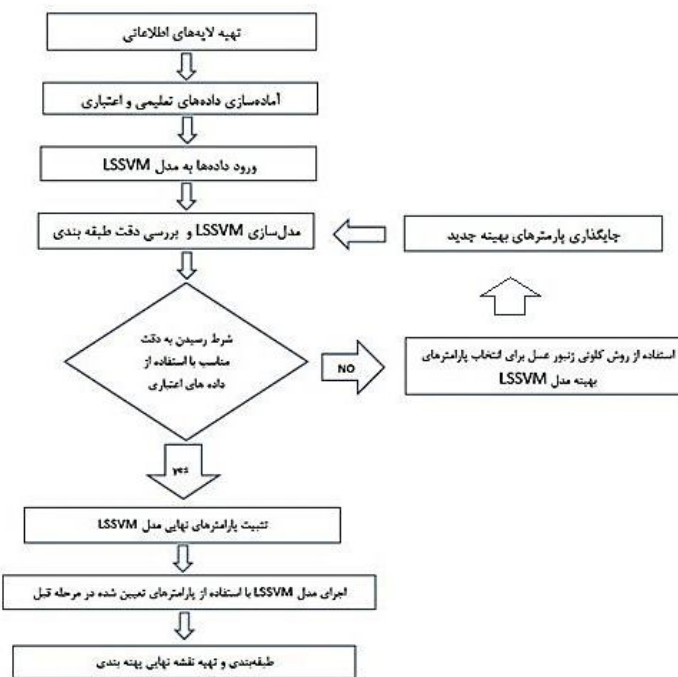
الف

شکل ۱: منطقه مورد مطالعه (الف) نقشه مدل رقمی ارتفاع محدوده کوهستانی استان (ب) موقعیت قرارگیری زمین لغزش‌ها در محدوده کوهستانی

به ازای هر پیکسل اطلاعات مربوط به ۱۲ لایه ذکر شده در بالا استخراج گردید؛ همچنین تعداد ۲۰۰۰ پیکسل از مناطقی که در آنجا زمین لغزش رخ نداده بود به همراه اطلاعات مربوط به ۱۲ لایه مذکور استخراج شد. این داده‌ها به حالت برداری تبدیل شدند. به نحوی که ماتریسی با ابعاد ۴۰۰۰ سطر و ۱۲ ستون برای ویژگی‌ها و ماتریسی با ابعاد ۴۰۰۰ سطر و ۱ ستون مربوط به مشاهدات یا همان زمین لغزش‌ها که به آنها مقادیر ۰ و ۱ نسبت داده شد تشکیل شد (۰ به معنی عدم وقوع زمین لغزش و ۱ به معنی وقوع زمین لغزش می‌باشد). از ۲۰۰۰ پیکسل مذکور تعداد ۱۵۰۰ پیکسل (۷۵ درصد) به عنوان داده‌های آموزشی جهت مدل‌سازی و ۵۰۰ عدد از پیکسل‌ها (۲۵ درصد) نیز به عنوان داده‌های اعتبار سنجی به صورت تصادفی انتخاب گردید. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به منظور استخراج مشخصه‌های محیطی عبارتند از: نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای. بر اساس این پژوهش‌ها و خصوصیات منطقه مورد مطالعه، ۱۲ مشخصه محیطی برای پیش‌بینی مناطق حساس به زمین لغزش در نظر گرفته شد.

روش تحقیق

مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ آمده است که ابتدا ۱۲ لایه اطلاعاتی شامل: زاویه شیب، جهت شیب، مدل رقمی ارتفاع، فاصله از گسل، کاربری اراضی، لیتولوژی، بافت خاک، عمق دره، شاخص توان آبراهه، شاخص سختی زمین، شاخص میزان رطوبت، انحنای سطح زمین (انحنای شیب) در نرم افزارهای GIS و SAGA به صورت رستری جهت ورود به نرم‌افزار متلب آماده شدند. برای تهیه لایه مناطق کوهستانی استان از لایه مدل رقمی ارتفاع استان (۲۸ متر) استفاده شد (شکل ۱-ب). لایه رستری کلیه پارامترها با لایه ارتفاعی قطع داده شد. همچنین لایه نقطه ای مربوط به رخداد زمین لغزش‌ها در محدوده کوهستانی، برداشت شده توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش‌های میدانی به روز رسانی شد، در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به صورت رستری درآمد. کلیه لایه‌های مورد نیاز با فرمت و پیکسل‌سایز یکسان وارد نرم‌افزار متلب شدند. پیکسل‌های دچار زمین لغزش در نرم‌افزار متلب مشخص شدند و تعداد ۲۰۰۰ پیکسل لغزشی به صورت تصادفی انتخاب شد و



شکل ۴: مراحل انجام پژوهش

در آن زمین لغزش مشاهده نشد ارزش صفر اختصاص داده شد (Kavzouglu, 2014:430). در نتیجه شاخص حساسیت زمین لغزش از نظر احتمال وقوع بین ۰ و ۱ (با دامنه مشابه ۰-۱۰۰) متغیر است. سپس نمونه‌های جمع‌آوری شده از مناطق لغزشی به‌طور تصادفی به دو بخش نمونه‌هایی که برای تعلیم ساخت مدل از آن‌ها استفاده می‌شود و نمونه‌هایی که در آزمون اعتبارسنجی مدل آن‌ها را به کار می‌برند تقسیم گردیدند (Cruden, 1996:39). ساخت یک مدل و آزمون آن، هدف اصلی تفکیک نمودن مجموعه نمونه‌های آموزشی و آزمایشی است؛ چنانچه نمونه‌های تصادفی جمع‌آوری شده برای آموزش و آزمون هم‌زمان با نمونه‌های تصادفی مبتنی بر نقاط پیکسلی لغزش مورد استفاده قرار بگیرد، عملکرد مدل افزایش می‌یابد.

روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM): ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که از آن برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌کنند. ماشین بردار پشتیبان یک

از آنجایی که روش‌های کمی در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش نتایج مطمئن تری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهند، لذا استفاده از این روش‌ها اعتبار علمی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارند (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۴). لذا در این پژوهش جهت ارزیابی حساسیت زمین لغزش و پهنه‌بندی آن با مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و کلونی زنبور عسل مصنوعی، لایه‌های رقومی در محیط نرم‌افزار ARCGIS10.5 و SAGA GIS تهیه شدند و بعد از مدل‌سازی، در نهایت نقشه نهایی حساسیت وقوع پدیده زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش ارائه شده تهیه گردید. نقشه پراکنش زمین لغزش، مجموعه‌ای از لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه مشخص است و سبب نوعی آگاهی و بصیرت در مورد مکان‌های وقوع زمین لغزش و کسب اطلاعات از نوع و خسارت آن‌ها می‌شود (Van Westen et al., 2008: 115).

در این پژوهش، به منظور تشخیص پهنه‌های حساس به زمین لغزش، به پیکسل‌هایی که در آن زمین لغزش مشاهده شد ارزش ۱ و به پیکسل‌هایی که

یادگیری را پیچیده تر می سازد؛ و مقدار γ کوچک تر به خطاهایی منجر می شود که روا دانسته می شوند، اما ممکن است ماشین یادگیری با تقریب ضعیف را ایجاد کند (سیفی، ۱۳۹۲: ۷۰). حل با استفاده از شکل لاگرانژی از تابع هدف اصلی:

(رابطه ۴)

$$L(w, b, e; a) = j(w, e) - \sum_{i=1}^N a_i \{w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i\}$$

a_i ضریب لاگرانژ است. بر اساس شرایط کان-تاتاگر (T) مدل LS-SVM به منظور تابع تقریب به صورت رابطه ۵ نوشته می شود (Bouzerdoum et al, 2013: 228).

(رابطه ۵)

$$y(x) = \sum_{i=1}^N a_i K(x, x_i) + b$$

$K(x_i, x_j)$ تابع کرنل نامیده می شود که با تبعیت از شرایط مرسر تابعی با ایجاد ضرب داخلی در فضای ویژگی معرفی می شود (Shiloh Shah, 2007: 64).

(رابطه ۶)

$$K(x_i, x_j) = \langle \varphi(x_i), \varphi(x_j) \rangle, i, j = 1, \dots, N$$

در این پژوهش از تابع کرنل پایه شعاعی برای حل استفاده شد. تعیین پارامتر تنظیم کننده بخش خطا (γ) و تعیین $\sigma < 0$ پارامتر تابع کرنل پایه شعاعی با رابطه ۷ امکان پذیر است:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-|x_i - x_j|^2 / 2\sigma^2) \quad (\text{رابطه ۷})$$

الگوریتم هوش کلونی زنبورعسل مصنوعی (ABC): الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی یک روش بهینه سازی جدید مبتنی بر ازدحام است که می تواند به طور مؤثری مشکلات بهینه سازی سراسری را حل کند (Karaboga et al., 2014: 27). این الگوریتم از رفتار دنبال غذا رفتن معمول زنبورعسل الهام گرفته شده است و از طرف جامعه علمی به دلیل سادگی، انعطاف پذیری و عملکرد مطلوب آن توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است. ABC برای انجام فرآیند جستجو سه نوع زنبورعسل، یعنی زنبورهای کارگر، زنبورهای نگهبان و زنبورهای بازرس (دیده بان) را در نظر می گیرد. به طور کلی، یک تکرار

طبقه بندی کننده دودویی غیر پارامتریک است که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSSVM): اساس روش ماشین بردار پشتیبان توسط کورتز و وپتیک (۱۹۹۵) بر پایه تئوری یادگیری آماری بنا گردید که از حداقل سازی ریسک ساختاری پیروی می کند (Suykens et al., 2002: 1-84). این مدل برخلاف مدل SVM به جای مسئله برنامه نویسی درجه دوم در حل، از معادلات خطی استفاده می نماید؛ بنابراین دقت محاسباتی بالاتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان کلاسیک دارد (سیفی، ۱۳۹۲: ۷۰). چارچوب رگرسیون حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان بدین صورت است:

مجموعه داده های آموزشی که $\bar{x}_i \in R^n$ به عنوان بردار ورودی و $\bar{y}_i \in R$ به عنوان بردار خروجی معرفی می شوند. تابع رگرسیون غیرخطی در فضای وزن دهی اولیه به صورت رابطه ۱ است (Suykens et al, 2002: 1-84):

$$y(x) = w^T \cdot \varphi(x_i) + b \quad (\text{رابطه ۱})$$

w ، b و به ترتیب مقادیر وزن ها و بایاس تابع رگرسیون و $\varphi(x_i)$ ترسیم غیرخطی ورودی ها در فضای ویژگی با ابعاد بالاست (Shiloh Shah, 2007: 64). رگرسیون غیرخطی بر اساس رابطه بهینه سازی ۲ حل می شود:

(رابطه ۲)

$$\min_{w, e, b} j(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2$$

بر اساس محدودیت:

(رابطه ۳)

$$y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i$$

حداقل سازی بخش اول رابطه با حداقل سازی مقدار فاصله اطمینان از ماشین یادگیری و حداقل سازی بخش دوم مطابق حداقل سازی مقدار ریسک تجربی است (سیفی، ۱۳۹۲: ۷۰). γ پارامتر تنظیم کننده بخش خطاست و e میزان خطا را نشان می دهد. مقدار γ همواره تابع تقریب را کنترل می کند. مقدار γ بزرگ تر خطای بیشتری ایجاد می کند و ماشین

مرحلهٔ زنبور بازرسی: اگر تناسب مواد منبع غذایی نمی تواند به افزایش کیفیت مواد غذایی در طی تعداد مشخصی از تکرارهای متوالی کمک کند، منبع غذایی توسط زنبور نگهبان رها شده و با منبع غذایی جدید جایگزین شده است. سپس موقعیت منبع غذایی جدید توسط یک زنبور عسل بازرسی کشف می شود که می تواند با استفاده از رابطه ۴ تولید شود (Cheng and Hoang, 2015: 1965).

ارزیابی صحت نتایج طبقه بندی

ارزیابی صحت^۱ نتایج طبقه بندی، یک ضرورت در فرآیندهای طبقه بندی است. منظور از صحت، میزان توافق^۲ بین طبقات حاصل از اجرای طبقه بندی کننده و طبقات تعیین شده در نقشه با داده های واقعی است. ارزیابی صحت منجر به تعیین درجه ای از اطمینان برای نتایج به دست آمده می شود که با استفاده از ماتریس خطا و تعیین مقادیر صحت کلی و ضریب کاپا صورت می گیرد. حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل نقشه واقعی و زمین با پیکسل های متناظر در نتایج طبقه بندی، ماتریس خطا را ایجاد می کند. در ماتریس خطا که به صورت جدول ارائه می شود، داده های تست به صورت ستون ها و داده های مربوط به نتایج طبقه بندی به صورت سطرها ظاهر می شوند. در جداول مربوطه اعداد واقع بر روی قطر اصلی نشان دهندهٔ پیکسل هایی هستند که صحیح طبقه بندی شده اند و سایر اعداد واقع بر قطر غیر اصلی نشان دهندهٔ پیکسل هایی هستند که به اشتباه طبقه بندی شده اند. با توجه به ماتریس خطای طبقه بندی تصاویر، پارامترهای متعددی برای بیان دقت و خطا استخراج می شوند از جمله صحت کلی و ضریب کاپا. در این پژوهش از روش صحت کلی برای ارزیابی نتایج استفاده شد. صحت کلی میانگینی از دقت طبقه بندی است که نسبت پیکسل های صحیح طبقه بندی شده به جمع کل پیکسل های طبقه بندی شده را نشان می دهد. این یک برآورد کلی از صحت

الگوریتم بهینه سازی ABC شامل چهار مرحلهٔ اختصاص منبع اولیه غذا، فاز زنبور عسل کارگر، مرحله زنبور عسل نگهبان و مرحلهٔ زنبور عسل بازرسی به صورت زیر است:

مقدار اولیه منبع غذا: الگوریتم ABC فرآیند جستجو را با تولید یک عدد NFS از موقعیت های منبع غذایی به صورت تصادفی آغاز می کند. یک زنبور عسل مجاز به قرار دادن در یک منبع غذایی است. NFS در کل فرآیند جستجو ثابت است. معادلهٔ زیر برای تولید یک راه حل استفاده می شود: (رابطه ۸)

$$x_{i,j} = LB_j + (UB_j - LB_j) \cdot \text{rand}(0,1)$$

که در آن $x_{i,j}$ موقعیت منبع مواد غذایی را نشان می دهد؛ LB_j و UB_j به ترتیب کران های پایینی و بالایی ژامین عنصر در بردار $x_{i,j}$ هستند؛ $\text{rand}(0,1)$ یک عدد تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱ را نشان می دهد.

مرحلهٔ زنبور عسل کارگر: هر زنبور کارگر یک موقعیت جدید منبع غذایی را در فضای عملیاتی بر اساس مجاورت با منبع غذایی که قبلاً انتخاب شده است انتخاب می کند. یک راه حل منتخب برای $u_{i,j}$ می تواند از راه حل قبلی $x_{i,j}$ با استفاده از معادله زیر ایجاد شود:

$$u_{i,j} = x_{i,j} + \phi_{i,j} (x_{i,j} - x_{k,j}) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن $\phi_{i,j}$ نشان دهنده یک عدد تصادفی در محدوده $[-1, 1]$ است.

زنبور عسل نگهبان: زنبورهای کارگر به کدو باز می گردند و اطلاعات مربوط به منبع غذایی را با زنبورهای نگهبان به اشتراک می گذارند. بر اساس اطلاعات به اشتراک گذاشته شده، زنبور عسل نگهبان منبع غذایی را بسته به مقدار احتمال P_i مرتبط با منبع غذایی که به روش زیر محاسبه می شود انتخاب می کند:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^{NFS} fit_k} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جایی که fit_i و fit_k به ترتیب مقادیر سازگار با i امین و k امین منبع غذایی را نشان می دهند.

1. Accuracy
2. Level of agreement
3. Ground truth

(OA) است که از آن برای ارزیابی مدل‌های پهنه بندی در این تحقیق استفاده شده است که فرمول آن مطابق با رابطه زیر می‌باشد.

$$OA = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} = \frac{TP+TN}{T} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

یافته‌های تحقیق

تعیین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و آماده‌سازی مجموعه داده‌های مرتبط با آن از مراحل مهم در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش هستند. برای انجام روش LSSVM_ABC در ابتدا نقشه پارامترهای تأثیرگذار بر زمین‌لغزش که مدنظر این الگوریتم هستند، تهیه گردید. برای اجرای مدل و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، جمع‌آوری و تهیه پایگاه داده از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش از مهم‌ترین مراحل پژوهش است. در این پژوهش با استفاده از ۱۲ پارامتر عمل پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام شده است. در اولین گام از این مرحله با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه لایه مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) (شکل ۳.الف)، با اندازه پیکسل ۲۸ متری تهیه شد. با داشتن این لایه با استفاده از عملگرهای مختلف موجود در بسته نرم‌افزاری سامانه اطلاعات جغرافیایی، لایه‌هایی همچون انحناء سطح زمین (شکل ۳.ب)، زاویه شیب (شکل ۳.ج) و جهت شیب (شکل ۳.د) در مدل استفاده شده است، استخراج شدند.

انحنای طولی شیب: بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی و نشان‌دهنده واگرایی و همگرایی توپوگرافیکی است (دهنوی و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۲۷).
ارتفاع: این عامل، جهت آبراهه‌ها و میزان تراکم شبکه زهکشی را کنترل می‌کند و در میزان رطوبت خاک و میزان شیب دامنه‌ها تأثیر قابل توجهی دارد (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۹).

زاویه شیب: زاویه شیب به‌عنوان یک پارامتر اساسی در ارزیابی پایداری شیب محسوب می‌شود؛ همچنان‌که زاویه شیب افزایش پیدا می‌کند، سطح ثقلی نیز کاهش یافته، تنش برشی در خاک‌های آبرفتی و نهشته‌ای افزایش می‌یابد؛ بنابراین دامنه‌های آرام‌تر

طبقه‌بندی و پارامتر ساده‌ای است. صحت کلی یک برآورد خوش‌بینانه و بالاتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. خطای حاصل از طبقه‌بندی تحت عنوان دو نوع خطای Omission و Comission نیز ارزیابی می‌گردد که این خطاها را می‌توان از ماتریس خطا محاسبه کرد. نوعی خطای ناشی از طبقه‌بندی که در آن پیکسلی به اشتباه در یک کلاس قرار گرفته که به آن تعلق ندارد را Comission گویند و Omission نوعی خطای ناشی از طبقه‌بندی است که در آن پیکسل متعلق به یک کلاس خاص در کلاس مذکور قرار نگرفته است.

هنگام مقایسه نقشه‌های استعداد وقوع یک خطر زمین‌شناسی (مانند زمین‌لغزش)، برای هر پیکسل چهار حالت ممکن است اتفاق بیفتد. چهار حالت مقایسه‌ای بین پیش‌بینی‌های مدل (وقوع پدیده یا عدم وقوع پدیده) و وضعیت واقعی خطر در نقطه (وقوع پدیده یا عدم وقوع پدیده) به صورت TN^1 , FN^2 , FP^3 , TP^4 تعریف می‌گردد:

TP (مثبت حقیقی): تعداد پیکسل‌هایی که در واقعیت پدیده مورد نظر را دارند و مدل وقوع آن را به درستی پیش‌بینی کرده است.
 TN (منفی حقیقی): تعداد پیکسل‌هایی که در واقعیت پدیده مورد نظر را ندارند و مدل وقوع آن را به درستی پیش‌بینی کرده است.
 FP (مثبت کاذب): تعداد پیکسل‌هایی که در واقعیت پدیده مورد نظر را ندارند ولی مدل به اشتباه برای آنها وقوع پدیده را پیش‌بینی کرده است (خطای نوع ۱).

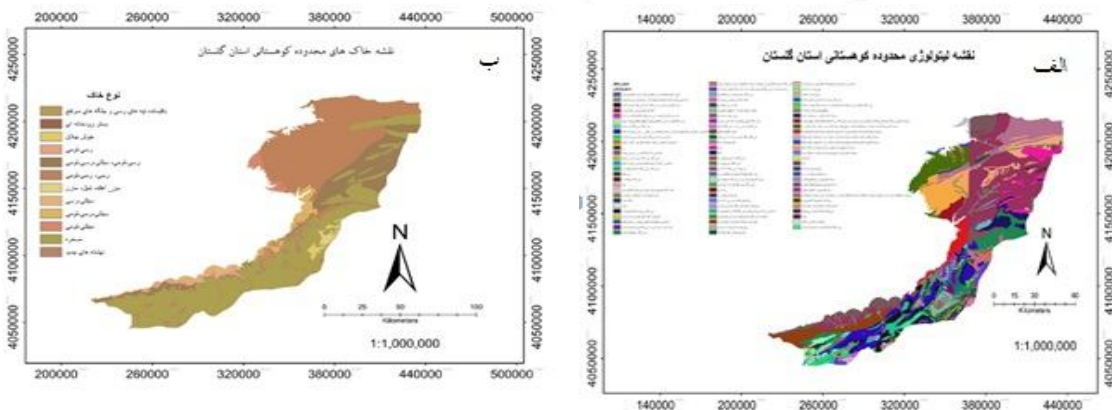
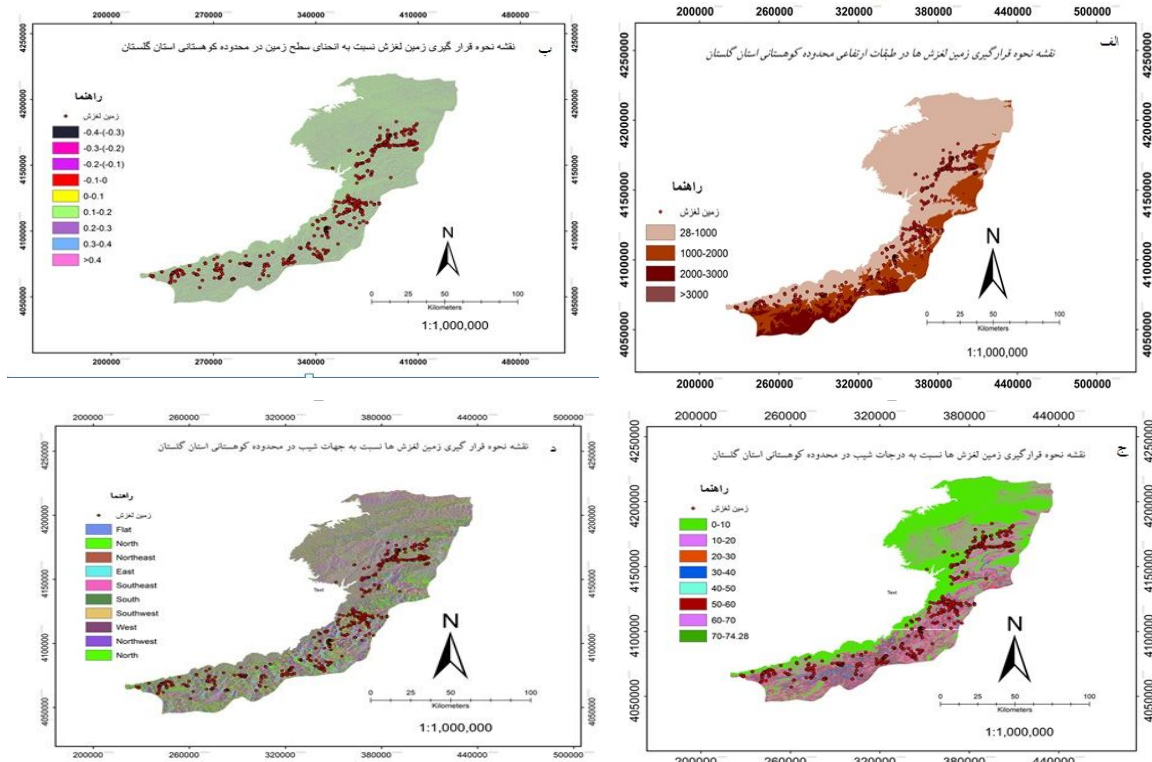
FN (منفی کاذب): تعداد پیکسل‌هایی که در واقعیت پدیده مورد نظر را دارند ولی مدل به اشتباه برای آنها وقوع پدیده را پیش‌بینی کرده است (خطای نوع ۲).
مطابق با چهار حالت مقایسه‌ای، روش‌های مختلفی در زمینه ارزیابی عملکرد مدل داریم که همانطور که در بالا توضیح داده شد یکی از این روش‌ها دقت کل

1. True Negative
2. False Negative
3. False Positive
4. True Positive

لیتولوژی: عامل سنگ‌شناسی یکی از پارامترهای مهم در مطالعات زمین‌لغزش محسوب می‌شود. در واقع، نوع سنگ به‌عنوان یکی از عوامل زمین‌شناسی، کنترل‌کننده میزان تغییر رخساره‌های سنگی و تبدیل آن‌ها به واریزه‌های سنگی عامل وقوع سنگ‌لغزش و افزایش پتانسیل خاک‌زایی و ایجاد دامنه‌های با شیب‌های متغیر و درنهایت وقوع زمین‌لغزش بوده است (مددی، ۱۳۹۴: ۱۳۳).

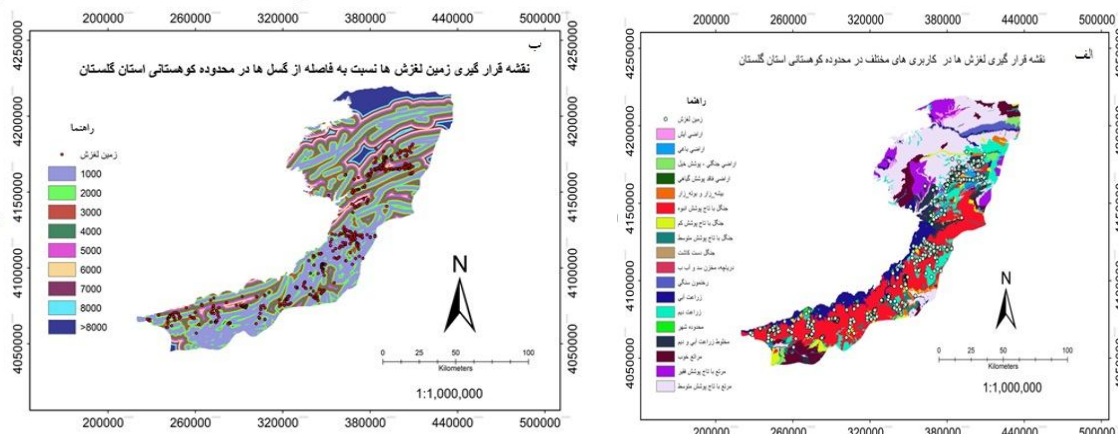
کمتر در معرض زمین‌لغزش هستند (دای و همکاران، ۲۰۰۱: ۹۱۶).

جهت شیب: زاویه شیب نیز از مدل رقومی ارتفاع استخراج گردیده و در ۱۰ کلاس طبقه‌بندی می‌شود. **بافت خاک:** انواع بسیار مختلفی از خاک‌ها وجود دارد و هر یک مشخصه‌های بی‌همتایی از نظر رنگ، بافت، ساختمان و محتویات دارند. عمق خاک هم متفاوت است. نوع خاک یک منطقه، نوع گیاهانی که می‌توانند در آن رشد کنند را تعیین می‌کند.



کاربری اراضی: کاربری اراضی به عنوان یک عامل مهم در ارزیابی حساسیت زمین لغزش در نظر گرفته می شود. این عامل ویژگی های زمین را تحت تأثیر قرار داده و سبب تغییر رفتار آن می شود (روستایی، ۱۳۹۳: ۲۰۰).

گسل: وجود گسل ها و خطواره ها به عنوان عامل ثانویه و یک متغیر مستقل در وقوع زمین لغزش ها مورد توجه واقع شده است (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۹). گسل اصلی از روی نقشه زمین شناسی ترسیم گردید و سپس فاصله ها از گسل در ۵ کلاس در محیط نرم افزاری ArcGIS ترسیم شد.



شکل ۵: الف) نقشه کاربری اراضی (ب) نقشه فاصله از گسل محدوده مورد مطالعه همراه با پراکنندگی لغزش ها

برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییراتی که به دلیل فرسایش در بافت خاک رخ داده استفاده کرد (Grabs et al., 2007: 17). این شاخص عمدتاً برای تعیین کنترل توپوگرافیک بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می شود و مقادیر بالای TWI معمولاً در بدنه زمین لغزش ها پیدا می شود.

شاخص ناهمواری زمین (TRI): شاخص ناهمواری زمین در واقع، نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود است. برای این کار ارتفاع هر پیکسل از پیکسل های اطراف خود کم می شود و برای مثبت کردن این اعداد آن ها را به توان ۲ می رسانند، از آن ها میانگین می گیرند و دوباره ریشه دوم آن حساب می گردد و به پیکسل مورد نظر نسبت داده می شود. برای هر پیکسل از نقشه رستری مدل رقومی ارتفاع و از طریق رابطه زیر محاسبه می شود. تغییرات این شاخص با نتوتکتونیک و فرسایش در ارتباط است. مناطق

شاخص عمق دره: عمق دره اختلاف بین ارتفاع یک پیکسل و خط الراس بالایی است و عاملی مهم در ناپایداری شیب می باشد زیرا افزایش نواحی بالایی یک دامنه می تواند موجب سرازیر شدن مواد دامنه به سمت پایین گردد، از این رو لایه عمق دره از لایه DEM و در محیط SAGA GIS مطابق شکل (الف، ۶) تهیه شد (Tien Bui et al, 2016: 450).

شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپو گرافیک) یا رطوبت خاک که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می شود به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

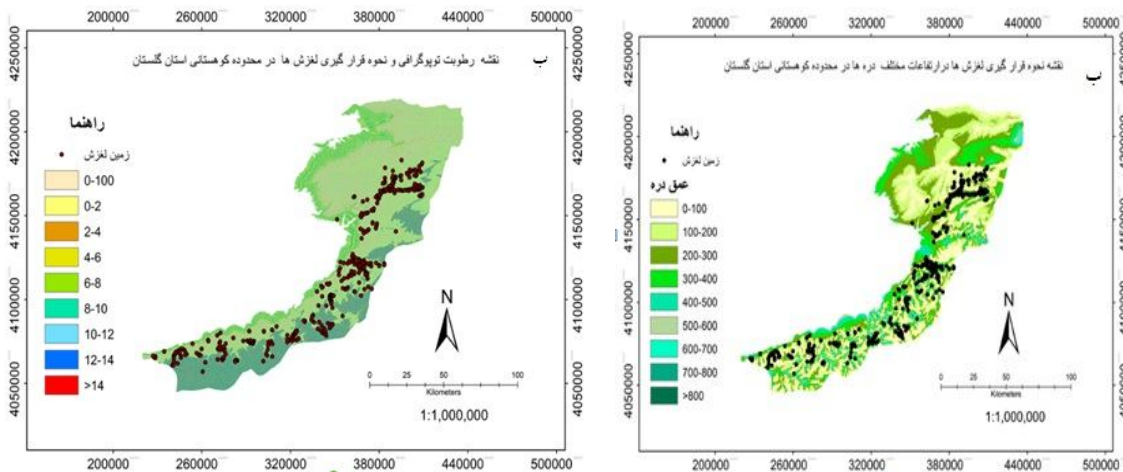
$$\text{رابطه (۱۲)} \quad TWI = LN \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right)$$

که در آن A_s مساحت حوضه آبخیز و B گرادیان شیب بر حسب درجه است. این شاخص برای پژوهش حساسیت زمین لغزش استفاده می شود (Gorum et al., 2008: 338). از شاخص رطوبت توپوگرافی می توان

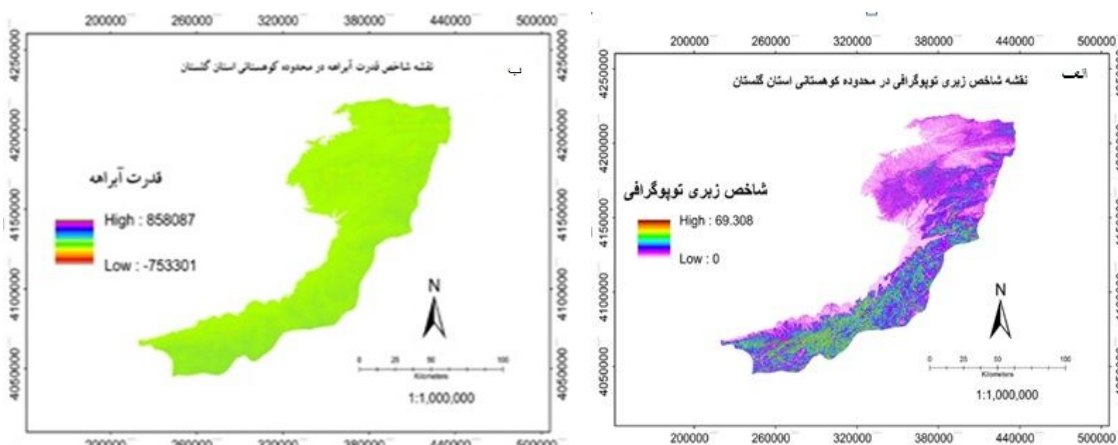
که در آن P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل است (Milena et al, 2016: 8).

دارای بالا آمدگی زیاد مقدار شاخص بالایی را نشان می‌دهند.

$$TRI = \sqrt{\sum_{P=1}^8 ZMd} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$



شکل ۶: الف) نقشه شاخص VP (ب) نقشه شاخص TWI و پراکندگی لغزش‌ها در محدوده مورد مطالعه



شکل ۷: الف) نقشه شاخص TRI (ب) نقشه شاخص SPI در محدوده مورد مطالعه

(مناطق با کاهش ظرفیت جریان) رسوب ویژه را پیش‌بینی می‌کند که در آن AS مساحت حوضه آبخیز و B گرادیان شیب برحسب درجه است.

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

مدل‌سازی و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش: بعد از تهیه نقشه‌های موردنیاز باید نقاطی از زمین لغزش‌ها تهیه شود و این نقاط بر اساس الگوریتم LSSVM_ABC آموزش داده شوند. در این مرحله تمام نقاطی که پدیده لغزش در آن رخ داده را از

شاخص قدرت آبراهه (SPI)^۱: مور و همکاران (۱۹۹۱: ۱۳) معادله (۱۴) را برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه (SPI) پیشنهاد کردند که در این معادله اندازه قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد. به‌طورکلی این شاخص در نواحی که نیمرخ و مماسی محدب دارند (مناطق همگرا و تند) فرسایش ویژه و در نواحی که نیمرخ مقعر دارند

1. Stream Power Index

نظارت است، باید یک مجموعه داده آموزش با عامل های ورودی و متناظر با برچسب های مربوط به کلاس مورد نظر ارائه شود. بر اساس مجموعه داده های آموزشی، LSSVM داده های ورودی را از فضای ورودی اصلی به یک فضای با ویژگی ابعاد بالا با استفاده از تابع هسته مرکزی RBF می نگارد (نقشه می کند) بر این اساس، الگوریتم یک شبه صفحه ایجاد می کند که می تواند داده های ورودی عامل های مؤثر را به دو منطقه تصمیم متمایز جدا کند: منطقه "رانش یافته" ($Y=1$) و "بدون رانش" ($Y=0$). هنگامی که فرآیند آموزش کامل می شود، LSSVM حاصل شده برای طبقه بندی الگوهای ورودی به کار می رود.

۴- بهینه سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی: ABC جمعیت موجود زنبورهای مصنوعی را از طریق مراحل زنبورهای کارگر، زنبور نگهبان و زنبور بازرس در هر تکرار جستجو مدیریت می کند. براساس این مراحل، زنبورهای مصنوعی هدایت می شوند تا راه حل های بهتری را به عنوان منابع غذایی نشان دهند. با ارزیابی تناسب هر راه حل، الگوریتم به تدریج فضای راه حل را بررسی می کند و به دنبال مطلوب ترین مجموعه از پارامترهای مدل می رود.

۵- ارزیابی تناسب داشتن: از آنجا که عملکرد مدل به تنهایی در فرایند آموزش ممکن است برای نشان دادن یک مدل خوب به دلیل مشکل برازش بیش از حد کافی نباشد؛ لازم به ذکر است که یک مدل بیش از حد متناسب به جای تعمیم آن، نقشه برداری ورودی خروجی ارائه شده در مجموعه داده های آموزشی را حفظ می کند. در نتیجه آن، مدل ممکن است مجموعه آموزشی را بسیار خوب طبقه بندی کند، اما الگوهای ورودی جدید که در مجموعه آموزشی وجود ندارد را ضعیف پیش بینی کند؛ بنابراین برای ساختن یک مدل طبقه بندی مطلوب در این پژوهش، روش پنج مرحله ای اعتبار سنجی مورد استفاده قرار می گیرد. با استفاده از این رویکرد، مجموعه داده های آموزشی

حالت نقطه ای به رستر تبدیل کرده و تعداد ۲۰۰۰ پیکسل از مناطق لغزشی ۲۰۰۰ پیکسل از مناطقی که لغزش در آن رخ نداده است تهیه کرده و ۷۵ درصد داده ها را برای آموزش LSSVM_ABC و ۲۵ درصد باقی مانده را برای آزمون و صحت سنجی در نظر گرفته می شود. برای شروع کار ابتدا LSSVM را به صورت خام اجرا کرده تا پارامترهای مورد نیاز خود را به دست آورده و سپس کلیه پارامترها را در این مرحله در محیط LSSVM وارد و به صورت جداگانه لایه های پهنه بندی به دست می آیند. در مرحله دوم لایه ها و پهنه های تهیه شده در مرحله قبل را وارد شبکه داخلی LSSVM_ABC کرده و بهترین لایه و باندهای بهینه را انتخاب کرده و در مرحله آخر تنها باند و لایه های مناسب تهیه شده در مرحله دوم را در محیط LSSVM وارد کرده و در نهایت فهرستی از مستعدترین شرایط برای خطر لغزش با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده به دست می آید.

۱- داده های ورودی: مجموعه داده های مربوط به سوابق زمین لغزش که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، شامل ۲۰۰۰ پیکسل لغزشی است. برای این منظور، ویژگی های ۱۲ عامل تأثیرگذار از کلاس های طبقه بندی به مقادیر پیوسته در محدوده (۰/۹۹-۰/۰۱) تبدیل شدند (Tien Bui et al., 2015: 450). متذکر می شود که نقاط رانش یافته و نقاط بدون رانش به ترتیب با "۱" و "۰" نشان می شوند.

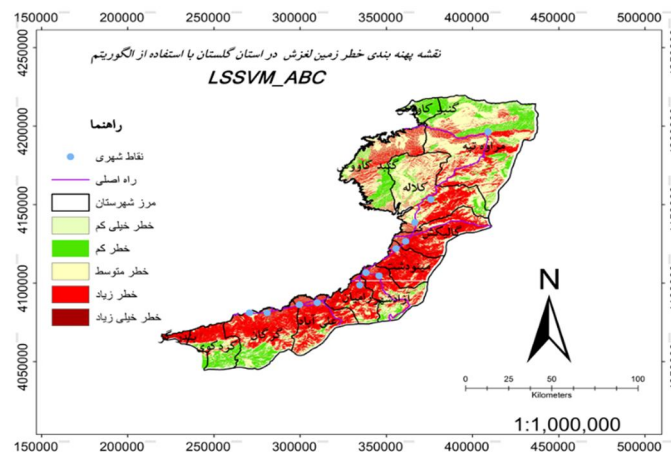
۲- مقدار اولیه پارامتر: همان طور که در بالا ذکر شد، فاز آموزش LSSVM تحت تأثیر پارامتر تنظیم (۷) و پارامتر تابع هسته مرکزی (σ) قرار می گیرد؛ بنابراین، در مدل پیش بینی لغزش پیشنهادی، الگوریتم ABC برای جستجوی پارامترهای مطلوب مورد استفاده قرار می گیرد. در اولین تکرار جستجو، این دو پارامتر به طور تصادفی در کران های پایین و بالا با استفاده از رابطه ۴ تولید می شوند.

۳- مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان: از آنجایی که LSSVM یک روش یادگیری تحت

جایی که AUC_{TR}^i و AUC_{VA}^i به ترتیب مقادیر AUC محاسبه شده از عملکرد دسته کننده در مراحل آموزش و اعتبارسنجی است. مدل نهایی و محاسبه شاخص حساسیت به رانش (لغزش): فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر ABC زمانی پایان می‌یابد که تکرار فعلی بیش از حداکثر تعداد تولیدات باشد. بر این اساس، LSSVM - ABC مطلوب‌ترین مدل طبقه‌بندی را همراه با مجموعه‌ای بهینه‌شده از پارامترهای تنظیم (γ و δ) شناسایی کرده است. در نقشه پهنه‌بندی نهایی لغزش ۰/۶۹، ۲۸/۱، ۶۲/۹۳ و ۸/۲۷ درصد از مساحت استان به ترتیب در کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نسبت به خطر زمین لغزش قرار دارد.

به پنج داده متقابل منحصربه‌فرد تقسیم می‌شوند. در هر اجرا، برای ساخت دسته‌کننده LSSVM، از چهارپنجم از داده‌های موجود استفاده می‌شود؛ در ضمن، یک پنجم از داده‌ها به عنوان یک مجموعه اعتبارسنجی برای تأیید عملکرد مدل ذخیره می‌شود. قابلیت پیش‌بینی از طریق نتیجه میانگین فرآیند اعتبارسنجی متقابل ارزیابی می‌شود. از آنجا که هدف به حداکثر رساندن AUC محاسبه شده از نتایج پیش‌بینی مدل است، در این پژوهش از تابع برازش زیر استفاده می‌شود:

$$f_{fitness} = \sum_{i=1}^5 \frac{5}{AUC_{TR}^i} + \sum_{i=1}^5 \frac{5}{AUC_{VA}^i} \quad (15)$$



شکل ۸: نقشه نهایی پهنه‌بندی لغزش به وسیله الگوریتم LSSVM_ABC

عملکرد مدل و اعتبارسنجی آن بر اساس داده‌های تعلیمی و داده‌های صحت‌سنجی: ارزیابی عملکرد الگوریتم LSSVM_ABC جهت پیش‌بینی حساسیت زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی توسط معیار صحت کلی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱: تحلیل خطر استان گلستان نسبت به مخاطره زمین لغزش با استفاده از مدل LSSVM_ABC

در صد مساحتی	پهنه خطر
صفر	خطر خیلی کم
۰/۶۹	خطر کم
۲۸/۱	خطر متوسط
۶۲/۹۳	خطر زیاد
۸/۲۷	خطر خیلی زیاد

جدول ۲: ماتریس خطای تولید شده به وسیله الگوریتم LSSVM_ABC

		نقاط زمین لغزش	نقاط فاقد زمین لغزش	دقت کلی %
داده‌های تعلیمی	نقاط زمین لغزش	۱۲۶۵	۲۸۵	۸۶/۲۶
	نقاط فاقد زمین لغزش	۲۳۵	۱۳۲۳	
داده‌های اعتباری	نقاط زمین لغزش	۳۶۷	۱۲۳	۸۲/۳
	نقاط فاقد زمین لغزش	۴۴	۴۵۶	

به کاررفته نشان داد که عامل شیب، بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش منطقه مطالعاتی داشته است. بررسی پراکندگی لغزش‌ها در شیب‌های مختلف نشان داد که تقریباً ۹۴ درصد زمین لغزش‌های استان در شیب‌های بین ۰ تا ۳۰ درجه واقع شده‌اند و در شیب‌های بالای ۵۰ درصد در منطقه، زمین لغزش به ندرت مشاهده می‌گردد. این نتیجه با نتایج شیرانی و عرب عامری (۱۳۹۴: ۳۳۱) مبنی بر این که درجه شیب کمتر از ۳۰ درجه به عنوان اثرگذارترین عامل می‌باشد مطابقت دارد. از آنجایی که زمین لغزش در شیب‌های کمتر به دلیل برتری نیروهای مقاومت برشی نسبت به تنش برشی کمتر (شیرزادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۴۴) و در شیب‌های خیلی زیاد هم به دلیل عدم توسعه و وجود خاک با ضخامت قابل ملاحظه کمتر به وقوع می‌پیوندد. با این حال شاید وقوع لغزش در شیب‌های خیلی پایین با نزدیکی دامنه‌های کم شیب به مسیر آبراهه‌ها در نتیجه کاهش مقاومت برشی قابل توجیه باشد. همچنین حدود ۵۶ درصد از زمین لغزش‌ها در جهت‌های شمال، شمال غرب و غرب رخ داده‌اند. از آنجاییکه در نیمکره شمالی شیب‌های غربی و شمالی به دلیل دریافت تابش کمتر دارای رطوبت بیشتر و مقاومت برشی خاک کمتر هستند و در نتیجه احتمال وقوع لغزش بالا می‌رود (شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴: ۳۳۱). بیشتر لغزش‌ها (۷۰ درصد) در ارتفاعات ۲۸-۱۰۰۰ متری ناحیه کوهستانی استان قرار دارند به طوری که در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر زمین لغزش کمتر مشاهده می‌گردد که می‌تواند به علت وجود شیب زیادتر، عدم وجود خاک ضخیم در نتیجه تبدیل لغزش به افتان‌های سنگی باشد. از طرفی قریب به ۷۴ درصد لغزش‌ها در عمق ۰ تا ۳۰۰ متری دره‌ها مشاهده می‌گردند که مطابق با پژوهش شیرزادی و همکاران (۱۳۹۶: ۲۲۵-۲۴۶) بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در انتهای دامنه (پاشنه دامنه) جایی که دامنه نزدیک به محل اتصال آبراهه‌ها می‌گردد، اتفاق می‌افتد. شاید دلیل این امر حرکت آب‌های زیرسطحی از طرف آبراهه‌ها به سمت دامنه‌های اطراف و ایجاد یک جبهه رطوبتی و کاهش مقاومت برشی خاک در این ناحیه باشد که وقوع

با توجه به نتایج به دست آمده و استفاده از بهترین فاکتورهای مؤثر، الگوریتم LSSVM_ABC برای مجموعه داده‌های تعلیمی و اعتبارسنجی ساخته شد. نتایج نشانگر آن است که این معیار برای داده‌های تعلیمی و اعتباری به ترتیب ۸۶/۲۶ و ۸۲/۳ درصد است.

نتیجه‌گیری

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های موجود در یک منطقه و پهنه‌بندی خطر آن یکی از فاکتورهای اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینه مؤثر است. ارزیابی حساسیت زمین لغزش یک فرایند پیچیده و چندمرحله‌ای است که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. تا به امروز روش‌های مختلفی جهت برآورد حساسیت زمین لغزش‌ها و عملکرد آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مختلف آماری مطرح شده است. در این پژوهش روش LSSVM_ABC جهت ارزیابی حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش با استفاده از ۱۲ فاکتور شامل شیب، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع، انحنای سطح زمین (انحنای شیب)، فاصله از گسل، کاربری اراضی، لیتولوژی، بافت خاک، عمق دره، شاخص توان آبراهه، شاخص سختی زمین، شاخص میزان رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که استان گلستان با توجه به سازندها و شرایط خاص زمین‌شناسی (وجود سازندهای حساس به لغزش)، توپوگرافی و فعال بودن گسل‌های منطقه و بارش فراوان و دامنه‌های ناپایدار و فعالیت فرآیندهای ژئومورفولوژیکی متعدد از جمله مناطق زمین لغزش خیز کشور است. عوامل انسانی نیز در تشدید ناپایداری‌ها و حرکات توده‌ای به‌ویژه در نامتعادل کردن دامنه‌ها از طریق جاده‌سازی و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه نقش دارند. بررسی نتایج مهم‌ترین عوامل اثرگذار از میان ۱۲ عامل مؤثر شناخته شده بر وقوع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه براساس مدل LSSVM_ABC و مشاهده نقشه حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم

منابع

۱. بروغنی، مهدی. سیما پورهایمی و محمد علی زنگنه اسدی. ۱۳۹۷. ارزیابی خطر و خسارت زمین لغزش در حوضه آبخیز بقیع به روش فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک. مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال هشتم، شماره ۲۹، صص ۱-۱۸.
 ۲. بهشتی‌راد، مسعود. سادات فیض نیا و علی سلاجقه و علی احمدی. ۱۳۸۸. بررسی کارایی مدل پهنه‌بندی خطر زمین لغزش فاکتور اطمینان (CF) مطالعه موردی حوزه آبخیز معلم کلایه. فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دوم، شماره ۵، صص ۱۹-۲۸.
 ۳. پورقاسمی، حمیدرضا. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه. نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره نهم، صص ۸۰-۶۹.
 ۴. حسین‌زاده، محمدمهدی. محمدرضا ثروتی و عادل منصور و بابک میرباقری و سعید خضری. ۱۳۸۸. پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای توسط از مدل رگرسیون لجستیک مسیر سنندج - دهگلان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شماره ۱۱، صص ۲۷-۳۷.
 ۵. راکعی، بابک. ماشاله خامه چیان و پرویز عبدالملکی و پانته آ گیاهچی. ۱۳۸۶. مجله علوم دانشگاه تهران. کاربرد سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پهنه بندی خطر زمین لغزش، مطالعه موردی: ناحیه سفیدارگله در استان سمنان. جلد ۳۳، شماره ۱، صص ۵۷-۶۴.
 ۶. رنجبر، محسن. عسل فلک. ۱۳۹۳. بررسی و تحلیل مدل‌های AHP و شبکه عصبی مصنوعی در پهنه بندی خطر زمین لغزش دامنه‌های جنوبی البرز (منطقه تجریش تهران). فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال ۱۱، شماره ۴۳، صص ۸۵-۹۷.
 ۷. روستایی، شهریور. محسن احدنژاد روشنی و مینا فرخی صومعه. ۱۳۹۳. سنجش فضایی گستردگی شهری با تأکید بر تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، مطالعه موردی: ارومیه. سال ۱۸، شماره ۵۰، صص ۱۸۹-۲۰۶.
 ۸. سیفی، اکرم. سید مجید میرلطیفی و حسین رباحی. ۱۳۹۲. معرفی و کاربرد ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات در برآورد تخییر- تعرق مرجع و تحلیل عدم زمین لغزش‌های سطحی با عمق کمتر را فراهم آورده است. کاربری‌های مختلف می‌توانند تاثیر به سزایی در ایجاد لغزش داشته باشند که در این پژوهش جنگل با تاج پوشش انبوه نسبت به سایر کاربری‌ها درصد بیشتری از لغزش را در خود جا داده است که کوهستانی بودن منطقه، بارش فراوان و عدم تبخیر سطحی زیاد می‌تواند شرایط خوبی برای این امر مهیا نماید. در نهایت جهت اعتبارسنجی مدل از مجموع ۲۰۰۰ پیکسل لغزشی منطقه مطالعاتی ۷۵٪ به طور تصادفی جهت مدل‌سازی و باقی‌مانده ۲۵٪ جهت اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت؛ نتایج به دست آمده از نقشه خروجی در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد مناطق نزدیک به آبراهه امکان لغزش پذیری بیشتری داشته و بر اساس الگوریتم LSSVM-ABC، عامل شیب بیشترین تاثیر را در وقوع این مخاطره دارند. هم‌چنین بر اساس این نقشه خروجی حدوداً ۶۳ درصد از زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه مطالعاتی در کلاس خطر زیاد رخ داده است که بیشتر قسمت‌های جنوبی استان را در بر می‌گیرد و نشان‌دهنده حساسیت منطقه مورد مطالعه به وقوع پدیده زمین لغزش است.
- بر این اساس، مقادیر به دست آمده در الگوریتم LSSVM-ABC هم در داده‌های تعلیمی و هم در داده‌های آموزشی بیانگر این مطلب است که مدل ذکر شده از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفته است. در نهایت منطقه مطالعاتی به پنج کلاس حساسیت بسیار زیاد، زیاد، متوسط، خیلی کم و کم طبقه‌بندی شد که ارزیابی تمامی نتایج نشان‌دهنده عملکرد بالا و ظرفیت پیش‌بینی خوب الگوریتم LSSVM-ABC در شناسایی پهنه‌ها با پتانسیل بالای لغزشی است که می‌تواند جهت انتخاب مکان مناسب، کاهش خطرات و خسارات زمین لغزش، برنامه‌ریزی‌های کاربری اراضی، مدیریت و تصمیم‌گیری بهتر در استان گلستان مورد استفاده قرار گیرد.

۱۷. کرم، امیر، مریم تورانی. ۱۳۹۲. پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع لغزش با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مطالعه موردی: محور هراز از رودهن تا رینه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم شماره ۲۸، صص ۱۷۷-۱۹۰.
۱۸. مددی، عقیل. عطا غفاری گیلانده، الناز پیروزی. ۱۳۹۴. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر لغزش با استفاده از مدل VIKOR، مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق لاقان چای. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۴، صص ۱۲۴-۱۴۱.
۱۹. مطالعات آمایش استان گلستان، ۱۳۹۴.
۲۰. مقیمی، ابراهیم، سعید نگهبان. ۱۳۹۱. بررسی فرسایش در حوضه آبخیز رودخانه‌ی شورفدامی (استان فارس) با استفاده از مدل آنتروپی. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، سال ۴۴، شماره ۳، صص ۱-۱۶.
۲۱. ملکی، امجد، بهزاد میلادی. ۱۳۹۱. شبیه سازی مناطق مستعد خندق زایی با استفاده از روش SPI در حوضه رودخانه مرگ. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صص ۳۸-۲۳.
۲۲. نصر آزادانی و همکاران، ۱۳۹۲. ارزیابی مدل‌های پهنه بندی آماری دو متغیره زمین لغزش، با استفاده از GIS در حوضه آبخیز علیا، مجله مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۶۵-۸۰.
۲۳. یمانی، مجتبی. علی احمدآبادی و غلامرضا زارع. ۱۳۹۱. به کار گیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش، مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۳، صص ۱۲۵-۱۴۲.
24. Ballabio, C. and Sterlacchini, S. 2012. Support Vector Machines for Landslide Susceptibility Mapping: The Staffora River Basin Case Study. Italy, Math Geosci, 44: 47-70.
25. Bouzardoum, Mellit, M.A. and Pavan, A.M. 2013. A hybrid model (SARIMA-SVM) for short-term power forecasting of a small-scale grid-connected photovoltaic plant. Solar Energy, 98: 226-235.
26. Cevik, E. and Topal, T. 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas
- قطعی نتایج؛ مطالعه موردی شهر کرمان. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال چهارم، شماره ۱۳: ۶۷-۷۹.
۹. شریعت جعفری، محسن. ۱۳۷۵. شناسایی آب‌های زیر زمینی با استفاده از دستگاه Dowsing Rod به‌منظور توسعه پایدار شهری. کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، دوره ۳۴.
۱۰. شمسی‌پور، علی اکبر. هیمن شهابی، ممد سالاری و محمد عباسی. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی. نشریه محیط جغرافیایی شماره ۱.
۱۱. شیرانی، کورش. علیرضا عرب عامری. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک، مطالعه موردی: حوضه دز علی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. سال نوزدهم، شماره ۷۲، صص ۳۲۱-۳۳۴.
۱۲. شیرانی، کورش. فرزاد حیدری و علیرضا عرب عامری. ۱۳۹۶. مقایسه روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره در پهنه بندی خطر زمین لغزش، مطالعه موردی: حوضه ونک، استان اصفهان. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد نه، شماره ۴، صص ۴۵۱-۴۶۴.
۱۳. شیرزادی، عطاله. کریم سلیمانی، محمود حبیب نژاد، عطاله کاویان و کامران چپی. ۱۳۹۶. معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا به‌منظور پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار. جغرافیا و توسعه، شماره ۴۶، صفحات ۲۴۶-۲۲۵.
۱۴. صفاری، امیر. معصومه‌هاشمی. ۱۳۹۵. پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل‌های آنتروپی و منطق فازی (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). فصلنامه جغرافیای طبیعی. سال نهم، شماره ۳۴، صص ۴۳-۶۲.
۱۵. عابدینی، موسی. بهاره قاسمیان. ۱۳۹۴. پهنه بندی خطر زمین‌لغزش در شهرستان بیجار به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۱۹، شماره ۵۲، ۲۰۵-۲۲۷.
۱۶. غلامی کلاته، غلامرضا. پرویز کردوانی و محسن رنجبر. ۱۳۹۹. پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز اوغان استان گلستان با استفاده از مدل فازی. مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال دهم، شماره ۳۶، صص ۱-۱۴.

36. Kavzoglu, T., Sahin, E.K. and Colkesen, I. 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11 (3): 425e439.
37. Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *GSA Bulletin*, 95(4): 406-421.
38. Lin, Y., Chu, H.J., and Wu, C.F. 2010. Spatial pattern analysis of landslide using landscape metrics and logistic regression: a case study in Central Taiwan, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss* 7: 3423-3451.
39. Milena, R., Migon, P. and Michniewicz, A. 2016. Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland.
40. Moore, I.D., Grayson R, and Ladson A. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol Process* 5:3-30.
41. Shah, R.S. 2007. Support vector machines for classification and regression. Degree of Master of Science. McGill University.
42. Suykens, J.A.K., Van Gestel, T., De Brabanter, J., De Moor, B. and Vandewalle, J. 2002. Least Squares Support Vector Machines, World Scientific, In press.
43. Suzen, M.L., and Doyuran, V. 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu Catchment, Turkey. *Engineering Geology* 71: 303-321.
44. Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., and Revhaug, I. 2015. spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Journal of International Consortium on Landslide*.
45. Tien Bui, D., Tuan, T.A., Hoang, N.D., Thanh, N.Q., Nguyen, D.B., Liem, N.V. and Pradhan, B. 2016. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao pipeline, Hendek (Turkey). 44(8): 949-962.
27. Cheng, M-Y, and Hoang, N-D .2015. Typhoon-induced slope collapse assessment using a novel bee colony optimized support vector classifier. *Nat Hazards* 78:1961-1978.
28. Cruden D.M. and Varnes D.J. 1996. Landslide types and processes, Special Report, Transportation Research Board. National Academy of Sciences 247: 36-75.
29. Dai, F.C., and Lee, C.F. 2001. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal* 38: 911-923.
30. Dai, F.C., and Lee, C.F. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42: 213-228.
31. Dehnavi A, Aghdam I.N., Pradhan B., and Morshed Varzandeh M.H. 2015. A new hybrid model use stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuz inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran *Catena* 135:122-148.
32. Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., and Nefeslioglu, H.A. 2008. Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards* 46: 323-351.
33. Grabs, T., Seibert, J., and Laudon, H. 2007: Modelling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a distributed model. *Geophysical Research Abstracts* 9 SRef-ID: 1607-7962 /gra/EGU 2007-A-00894.
34. Guzzetti, F. et al. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study. *Central Italy*, 31(1): 181-216.
35. Karaboga, D., Gorkemli, B, Ozturk C, Karaboga N .2014. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artif Intell Rev* 42: 21-57.

- on natural slopes of Hong Kong. China. *Geomorphology* 101: 572-582.
48. Yesilnacar, E., Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study. Hendek region (Turkey). *Engineering Geology* 79: 251-266.
49. Zhu, L. and Jing-Feng, H. 2006. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 7 (12): 2007-2017.
- Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 14: 447-458.
46. Van Westen, C.J., Castellanos, E. and Kuriakose, S.L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment an overview. *Engineering Geology* 102: 112-131.
47. Yao, X., Tham, L.G., and Dai, F.C. 2008. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: a case study