

بررسی مقایسه‌ای مدل‌های ماشین پشتیبان بردار و لجستیک درختی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش - مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان

بهاره قاسمیان

دانشجوی دکتری گروه جغرافیا (ژئو مورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

موسی عابدینی*

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی (ژئو مورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

شهرام روستایی

استاد گروه جغرافیا (ژئو مورفولوژی)، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

عطا... شیرزادی

دکترای مرتع و آبخیزداری، کارشناس آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۷

چکیده

اولین گام مهم و اساسی در ارزیابی خطر زمین لغزش تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش است، این نقشه‌ها به عنوان یک محصول نهایی است که می‌تواند برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی مفید واقع شود. هدف اصلی این پژوهش مقایسه کارایی مدل‌های داده‌کاوی ماشین پشتیبان بردار و لجستیک درختی به منظور پیش‌بینی مکانی زمین لغزش‌های سطحی اطراف شهر کامیاران واقع در استان کردستان است. در ابتدا، نقشه پراکنش زمین لغزش با ۶۰ نقطه لغزشی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از منابع مختلف ساخته شد. سپس، آن‌ها به صورت تصادفی به یک نسبت ۷۰ به ۳۰ به ترتیب برای آموزش مدل زمین لغزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند. از میان بیست و یک عامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه، حدود هشت متغیر (فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، شاخص قدرت حمل جریان، بارندگی، عمق دره، شاخص نمناکی توپوگرافی، شدت تابش خورشیدی و انحنای طولی شیب) بر اساس شاخص IGR مؤثر شناخته شدند. عملکرد مدل‌ها با استفاده از چندین پارامتر آماری از جمله حساسیت، شفافیت، صحت، مجذور مربع‌ها خطا، منحنی نرخ موفقیت و سطح زیر این منحنی مورد ارزیابی قرار گرفت. اعتبارسنجی نتایج مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نشان داد که مدل SVM با سطح زیر منحنی ۰/۹۷ از قابلیت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل LMT با سطح زیر منحنی ۰/۷۳۷ برخوردار است. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزی کاربری ارضی، کاهش خطرات زمین لغزش و مدیریت اصولی مناطق مستعد لغزشی مفید واقع گردد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، ماشین پشتیبان بردار، مدل لجستیک درختی، کامیاران.

مقدمه

درک مکانیسم زمین لغزش و پهنه‌بندی مناطق مستعد به خطر وقوع زمین لغزش برای برنامه‌ریزی‌های کاربری زمین ضروری است و ممکن است به‌عنوان یک ابزار استاندارد برای حمایت از تصمیم‌گیری‌ها در مناطق مختلف در نظر گرفته شود (تین‌بای^۱ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱). زمین لغزش یک حرکت توده‌ای از مواد تشکیل‌دهنده دامنه می‌باشد، این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی بر روی دامنه بیشتر از مقاومت برشی مصالح و مواد شیب دامنه باشد (کرودن^۲، ۱۹۹۱: ۲۷). بر اساس مطالعات انجام شده توسط شبکه موضوعی ژئو تکنیکی اروپا زمین لغزش به‌تنهایی ۱۷٪ از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است و میزان مرگ‌ومیر ناشی از این پدیده در طی سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۴ به ترتیب در آسیا ۲۹٪، آمریکا ۳۹٪، آفریقا ۱٪ و اقیانوسیه ۱٪ می‌باشد (کوهورست^۳ و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۷۳). در مناطق تکنونیک فعال، ناپایداری دامنه‌ها به‌صورت انواع اشکال زمین لغزش، جریانات واریزه‌ای، ریزش، گسیختگی‌های دامنه‌ای خزش و غیره، مشاهده می‌شود. اغلب زمین لغزش‌های بزرگ و فاجعه‌آمیز در مقیاس جهانی در مناطق کوهستانی و کمربند‌های زلزله‌خیز که دارای گسل‌های فعال هستند، رخ داده است (عابدینی، ۱۳۹۵: ۵۱). بر اساس برآوردهای اولیه در ایران نیز سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق وقوع زمین لغزش وارد می‌شود (حسین زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۳۱). با این حال، اگرچه مکانیسم زمین لغزش‌ها در سطح وسیعی توسط زمین‌شناسان و ژئومرفولوژیست‌های داخلی و خارجی با استفاده از روش‌های کمی از جمله رگرسیون لجستیک^۴ (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۵؛ تسانگاراتوس و ایلیا، ۲۰۱۵؛ عابدینی^۵ و همکاران، ۲۰۱۵)، روش آماری دو متغیره^۶ تصمیم‌گیری (فتح‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ جی‌وانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۵)، روش آماری چند متغیره^۸ (دولت‌خواهی و همکاران، ۱۳۹۶؛ نسبت فراوانی^۹ (صفاری و همکاران، ۱۳۹۴؛ شهابی^{۱۰}، ۲۰۱۴)، وزن دهی شواهد^{۱۱} (محمد نیا و همکاران، ۱۳۹۵؛ کاوازوگلو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۵)، مدل تنوری بیزین^{۱۳} (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ تای فام و همکاران، ۲۰۱۵؛ شیرزادی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۷)، مدل منطق فازی (بهاروند و سوری، ۱۳۹۴؛ صفاری و هاشمی، ۱۳۹۵؛ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با این حال، نیاز ضروری به استفاده از مدل‌ها و تکنیک‌هایی برای افزایش صحت پیش‌بینی زمین لغزش‌ها در مقیاس منطقه‌ای وجود دارد. لذا این مدل‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است که از نوین‌ترین و

-
1. Tien Bui
 2. Cruden
 3. Koehorst
 4. Logistic Regression
 5. Tsangaratos & Ilia
 6. Abedini
 7. Bivariate statistics
 8. Jie Wang
 9. Multivariate Regression
 10. Frequency Ratio
 11. Shahabi
 12. Weight of Evidence (WoE)
 13. Kavzoglu
 14. Naïve Bayes
 15. Shirzadi

دقیق ترین آن‌ها می‌توان به مدل‌های ماشین پشتیبان بردار^{۱۶} و مدل لجستیک درختی^{۱۷} اشاره کرد. در زمینه کاربرد این مدل‌ها در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش‌ها مطالعاتی صورت گرفته است که برخی از این مطالعات عبارت‌اند از: یمانی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از ماشین پشتیبان بردار اقدام به ارزیابی حساسیت در حوضه آبریز درکه کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد در بین توابع اجرا شده از مدل ماشین پشتیبان بردار، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین عملکرد و تابع خطی از نظر عملکرد، پایین‌ترین دقت را داشته است.

در پژوهشی دیگر تیان‌بای^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ماشین پشتیبان بردار، لجستیک درختی، شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۹} (پرسپترون چندلایه^{۲۰}، تابع پایه شعاعی^{۲۱}) و رگرسیون لجستیک هسته‌ای^{۲۲} در کشور ویتنام پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر مزیت مدل‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی است.

اگر چه مدل‌ها و روش‌های زیادی در دنیا برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌ها به کار گرفته شده‌اند. با این حال، نیاز ضروری به استفاده از روش و تکنیک‌هایی جدید برای افزایش صحت پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در مقیاس منطقه‌ای وجود دارد؛ بنابراین، مهم‌ترین اهدافی که در این پژوهش دنبال می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱- انتخاب فاکتورهای مهم‌تر و مؤثرتر در وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی؛ ۲- ارائه مدل داده‌کاوی لجستیک درختی و ماشین پشتیبان بردار جهت رسیدن به یک تخمین معقول و دقیق از پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر کامیاران در استان کردستان ۳- مقایسه کارایی مدل‌ها و انتخاب مناسب‌ترین روش برای تهیه نقشه ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش.

موقعیت جغرافیایی و خصوصیات فیزیکی، زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی بخشی از شهرستان کامیاران، واقع در بخش شرقی استان کردستان، در طول جغرافیایی $30^{\circ} 47' 46''$ تا $00^{\circ} 00' 47''$ شرقی و عرض جغرافیایی $34^{\circ} 30' 58''$ تا $34^{\circ} 47' 00''$ شمالی با مساحتی در حدود $516/44$ کیلومتر مربع جای گرفته است (شکل ۱). از نظر توپوگرافی و فیزیکی، حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع از سطح دریا به ترتیب 2841 ، 1757 و 1388 متر با اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه حدود 1453 متر است. از نظر زمین‌شناسی در هشت گروه شامل گروه ۱- دوره کواترنر (دوران سنوزوئیک)؛ گروه ۲- اواخر کرتاسه - اوائل پالئوسن (دوران مزوزوئیک - سنوزوئیک)؛ گروه ۳- اواخر ائوسن - اوائل الیگوسن (دوران سنوزوئیک)؛ گروه ۴- پالئوسن - ائوسن (دوران سنوزوئیک)؛ گروه ۵- اواخر کرتاسه - پالئوسن (دوران مزوزوئیک - سنوزوئیک)؛ گروه ۶- اواخر الیگوسن - میوسن (دوران

16. support vector machines (SVM)

17. logistic model trees (LMT)

18. Tien Bui

19. artificial neural networks (ANN)

20. multi-layer perceptron (MLP)

21. radial basis function (RBF)

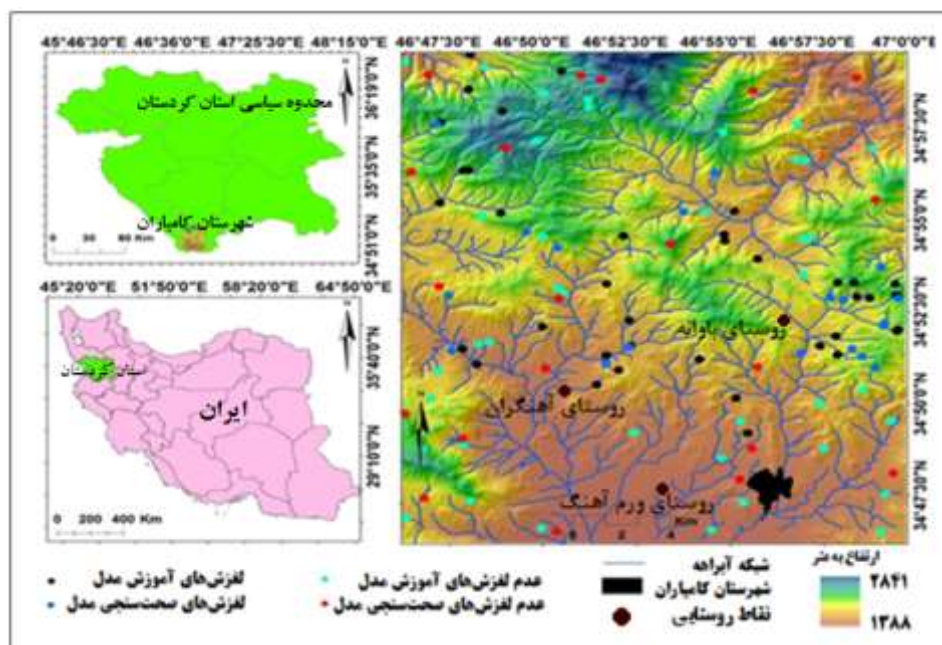
22. kernel logistic regression (KLR)

سنوزوئیک؛ گروه ۷- دوره کرتاسه (دوران مزوزوئیک)؛ گروه ۸- ژوراسیک - کرتاسه (دوران مزوزوئیک) با فراوانی رسوب‌های آبرفتی، سنگ آهک، شن با تناوبی از شیل، فلیش، ماسه سنگ و کنگلومرا می‌باشد، به طوری که حدود ۷۰٪ از لغزش‌های منطقه در این سازندها رخ داده است. همچنین پیمایش صحرایی نشان داد که نوع لغزش چرخشی (۵۴/۶۱٪) و مرکب (۳۱/۵۳٪) به ترتیب بیشترین نوع لغزش‌های منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده‌اند. حداکثر طول زمین لغزش ۳۰۴۳ متر و حداقل طول ۵۵ متر است. همچنین حداکثر عرض زمین لغزش در منطقه مطالعاتی ۶۳۲۰ متر و حداقل عرض زمین لغزش منطقه ۸۷ متر می‌باشد (جدول ۱). مطابق با طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن ($D = ۲۳/۵۶$) اقلیم منطقه مدیترانه‌ای است. متوسط بارندگی منطقه مطالعاتی در طول دوره آماری ۲۰۰۰ - ۲۰۱۲، حدود ۵۶۰ میلی‌متر در سال و میانگین درجه حرارت سالانه منطقه ۱۳/۶۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات اصلی زمین لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری‌های آماری	معادل لاتین	طول زمین لغزش به متر	عرض زمین لغزش به متر
محدوده کل زمین لغزش‌ها	Total range of length	۵۵ ~ ۳۰۴۳	۶۳۲۰ ~ ۸۷
میانگین	Average	۴۵۲/۸۱	۷۰۲/۹۸
انحراف معیار	S.D	۴۰۵/۸۲	۸۲۶/۸۸
چولگی	Skewness	۳/۶۹۰	۳/۶۹۶
کشیدگی	kurtosis	۱۸/۸۵۹	۱۸/۷۵۱
میانه	Median	۳۴۴/۵	۴۵۶/۶
مد	Mode	۲۲۵	۵۰۰

مأخذ: نگارندگان



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

روش پژوهش مقاله حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی - تحلیلی است که در آن از روش‌های کتابخانه‌ای، بازدیدهای میدانی و مدل‌سازی استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح و داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی واقع در منطقه در طی دوره آماری سیزده ساله (۲۰۱۲ - ۲۰۰۰)، اقدام به تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه شد. جهت تعیین نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه، از آنجایی که تعیین دقیق محل وقوع لغزش‌ها و ایجاد یک پایگاه مکانی داده‌ای زمین‌لغزش جهت مطالعات آینده خطر و ریسک آن‌ها ضروری است، ابتدا اقدام به تشخیص پهنه‌های لغزشی و تعیین موقعیت مکانی آن‌ها بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth منطقه گردید. متعاقباً با انجام پیمایش صحرائی، موقعیت هر یک از پهنه‌های لغزشی توسط دستگاه GPS ثبت و اطلاعات به‌دست‌آمده در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تهیه شد. در مجموع ۶۰ نقطه به‌عنوان مناطق مستعد به زمین‌لغزش شناسایی و به دو دسته شامل ۷۰ درصد داده‌های آموزشی^{۲۳} برای تعلیم و اجرای مدل و ۳۰ درصد داده‌های آزمون^{۲۴} جهت صحت‌سنجی طبقه‌بندی شدند (شکل ۱). همچنین، تعداد ۶۰ مکان به‌عنوان مناطقی که زمین‌لغزش در آنجا اتفاق نیفتاده‌اند به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب و شبیه به مرحله مدل‌سازی و صحت‌سنجی به دو دسته ۷۰ و ۳۰ درصد طبقه‌بندی شدند. در مرحله بعد جهت انتخاب عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه، تقریباً اکثر متغیرهایی که در وقوع پدیده زمین‌لغزش دخالت دارند در پژوهش حاضر به‌عنوان متغیرهای مستقل اولیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سپس با موقعیت پهنه‌های لغزشی نقشه پراکنش ارتباط داده شده‌اند (جدول ۲). پس از شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه از طریق مرور منابع و بررسی ویژگی‌های مناطق لغزش یافته، لایه‌های اطلاعاتی شامل بیست‌ویک عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه شناخته شدند. بر این اساس، نقشه‌های درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب^{۲۵}، انحنای طولی شیب^{۲۶}، شدت تابش خورشید^{۲۷}، شاخص عمق دره^{۲۸}، شاخص قدرت جریان^{۲۹}، شاخص نمناکی توپوگرافی^{۳۰}، شاخص طول دامنه^{۳۱} از نقشه رقومی ارتفاع در محیط Arc GIS 10.2 ساخته شدند. نقشه کاربری ارضی و شاخص پوشش گیاهی^{۳۲} از تصویر ماهواره‌ای ETM⁺ منطقه مورد مطالعه سال ۲۰۰۵ در محیط نرم‌افزار ENVI 4.7، نقشه‌های لیتولوژی (جنس

23. Training

24. Testing

25. Profile curvature

26. Plan curvature

27. Solar radiation

28. Valley depth

29. Stream Power Index (SPI)

30. Topographic Wetness Index (TWI)

31. Length-Slope (LS)

32. Normalized difference vegetation index (NDVI)

سنگ‌شناسی)، فاصله از گسل و تراکم گسل از نقشه زمین‌شناسی شهرستان کامیاران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه بارندگی بر اساس رابطه رگرسیونی بین ارتفاع و میانگین بلند مدت سالیانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و خارج محدوده مورد مطالعه، نقشه‌های فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از شبکه جاده و تراکم جاده به ترتیب بر اساس فواصل از اطراف شبکه آبراهه‌ها و شبکه جاده منطقه مورد مطالعه تهیه شدند. در ادامه مقادیر کلاس‌های مختلف مربوط به هر یک از عوامل جهت تحلیل آماری داده‌ها و الگوریتم‌ها به نرم‌افزار SPSS و WEKA 3.7.12 وارد شد و نهایتاً نقشه‌های نهایی حساسیت وقوع پدیده زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از تلفیق لایه‌های مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها ترسیم گردید.

جدول ۲: عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی و طبقه‌بندی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه

ردیف	عوامل مؤثر	طبقه‌بندی
۱	درجه شیب	(۱) ۰-۸، (۲) ۸-۱۵، (۳) ۱۵-۲۵، (۴) ۲۵-۳۵، (۵) ۳۵-۴۵، (۶) ۴۵ >
۲	جهت شیب	(۱) مسطح (۲) شمال (۳) شمال‌شرق (۴) شرق (۵) جنوب‌شرق (۶) جنوب (۷) شمال‌غرب (۸) غرب (۹) جنوب‌غرب
۳	ارتفاع به متر	(۱) ۱۶۰۰-۱۴۰۰، (۲) ۱۸۰۰-۱۶۰۰، (۳) ۲۰۰۰-۱۸۰۰، (۴) ۲۲۰۰-۲۰۰۰، (۵) ۲۲۰۰ >
۴	انحنای شیب	(۱) بسیار مقعر [(-۷/۲) - (-۷/۶)] (۲) مقعر [(-۲/۴) - (-۷/۱)] (۳) مسطح [(-۲/۳) - (۰/۸)] (۴) محدب [(۵/۶) - (۰/۸۱)]
۵	انحنای عرضی شیب	(۱) [(-۱/۳) - (-۱/۵)] (۲) [(-۰/۳۱) - (-۱/۲)] (۳) [(-۰/۴۲) - (-۰/۳)] (۴) [(-۱/۵) - (۰/۴۳)] (۵) [(۱/۶) - (۱/۳)]
۶	انحنای طولی شیب	(۱) [(-۱/۸) - (-۱/۶)] (۲) [(-۰/۵۳) - (-۱/۷)] (۳) [(-۰/۲۸) - (-۰/۵۲)] (۴) [(-۱/۲) - (۰/۲۹)] (۵) [(-۱/۰) - (۱/۳)]
۷	تابش خورشید به کیلوات ساعت بر متر مربع	(۱) ۵۱۷/۰۰۰ - ۲۳۷/۰۰۰، (۲) ۶۰۳/۰۰۰ - ۱۱۸/۰۰۰، (۳) ۶۷۴/۰۰۰ - ۶۰۴/۰۰۰، (۴) ۷۳۴/۰۰۰ - ۶۷۵/۰۰۰، (۵) ۸۸۱/۰۰۰ - ۷۳۵/۰۰۰
۸	عمق دره به متر	(۱) ۵۰-۰، (۲) ۱۰۰-۵۰، (۳) ۱۵۰-۱۰۰، (۴) ۲۰۰-۱۵۰، (۵) ۲۰۰ >
۹	شاخص قدرت جریان	(۱) ۱۰۰-۰، (۲) ۵۰۰-۱۰۰، (۳) ۱۰۰۰-۵۰۰، (۴) ۱۵۰۰-۱۰۰۰، (۵) ۱۵۰۰ >
۱۰	شاخص نمناکی توپوگرافی	(۱) ۳-۰، (۲) ۵-۳، (۳) ۷-۵، (۴) ۱۱-۷، (۵) ۱۱ >
۱۱	شاخص طول دامنه	(۱) ۲-۰، (۲) ۵-۲، (۳) ۱۰-۵، (۴) ۱۵-۱۰، (۵) ۱۵ >
۱۲	کاربری اراضی	(۱) اراضی بایر، (۲) زراعت دیم، (۳) زراعت آبی، (۴) مرتع، (۵) منطقه مسکونی، (۶) مناطق تحت پوشش آب
۱۳	تراکم پوشش گیاهی	(۱) [(-۰/۲۶) - (-۰/۵۶)] (۲) [(۰/۱۱) - (۰/۵۷)] (۳) [(-۰/۱۷) - (۰/۱۲)] (۴) [(-۰/۲۸) - (۰/۱۸)] (۵) [(-۰/۶) - (۰/۲۹)]
۱۴	فاصله از گسل به متر	(۱) ۵۰-۰، (۲) ۱۰۰-۵۰، (۳) ۱۵۰-۱۰۰، (۴) ۲۰۰-۱۵۰، (۵) ۲۰۰ >
۱۵	تراکم گسل به کیلومتر بر کیلومتر مربع	(۱) ۰/۴۳۷ - ۰/۰، (۲) ۱/۱۷ - ۰/۴۳۸، (۳) ۱/۹۳ - ۱/۱۸، (۴) ۲/۸۸ - ۱/۹۴، (۵) ۵/۸۷ - ۲/۸۸
۱۶	فاصله از جاده به متر	(۱) ۵۰-۰، (۲) ۱۰۰-۵۰، (۳) ۱۵۰-۱۰۰، (۴) ۲۰۰-۱۵۰، (۵) ۲۰۰ >
۱۷	تراکم جاده به کیلومتر بر کیلومتر مربع	(۱) ۰/۴۲۸ - ۰/۰، (۲) ۱/۱۷ - ۰/۴۲۹، (۳) ۱/۸۷ - ۱/۱۸، (۴) ۲/۷ - ۱/۸۸، (۵) ۴/۹۶ - ۲/۷۱
۱۸	فاصله از آبراهه به متر	(۱) ۵۰-۰، (۲) ۱۰۰-۵۰، (۳) ۱۵۰-۱۰۰، (۴) ۲۰۰-۱۵۰، (۵) ۲۰۰ >
۱۹	تراکم آبراهه به کیلومتر بر کیلومتر مربع	(۱) ۰/۰۰۰۴۹ - ۰/۰، (۲) ۰/۰۰۱۳ - ۰/۰۰۰۵، (۳) ۰/۰۰۲۲ - ۰/۰۰۱۴، (۴) ۰/۰۰۳۲ - ۰/۰۰۲۳، (۵) ۰/۰۰۰۳ - ۰/۰۰۳۳
۲۰	هماران به میلی‌متر	(۱) ۴۷۱-۵۰۰، (۲) ۵۰۱-۵۵۰، (۳) ۶۰۰-۵۵۰، (۴) ۶۰۰-۵۵۱، (۵) ۶۵۰-۶۰۱، (۶) ۷۰۰-۶۵۱
۲۱	لیتولوژی	(۱) دوره کواترن، (۲) اواخر کرتاسه - اوائل پالئوسن، (۳) اواخر ائوسن - اوائل الیگوسن، (۴) پالئوسن - ائوسن، (۵) اواخر کرتاسه - پالئوسن، (۶) اواخر الیگوسن - میوسن، (۷) دوره کرتاسه، (۸) ژوراسیک - کرتاسه

مأخذ: نگارندگان

قابلیت پیش‌بینی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش بر اساس عوامل مؤثر در آن است. جهت تعیین توانایی پیش‌بینی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها روش‌های متعددی وجود دارد: از جمله Chi-Square (شهبابی و همکاران، ۲۰۱۴) Relief Significance

احمد و دی ۳۳، ۲۰۰۵)، Gain Ratio (نیتیا و دورایسومی^{۳۴}، ۲۰۱۴)، Information Gain Ratio (شیزادی و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهش حاضر از شاخص Information Gain Ratio (IGR) که اولین بار (کوویلین^{۳۵}، ۱۹۹۳) آن را پیشنهاد داد جهت تشخیص قابلیت پیش‌بینی کمی عوامل مؤثر استفاده شد. مقادیر IGR بالاتر نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی بالاتر آن عامل مؤثر برای مدل‌سازی است (شیزادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳۱). جهت شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه مطالعاتی، از بین بیست‌ویک عامل مؤثر به‌کاررفته، از آزمون IGR استفاده شد.

اگر S داده‌های آموزشی با n نمونه ورودی و $n(L_i, S)$ تعداد نمونه‌ها در داده‌های آموزشی S متعلق به کلاس L_i (لغزشی، غیر لغزشی) باشد، در این صورت رابطه ۱ را داریم:

$$\text{Info}(S) = - \sum_{i=1}^2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \log_2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \quad \text{رابطه (۱)}$$

با توجه به عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، مقدار اطلاعات مورد نیاز برای تقسیم S به مجموعه (S_1, S_2, \dots, S_m) از رابطه ۲ برآورد می‌گردد:

$$\text{Info}(S, A) = \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{|S|} \text{Info}(S) \quad \text{رابطه (۲)}$$

شاخص IGR برای یک عامل مؤثر خاص مثل عامل A (به‌عنوان مثال: درجه شیب) از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{InformationGainRatio}(S, A) = \frac{\text{Info}(S) - \text{Info}(S, A)}{\text{SplitInfo}(S, A)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن Split Info نشان‌دهنده اطلاعات تولید شده توسط تقسیم S داده‌های آموزشی به m زیر مجموعه Split Info است که از رابطه (۴) زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{SplitInfo}(S, A) = - \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{|S|} \log_2 \frac{|S_j|}{|S|} \quad \text{رابطه (۴)}$$

عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش برای ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل‌های لغزشی در منطقه مطالعاتی با استفاده از روش IGR ارزیابی شده است. در (جدول ۳) نتایج میانگین شاخص IGR برای بیست‌ویک عامل مؤثر انتخاب‌شده بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه آمده است. این نتایج نشانگر آن است بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب به عوامل فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، شاخص قدرت حمل جریان، بارندگی، عمق دره، شاخص نمناکی توپوگرافی، شدت تابش خورشیدی و انحنای طولی شیب اختصاص یافتند. در صورتی که عوامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب، شاخص طول دامنه، کاربری اراضی، لیتولوژی، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، تراکم گسل، تراکم جاده به خاطر دارا شدن مقدار صفر برای این شاخص با ایجاد یک

33. Ahmad & Dey

34. Nithya & Duraiswamy

35. Quinlan

حالت نویز منجر به اثرگذاری منفی بر نتایج مدل‌سازی شده و همچنین به دلیل عدم تأثیرگذاری بر وقوع زمین لغزش‌های سطحی از مدل‌سازی حذف و مدل‌سازی با ۸ فاکتور باقیمانده انجام شد.

جدول ۳: تعیین مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر لغزش‌های منطقه مطالعاتی بر اساس شاخص (IGR)

عوامل مؤثر	میانگین IGR	عوامل مؤثر	میانگین IGR
فاصله از آبراهه	۰/۹۵۱	انحنای معمولی شیب	۰/۰۰۰
تراکم آبراهه	۰/۴۵۶	انحنای عرضی شیب	۰/۰۰۰
شاخص قدرت حمل جریان	۰/۱۳۸	شاخص طول دامنه	۰/۰۰۰
بارندگی	۰/۱۲۳	کاربری اراضی	۰/۰۰۰
عمق دره	۰/۰۸۴	لیتولوژی	۰/۰۰۰
شاخص نمناکی توپوگرافی	۰/۰۶۳	شاخص پوشش گیاهی	۰/۰۰۰
شدت تابش خورشیدی	۰/۰۲۵	فاصله از غسل	۰/۰۰۰
انحنای طولی شیب	۰/۰۰۸	فاصله از جاده	۰/۰۰۰
درجه شیب	۰/۰۰۰	تراکم غسل	۰/۰۰۰
جهت شیب	۰/۰۰۰	تراکم جاده	۰/۰۰۰
ارتفاع از سطح دریا	۰/۰۰۰	-----	-----

مأخذ: نگارندگان

معرفی روش ماشین پشتیبان بردار (SVM)

الگوریتم SVM تحت عنوان ماشین پشتیبان بردار توسط واپنیک^{۳۶} (۱۹۹۵) بر پایه تئوری یادگیری آماری^{۳۷} که از حداقل سازی ریسک ساختاری^{۳۸} تبعیت می‌کند ارائه شده است. در واقع یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مفید است که از اصل استقرایی کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌شود. ایده اصلی این الگوریتم به صورت یک طبقه‌بندی دوتایی با استفاده از نقاط آموزشی است که فضای ورودی اصلی را به یک فضای با ابعاد بالاتر، جهت یافتن یک ابر صفحه مطلوب تبدیل می‌کند (پنگ^{۳۹} و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۲۸۹). نقاط آموزشی که نزدیک به صفحه مطلوب است، پشتیبان بردار نامیده می‌شود. هنگامی که سطح تصمیم به دست آمد، می‌توان از آن جهت برآورد داده‌های جدید استفاده کرد (تیان‌بای و همکاران، ۲۰۱۲؛ ۷).

جزئیات توضیحی درباره مدل‌سازی SVM در این پژوهش به صورت زیر است:

اگر X_i مجموعه‌ای از سلول‌های آموزشی به صورت رابطه (۵) باشد:

$$X_i = (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{رابطه (۵)}$$

سلول‌های آموزشی شامل دو کلاس $Y_i = \pm 1$ (زمین لغزش و عدم وقوع زمین لغزش) بوده که مشخص می‌شوند به عنوان هدف مدل SVM جستجوی یک فرا طرح افتراق N -ابعادی در دو کلاس بوده که به وسیله شکاف حداکثری آن‌ها مشخص می‌شود. از نظر ریاضی به صورت (۶) بیان می‌گردد:

$$1/2 = \|w^2\| \quad \text{رابطه (۶)}$$

36. Vapnik

37. Statistical Learning Theory

38. Structure Risk Minimization

39. Peng

که منوط به محدود کردن رابطه (۷) است:

$$Y_i = ((W \cdot X_i) + b) \geq 1 \quad \text{رابطه (۷)}$$

که $\|W\|^2$ قاعده‌ای از فرا طرح نرمال یک پایه عددی بوده و (.) مشخص کننده عمل تولید عددی است. با استفاده

از چند ضریبی لاگرانژیان^{۴۰} ارزش محاسبه عملکردی می‌تواند تعریف شود به عنوان رابطه (۸):

$$L = \frac{1}{2} \|W\|^2 - \sum_{i=1}^n \gamma_i ((W \cdot X_i) + b) - \lambda \quad \text{رابطه (۸)}$$

که λ چند ضریبی لاگرانژیان است. این راه حل می‌تواند از طریق کمینه سازی دوتایی رابطه (۹) محاسبه شود.

ارزش گذاری متغیرهای W و B در طی روش های استاندارد صورت گرفته است.

$$L = \frac{1}{2} - \frac{1}{vn} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \|W\|^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که $v \in (0, 1)$ معرفی به حساب شده برای طبقه بندی است (هاستی^{۴۱} و همکاران، ۲۰۰۱، ۲). هم چنین واپینک یک

عملکرد هسته ای به شمارش برای مرز تصمیم غیرخطی معرفی کرد (واپینک^{۴۲}، ۱۹۹۵، ۲). انتخاب عملکرد هسته ای در

مدل SVM خیلی مهم است اگرچه توابع هسته ای $K(X_i, X_j)$ زیادی قبلاً پیشنهاد و استفاده شده اند. تنها بعضی از

آن ها برای کار در طیف گسترده ای از کاربردها مفید شناخته می شوند. آن هایی که این مهارت ها را نشان می دهند

عبارت اند از:

$$K(X_i, X_j) = X_i^t \cdot X_j \quad \text{تابع خطی}$$

$$K(X_i, X_j) = (Y \cdot X_i^t \cdot X_j + r)^d, y > 0 \quad \text{تابع چند جمله ای}$$

$$K(X_i, X_j) = e^{-y} (X_i - X_j)^2, y > 0 \quad \text{تابع پایه شعاعی}$$

$$\tan h = (y \cdot X_i^t \cdot X_j + r) \quad \text{تابع حلقوی}$$

که r, y, d پارامترهای توابع هسته ای هستند و به صورت دستی وارد می شوند. بعضی مواقع توابع هسته ای به عنوان

رابطه (۱۰) استفاده می شوند:

$$y = 1/2\sigma^2 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که σ در این یک پارامتر قابل تنظیم بوده که حاکمیت انجام هسته ای را دارد. اگر بالا گرفته شوند، رفتار نمایی تقریباً

خطی و آنجایی که امکان از دست دادن غیرخطی در طرح های بزرگ ابعاد وجود دارد، درحالی که اگر پایین گرفته شوند،

مرز تصمیم برای خطا در داده های آموزشی محسوس می شود. در این پژوهش نیز $+1$ و -1 به ترتیب زمین لغزش و

پایداری شیب مکان را ارائه می دهند. این الگوریتم در سال های اخیر بر پایه انتقال غیرخطی همگام با یک ابعاد بالای

ویژه به عنوان یکی از محبوب ترین روش ها جهت حل مشکلات طبقه بندی و رگرسیونی است (کاوازوگلو و همکاران،

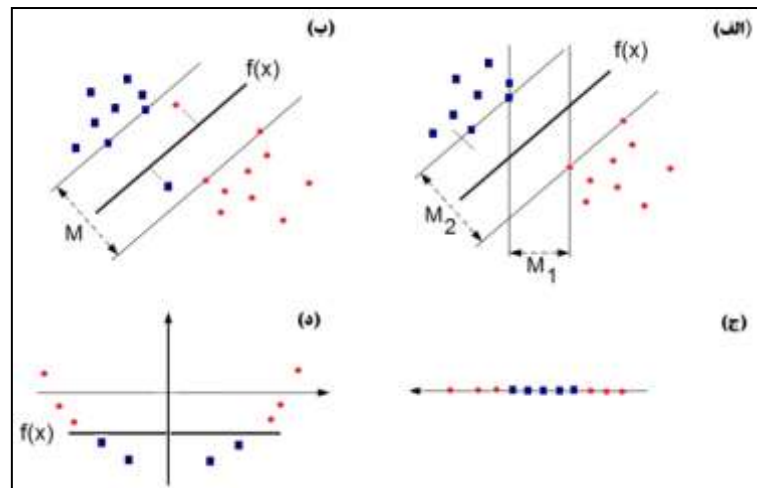
۲۰۱۵، ۴۷۷) و به نتایج موفقیت آمیزی در بسیاری از مشکلات از جمله پهنه بندی حساسیت زمین لغزش دست یافته است

40. Lagrangian

41. Hastie

42. Vapnik

(پرادهان، ۲۰۱۳: ۳۵۴). در واقع عملکرد الگوریتم SVM متفاوت از دیگر روش‌های جداسازی در پی ساخت یک مجموعه نقاط آموزشی از طریق فرا طرح افتراق است (شکل ۲ الف).



مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: توضیح عملکرد الگوریتم SVM: الف) حداکثر حاشیه جداسازی تابع $F(X)$ جدا کردن نقاط دایره از مربع در M_2 ; ب) طبقه‌بندی حاشیه نرم‌افزار که اجازه می‌دهد تا برخی از نقاط نادرست طبقه‌بندی شود؛ ج) مورد خطی جدایی‌ناپذیر؛ د) نقشه‌برداری فضای ورودی اصلی به فضای با ابعاد بالاتر و جداسازی کلاس‌های خطی پس از نقشه‌برداری

این الگوریتم به دنبال حداکثر حاشیه جداسازی بین طبقات $M_2 > M_1$ (در شکل ۲ الف) و ساخت یک ابر صفحه طبقه‌بندی‌شده در میان حاشیه حداکثر است (تابع $F(X)$ در شکل ۲ د). چنانچه نقاط مورد نظر بالاتر از فرا طرح باشد به صورت +۱ (مربع در شکل ۲ الف) در غیر این صورت -۱ (دایره در شکل ۲ الف) طبقه‌بندی می‌شود. از آنجایی که مجموعه داده‌های طبقه‌بندی شده آموزشی نوین بیشتری ایجاد می‌کنند لذا الگوریتم SVM برای پیدا کردن تابع $F(X)$ اجازه می‌دهد که برخی از نقاط در حاشیه جداسازی قرار گیرد (شکل ۲ ب). در واقع ایده اصلی نقشه‌برداری با ابعاد و فضای بالاست که جهت تبدیل مورد غیرخطی به مورد خطی نمایش داده شده است (شکل ۲ ج و د).

در پژوهش حاضر کرنل RBF از مدل ماشین پشتیبان بردار مورد استفاده قرار گرفت. جهت شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه، از میان بیست و یک عامل معرفی‌شده، درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع به متر، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، تابش خورشید، عمق دره، شاخص قدرت جریان، شاخص نمناکی توپوگرافی، شاخص طول دامنه، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده، تراکم جاده، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، همباران و لیتولوژی از شاخص (IGR) (جدول ۳) استفاده شد. در مرحله بعد مقادیر عددی هر یک از پارامترها در محدوده لغزش‌های موجود و مناطق فاقد زمین لغزش استخراج گردید و با وارد کردن داده‌ها در محیط نرم‌افزار WEKA، وزن هر یک از عوامل به صورت مجزا محاسبه گردید

که دامنه عددی امتیازات کسب شده بین ۰ تا ۱ است. در نهایت نقشه‌های وزنی عوامل مؤثر با هم جمع شده و از تلفیق آن‌ها نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش منطقه مطالعاتی حاصل گردید.

معرفی مدل لجستیک درختی (LMT)

مدل لجستیک درختی یکی از انواع الگوریتم‌های درخت تصمیم است. درخت تصمیم از نسل جدید تکنیک‌های داده‌کاوی به شمار می‌رود که در دو دهه اخیر توسعه زیادی یافته‌اند. این مدل یک روش نا پارامتری الگوریتمی است که به پیش‌بینی متغیرهای کمی یا متغیرهای طبقه‌بندی شده بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده کمی و کیفی می‌پردازد. در واقع درخت تصمیم یک مدل سلسله مراتبی متشکل از ابزارهای تصمیم‌گیری است که به صورت بازگشتی به تجزیه متغیرهای مستقل به مناطق همگن می‌پردازد است (پرادهان، ۲۰۱۳). درخت‌های تصمیم‌گیری برای نمایش یک سری از قوانین هستند که منتهی به یک رده یا مقدار می‌شوند. یکی از تفاوت‌ها بین متدهای ساخت درخت تصمیم این است که این فاصله چگونه اندازه‌گیری می‌شود. درخت‌های تصمیمی که برای پیش‌بینی متغیرهای گسسته استفاده می‌شوند درخت‌های طبقه‌بندی^{۴۳} نامیده می‌شوند زیرا نمونه‌ها را در دسته‌ها یا رده‌ها قرار می‌دهند. درخت‌های تصمیمی که برای پیش‌بینی متغیرهای پیوسته استفاده می‌شوند درخت‌های رگرسیونی^{۴۴} نامیده می‌شوند (دبلجاک و دزوروسکی^{۴۵}، ۲۰۰۹: ۲۰۱). هدف از درخت تصمیم پیدا کردن یک استراتژی جهت ارائه نتایج پیش‌بینی‌های به دست آمده از مجموعه متغیرهای ورودی در قالب یک سری قوانین است (هان و کمبر^{۴۶}، ۲۰۱۲: ۳۳۱). نتایج این مدل با موفقیت در بسیاری از موقعیت‌های دنیای واقعی برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی استفاده شده است و در میان بسیاری از الگوریتم‌های طبقه‌بندی، درخت تصمیم‌گیری الگوریتم کارا و مؤثری برای طبقه‌بندی مجموعه داده‌های بزرگ است. تنها نقطه ضعف اصلی این مدل این است که بعضی از روش‌های درخت تصمیم‌گیری تنها می‌توانند در مورد متغیرهای هدف دوتایی (بله یا خیر - پذیرش یا عدم پذیرش) طبقه‌بندی و پیش‌بینی انجام دهند و در بعضی از آن‌ها هنگامی که تعداد مثال‌های هر کلاس کم باشد نرخ خطا بالا می‌رود در واقع حساسیت به نویز و مجموعه آموزش و صفات نامرتبط در این مدل وجود دارد (ژاو و ژانگ^{۴۷}، ۲۰۰۸: ۱۹۵۷). درخت تصمیم شامل الگوریتم‌های زیادی است که در این پژوهش از مدل لجستیک درختی استفاده شده است. در واقع توسعه مداوم روش‌های یادگیری ماشین منجر به تولید الگوریتم‌های قدرتمند و جدید درخت تصمیم، مانند مدل لجستیک درختی می‌شود (گاما^{۴۸}، ۲۰۰۴: ۲۳۸). این مدل طبقه‌بندی، ترکیبی از روش یادگیری درخت تصمیم و رگرسیون لجستیک است (تیان‌بای و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش اطلاعات در نوع لجستیک برای

⁴³ classification

⁴⁴ regression

45. Debeljak & Dz'eroski

46. Han & Kamber

47. Zhao & Zhang

48. Gama

جداسازی (لندور^{۴۹} و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۸۱) و الگوریتم LogitBoost برای تولید مدل LR در هر برگ از درخت استفاده شده است و درخت با استفاده از الگوریتم CART هرس شده است. الگوریتم LogitBoost، رگرسیون لجستیک افزودنی با حداقل مربعات متناسب برای هر کلاس C (زمین لغزش یا عدم زمین لغزش) به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد (دوتسچ^{۵۰} و همکاران، ۲۰۰۹).

$$L_C(X) = \sum_{i=1}^D \beta_i x_i / \beta_0 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن X تعداد فاکتورهای مؤثر در زمین لغزش، β_i ضریب جزء i ام از بردار X است.

روش رگرسیون لجستیک خطی برای محاسبه احتمال خطا برگ‌ها در مدل LMT استفاده شده است رابطه (۱۰) (لندور و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۸۱).

$$P(C|x) = \exp(L_C(x)) / \sum_{C=1}^C \exp(L_C(x)) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که C تعداد کلاس‌ها و حداقل مربعات است.

در پژوهش حاضر الگوریتم LMT نیز به کاررفته است که اجرای این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار WEKA 3.7.12 انجام شده است. متغیرهای ورودی و خروجی بستگی به هدف مورد نظر در یک نسخه خاص از درخت تصمیم به نام درخت رگرسیون مورد بررسی قرار گرفتند (پرادهان، ۲۰۱۳، ۳۵۸). در گام اول از تجزیه و تحلیل درخت تصمیم داده‌های نسبت فراوانی هشت عامل مؤثر که در فایل ASCII ذخیره شده بود بارگیری شده و به فایل‌های داده در نرم‌افزار WEKA 3.7.12 جهت محاسبه احتمال وقوع برای هر پیکسل بر اساس داده‌های آموزشی منتقل شد. الگوریتم درخت تصمیم یک مکانیسم هرس در مرحله القاء درخت جهت کنترل رشد درخت ارائه می‌دهد و در مرحله بعد مقادیر خروجی به دست آمده از حساسیت زمین لغزش از طیف مدل مورد نظر به دست می‌آید. در نهایت مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده به صورت نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش از منطقه مورد مطالعه به دست می‌آید (شکل ۳).

بحث و یافته‌ها

تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حساسیت زمین لغزش‌های سطحی منطقه مورد مطالعه

الگوریتم SVM یک طبقه‌بندی برای دو کلاس است که میزان حساسیت بین عدد ۰ تا ۱ نمایش داده می‌شود و هر چه این میزان به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، حساسیت زیادی به وقوع زمین لغزش داشته و امکان وقوع لغزش بیشتر خواهد شد. نتایج به دست آمده از رابطه فضایی بین زمین لغزش و عوامل مؤثر با استفاده از مدل SVM نشان داده شده است (جدول ۴). در نهایت نقشه خروجی به دست آمده از میزان حساسیت لغزش در پنج طبقه (بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا) از منطقه مطالعاتی ترسیم شد (شکل ۳). نتایج به دست آمده از نقشه خروجی در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد مناطق نزدیک به آبراهه امکان لغزش‌پذیری بیشتری داشته و بر اساس تابع RBF عامل آبراهه بیشترین تأثیر را در وقوع

49. Landwehr

50. Doetsch

این مخاطره دارند. بر اساس این نقشه خروجی بیش از ۷۰ درصد از زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه مطالعاتی، در کلاس خطر بسیار بالا (۰/۸۶ - ۰/۹۹) در کلاس خطر بسیار بالا (۰/۸۶ - ۰/۹۹) رخ داده که نشان‌دهنده حساسیت بالای منطقه مورد مطالعه به پدیده زمین لغزش است. بر اساس توضیحات بخش روش انجام پژوهش، نقشه‌های حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم‌های SVM و LMT تهیه شدند. شکل شماره ۳ این نقشه‌ها را به ترتیب برای روش SVM و مدل LMT نشان می‌دهند. مشاهده این شکل‌ها نشان می‌دهند که از سمت خط الرأس‌ها به سمت پاشنه دامنه‌ها به مقدار حساسیت وقوع زمین لغزش‌های سطحی افزوده شده است؛ به طوری که این مناطق را می‌توان پر رنگ‌تر مشاهده کرد 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 زمین لغزش‌های سطحی با عمق کمتر را فراهم آورده است؛ که همان‌طور که گفته شد با نتایج شیرزادی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده از نقشه خروجی در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد مناطق نزدیک به آبراهه امکان لغزش‌پذیری بیشتری داشته و بر اساس مدل SVM و LMT عامل آبراهه بیشترین تأثیر را در وقوع این مخاطره دارند.

جدول ۴: ارتباط فضایی بین هر یک از عوامل مؤثر لغزشی و پدیده زمین لغزش با استفاده از مدل SVM

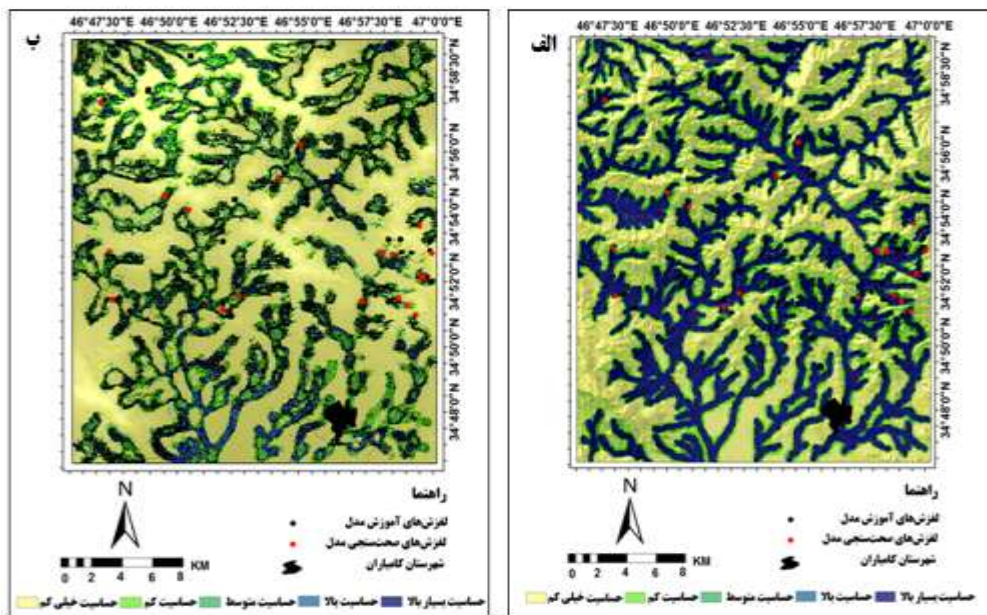
عوامل	طبقات	تعداد نقاط لغزشی	تعداد پیکسل‌های لغزشی	درصد نقاط لغزشی	درصد پیکسل‌های لغزشی	مقدار FR
درجه شیب	۰ - ۸	۹	۵۲۴۵۵۴	۱۵	۴۰/۶۲۸	۰/۳۶۹
	۸ - ۱۵	۳۵	۳۹۶۳۷۳	۵۸	۳۰/۷۰۰	۱/۸۸۹
	۱۵ - ۲۵	۱۶	۳۱۳۹۷۵	۲۶/۷	۲۴/۳۱۸	۱/۰۹۷
	۲۵ - ۳۵	۰	۵۳۶۱۲	۰	۴/۱۵۲	۰/۰۰
	۳۵ - ۴۵	۰	۲۴۸۷	۰	۰/۱۹۲	۰/۰۰
	> ۴۵	۰	۱۱۲	۰	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰
جهت شیب	مسطح	۰	۹۳۷۷۲	۱/۷	۷/۲۶۲	۰/۲۳۴
	شمال	۳	۱۲۷۳۳۱	۳/۳	۱۰/۶۳۶	۰/۴۳۰
	شمال شرق	۳	۱۴۰۶۱۴	۵	۱۰/۸۹۰	۰/۴۵۹
	شرق	۵	۱۶۳۳۸۶	۸/۳	۱۲/۶۵۴	۰/۶۵۵
	جنوب شرق	۱۸	۲۲۷۵۰۱	۳۰	۱۷/۶۲۰	۱/۷۰۲
	جنوب	۱۳	۱۳۴۲۶۶	۲۱/۷	۱۶/۵۹۵	۱/۳۰۷
	جنوب غرب	۱۱	۱۴۵۳۱۲	۱۸/۳	۱۱/۲۵۷	۱/۶۴۵
	غرب	۵	۱۱۳۵۷۳	۸/۳	۸/۷۹۶	۰/۹۴۳
	شمال غرب	۲	۵۵۳۱۸	۸/۳	۴/۲۸۴	۰/۷۷۰
ارتفاع به متر	۱۶۰۰ -	۹	۴۱۵۲۳۹	۱۵	۳۲/۱۶۱	۰/۴۷
	۱۸۰۰ -	۱۵	۳۲۹۱۳۷	۲۵	۲۵/۴۹۲	۰/۹۸
	۱۶۰۰ -	۲۷	۳۰۵۲۴۹	۴۵	۲۳/۶۴۲	۱/۹۰
	۲۰۰۰ -	۸	۱۵۷۹۳۴	۱۳	۱۲/۲۳۲	۱/۰۹
	۲۲۰۰ -	۱	۸۳۵۵۴	۲	۶/۴۷۱	۰/۲۶
انحنای شیب	بسیار مقعر	۲	۱۹۷۸۶	۳/۳	۱/۵۴۲	۲/۱۵۳
	مقعر	۸	۹۹۰۵۲	۱۳/۳	۷/۶۷۱	۱/۷۳۳
	مسطح	۳۱	۶۷۴۶۲۴	۵۱/۷	۵۲/۲۵۰	۰/۹۸۹
	محدب	۱۹	۴۶۹۲۲۳	۳۱/۷	۳۶/۳۴۱	۰/۸۷۲
	بسیار محدب	۰	۲۸۴۴۸	۰	۲/۲۰۳	۰۰
انحنای عرضی شیب	(-۳/۱)	۰	۲۶۷۳۴	۰	۲/۷۰۶	۰۰
	(-۱۵)	۱۴	۳۳۲۴۶۵	۱۴	۲۵/۷۵۰	۰/۲۶
	(-۰/۳۱)	۲۳	۵۰۶۲۹۰	۲۳	۳۹/۲۱	۰/۹۰۴
	(-۱/۲)	۱۹	۳۸۹۰۱۶	۱۹	۳۰/۱۳	۰/۹۷۶
	(-۰/۳)					
	(۰/۴۲)					
	(۱/۵) - ۰/۴۳					

۱/۰۵۲	۲/۸۳	۴	۳۶۶۰۸		۴	(۱/۶) - (۱/۵)	
۱/۳۹۱	۲/۳۷۰	۳/۳	۳۰۶۱۰		۲	$-\frac{(-1/8)}{(-16)}$	انحنای طولی شیب
۱/۷۲۴	۱۰/۶۱۰	۱۸/۳	۱۳۶۹۹۶	۱۱		$(-1/7) - (0/53)$	
۰/۸۱۷	۵۲/۹۶۲	۴۳/۳	۶۸۳۸۱۲	۲۶		$(-0/52) - 0/28$	
۱/۱۰۰	۲۸/۸۰۵	۳۱/۷	۳۷۱۹۱۸	۱۹		$(-0/29) - (1/2)$	
۰/۶۲۸	۵/۲۴۹	۳/۳	۶۷۷۷۷	۲		۱/۳ - ۱۰	
۰/۳۴۴	۴/۹۳۲	۱/۷	۶۳۶۷۹	۱		۳۳۷۰۰۰ - ۵۱۷۰۰۰	شدت تابش خورشید
۰/۸۱۸	۱۰/۱۴۶	۸/۳	۱۳۱۰۰۴	۵		۵۱۸۰۰۰ - ۶۰۳۰۰۰	
۰/۷۷۲	۱۵/۱۵۱	۱۱/۷	۱۹۵۶۲۱	۷		۶۷۴۰۰۰ - ۶۰۴۰۰۰	
۰/۷۲۸	۴۳/۵۰۱	۳۱/۷	۵۶۱۶۶۸	۱۹		۷۳۴۰۰۰ - ۶۷۵۰۰۰	
۱/۷۷۷	۲۶/۲۶۷	۴۶/۷	۳۳۹۱۴۱	۲۸		۷۳۵۰۰۰ - ۸۸۱۰۰۰	
۰/۷۴۳	۲۰/۱۷۹	۱۵	۲۶۰۵۴۲	۹		۰ - ۵۰	عمق دره به متر
۱/۰۳۴	۲۷/۶۳۱	۲۸/۳	۳۵۶۷۵۰	۱۷		۵۰ - ۱۰۰	
۱/۱۰۸	۲۵/۵۲۳	۲۸/۳	۳۲۹۵۳۵	۱۷		۱۰۰ - ۱۵۰	
۰/۹۶۲	۱۳/۸۲۳	۱۳/۳	۱۷۸۴۷۹	۸		۱۵۰ - ۲۰۰	
۱/۱۶۸	۱۲/۸۴۲	۱۵	۱۶۵۸۰۷	۹		> ۲۰۰	
۰/۰	۰/۹۴۷	۰	۱۲۲۲۶	۰		۰ - ۱۰۰	شاخص قدرت جریان
۰/۷۶۶	۱۳/۰۴۲	۱۰	۱۶۸۳۹۲	۶		۱۰۰ - ۵۰۰	
۰/۴۱۴	۱۶/۰۸۴	۶/۶۶	۲۰۷۶۶۴	۴		۵۰۰ - ۱۰۰۰	
۱/۰۰۴	۱۱/۶۱۷	۱۱/۶۶	۱۴۹۹۹۳	۷		۱۰۰۰ - ۱۵۰۰	
۱/۱۱۹	۵۸/۳۰۸	۷۱/۶۶	۷۵۲۸۲۸	۳۳		> ۱۵۰۰	
۱/۰۵۰	۳۹/۶۸۰	۴۱/۷	۵۱۲۳۱۹	۲۵		۰ - ۳	شاخص نمناکی توپوگرافی
۱/۱۸۲	۳۱/۰۳۵	۳۶/۷	۴۰۰۶۹۸	۲۲		۳ - ۵	
۱/۰۰۹	۱۸/۱۳۰	۱۸/۳	۲۳۴۰۸۲	۱۱		۵ - ۷	
۰/۳۰۹	۱۰/۶۴۷	۳/۳	۱۳۷۴۶۵	۲		۷ - ۱۱	
۰/۰۰۰	۰/۵۰۷	۰	۶۵۴۹	۰		> ۱۱	
۰/۷۴۳	۲۰/۱۷۹	۱۵	۲۶۰۵۴۲	۹		۰ - ۲	شاخص طول دامنه
۱/۰۲۴	۲۷/۶۳۱	۲۸/۳	۳۵۶۷۵۰	۱۷		۲ - ۵	
۱/۱۰۸	۲۵/۵۲۳	۲۸/۳	۳۲۹۵۳۵	۱۷		۵ - ۱۰	
۰/۹۶۲	۱۳/۸۲۳	۱۳/۳	۱۷۸۴۷۹	۸		۱۰ - ۱۵	
۱/۱۶۸	۱۲/۸۴۲	۱۵	۱۶۵۸۰۷	۹		> ۱۵	
۰/۹۷۴	۲۵/۶۵۲	۲۵	۳۳۱۲۰۱	۱۵		-۰/۲۶ - ۰/۰۵۶	تراکم پوشش گیاهی
۱/۱۲۷	۳۹/۹۰۹	۴۵	۵۱۵۲۷۱	۲۷		۰/۰۵۷ - ۰/۱۱	
۰/۸۷۹	۲۲/۷۵۲	۲۰	۲۹۳۷۵۸	۱۲		۰/۱۲ - ۰/۱۷	
۰/۷۸۰	۸/۵۸۷	۶/۷	۱۱۰۸۷۹	۴		۰/۱۸ - ۰/۲۸	
۱/۰۶۵	۳/۰۹۸	۳/۳	۴۰۰۰۴	۲		۰/۲۹ - ۰/۱۶	
۱/۰۵۵	۳۰/۰۲۹	۳۱/۷	۳۸۷۷۱۲	۱۹		گروه ۱	لیتولوژی
۰/۵۲۷	۳۲/۱۶۵	۱۱/۷	۲۸۶۱۸۷	۷		گروه ۲	
۱/۳۴۴	۹/۸۹۳	۱۳/۳	۱۲۷۷۳۶	۸		گروه ۳	
۰/۶۲۴	۱۰/۷۳۳	۶/۷	۱۳۸۵۸۴	۴		گروه ۴	
۱/۳۳۲	۲۴/۹۸۹	۳۳/۳	۳۲۲۶۴۰	۲۰		گروه ۵	
۰/۰۰۰	۱/۲۹۰	۰/۰	۱۶۶۶۷	۰		گروه ۶	
۳/۹۱۹	۰/۸۴۱	۳/۳	۱۰۸۷۱	۲		گروه ۷	
۰/۰۰۰	۰/۰۵۵	۰/۰	۷۱۶	۰		گروه ۸	
۱/۶۲۵	۳/۰۷۶	۵	۳۹۷۱۷	۳		اراضی تحت پوشش آب	کاربری اراضی
۰/۷۴۲	۲۲/۵۰۱	۱۶/۷	۲۹۰۵۲۴	۱۰		اراضی زراعی آبی	
۰/۶۲۱	۲۶/۸۶۹	۱۶/۷	۳۴۶۹۲۱	۱۰		اراضی دیمی	
۱/۲۴۴	۲/۶۱۶	۰/۰	۳۳۷۷۸	۰		مناطق مسکونی	
۰/۰۰۰	۲۲/۷۴۰	۲۸/۳	۲۹۳۶۰۶	۱۷		اراضی سایر	
۱/۵۰۰	۲۲/۱۹۵	۳۳/۳	۲۸۶۵۶۷	۲۰		مرتع	
۰/۳۹۶	۸/۳۲۶	۳/۳	۱۰۷۵۰۷	۲		۰ - ۵۰	فاصله از گسل به متر
۱/۲۸۴	۷/۷۸۲	۱۰	۱۰۰۴۷۷	۶		۵۰ - ۱۰۰	
۰/۷۹۹	۶/۲۵۳	۵	۸۰۷۴۲	۳		۱۰۰ - ۱۵۰	
۱/۴۱۹	۷/۰۴۶	۱۰	۹۰۹۷۲	۶		۱۵۰ - ۲۰۰	
۱/۰۱۵	۷۰/۵۹۱	۷۱/۷	۹۱۱۴۱۵	۳۳		> ۲۰۰	
۰/۹۹۸	۵۳/۳۸۴	۵۳/۳	۶۸۹۲۵۰	۳۲		۰/۰ - ۰/۴۳۷	تراکم گسل به کیلومتر مربع
۱/۲۷۱	۱۳/۱۲۹	۱۶/۷	۱۶۹۵۱۶	۱۰		-۰/۴۳۸ - ۱/۱۷	
۱/۱۰۳	۲۴/۱۹۳	۲۶/۷	۳۱۲۳۶۷	۱۶		۱/۱۸ - ۱/۹۳	
۰/۴۶۱	۰/۱۴۵	۳/۳	۹۲۲۵۱	۲		۱/۹۴ - ۲/۸۸	
۰/۰۰۰	۲/۱۴۷	۰	۲۷۷۲۹	۰		۲/۸۸ - ۵/۸۷	
۰/۰۴۶	۳۶/۸۸۳	۱/۷	۴۷۶۲۰۳	۱		۰ - ۵۰	فاصله از جاده به متر
۰/۲۳۲	۲۸/۸۶۴	۶/۷	۳۷۲۶۷۹	۴		۵۰ - ۱۰۰	
۰/۱۵۰	۲۱/۹۶۷	۳/۳	۲۸۳۶۲۰	۲		۱۰۰ - ۱۵۰	
۰/۱۵۹	۱۰/۶۳۲	۱/۷	۱۳۷۲۷۵	۱		۱۵۰ - ۲۰۰	
۵۲/۴۶	۱/۶۵۲	۸۷/۷	۲۱۳۳۶	۵۲		> ۲۰۰	
۱/۰۷۵	۷۲/۷۷۹	۷۸/۳	۹۳۹۶۷۱	۴۷		۰ - ۰/۴۲۸	تراکم جاده

						به کیلومتر بر کیلومتر مربع
۰/۸۰۶	۸/۳۰۸	۶/۷	۱۰۷۲۷۸	۴	۰/۴۲۹ - ۱/۱۷	
۰/۷۸۴	۱۴/۹۰۴	۱۱/۷	۱۹۲۴۴۰	۷	۱/۱۸ - ۱/۸۷	
۰/۰۴۲	۳/۱۶۵	۳/۳	۴۰۸۶۸	۲	۱/۸۸ - ۷/۲	
۰/۰۰۰	۰/۸۴۰	-	۱۰۸۵۶	۰	۲/۷۱ - ۴/۹۶	
۱/۹۱۵	۱۳/۰۵۴	۱۳/۰۵۴	۱۶۸۵۸۰	۱۵	۰ - ۵۰	فاصله از ابراهه به متر
۲/۸۱۹	۱۲/۴۱۲	۱۲/۴۱۲	۱۶۰۲۲۵	۲۱	۵۰ - ۱۰۰	
۲/۵۷۲	۹/۷۱۹	۹/۷۱۹	۱۲۵۴۸۷	۱۵	۱۰۰ - ۱۵۰	
۰/۷۷۰	۱۰/۷۷۵	۱۰/۷۷۵	۱۳۹۱۲۳	۵	۱۵۰ - ۲۰۰	
۰/۱۲۳	۵۴/۰۳۸	۵۴/۰۳۸	۶۹۷۶۹۸	۴	> ۲۰۰	
						تراکم ابراهه به کیلومتر بر کیلومتر مربع
۲/۳۱۴	۳۸/۸۸۱	۹۰	۵۰۲۰۰۱	۵۴	۰/۰ - ۰/۰۰۰۴۹	
۰/۳۰۷	۳۲/۵۲۱	۱۰	۴۱۹۸۸۳	۶	۰/۰۰۰۵ - ۰/۰۰۱۳	
۰/۰۰۰	۲۲/۲۷۲	-	۲۸۷۵۶۰	۰	۰/۰۰۱۴ - ۰/۰۰۲۲	
۰/۰۰۰	۵/۷۴۷	-	۷۴۲۱۰	۰	۰/۰۰۲۳ - ۰/۰۰۳۲	
۰/۰۰۰	۰/۵۷۷	-	۷۴۵۹	۰	۰/۰۰۳۳ - ۰/۰۰۳	
						همباران
۰/۶۵۳	۲۰/۳۳۸	۱۳/۳	۲۶۳۵۹۳	۸	۵۰۰ - ۴۷۱	
۰/۴۷۶	۴۵/۵۳۵	۲۱/۷	۵۸۱۷۹۱۴	۱۳	۵۰۱ - ۵۵۰	
۰/۹۹۵	۱۵/۰۷۲	۱۵	۱۹۴۵۹۸	۹	۵۵۰ - ۶۰۰	
۱/۱۰۸	۹/۰۲۴	۱۰	۱۱۶۵۲۲	۶	۵۵۱ - ۶۰۰	
۴/۲۱۷	۷/۵۱۷	۳۱/۷	۹۷۰۵۴	۱۹	۶۰۱ - ۶۵۰	
۳/۳۰۴	۲/۵۱۱	۸/۳	۳۲۴۳۲	۵	۶۵۱ - ۷۰۰	

مأخذ: نگارندگان

مأخذ: نگارندگان



شکل ۳: نقشه‌های پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مطالعاتی با الگوریتم SVM - RBF (الف) و الگوریتم DT-LMT (ب)

عملکرد مدل‌ها و اعتبارسنجی آن‌ها بر اساس داده‌های تعلیمی^{۵۱} و داده‌های صحت‌سنجی^{۵۲}

جهت ارزیابی الگوریتم‌های پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی و عملکرد معیارهای به‌کار رفته برای کلاس‌های لغزشی و غیر لغزشی، ۴ معیار (sensitivity, specificity, accuracy, RMSE) از معیارهای ارزشیابی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۵). نتیجه معیارهای مدل‌سازی در مناطقی که زمین‌لغزش حضور دارند و یا حضور ندارند به‌صورت

51. Training dataset

52. Validation dataset

دوگانه مثبت و منفی^{۵۳} می‌باشند. این طبقه‌بندی منجر به ایجاد چهار حالت شامل TP، TN، FP و FN می‌شود. چنانچه مدلی که مقادیر معیارهای ذکر شده به سمت ۱ تمایل داشته باشد مدل مناسبی شناخته می‌شود (شیرزادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳۴).

جدول ۵: شرح معیارهای آماری به‌کار رفته بر اساس الگوریتم‌های SVM و LMT در منطقه مطالعاتی

معیار	فرمول	توضیح
True positive	-	تعداد پیکسل زمین‌لغزش‌هایی (ارزش ۱) که به‌درستی به‌عنوان زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
True negative	-	تعداد پیکسل عدم حضور زمین‌لغزش‌هایی که به‌درستی به‌عنوان عدم حضور زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
False positive	-	تعداد پیکسل عدم حضور زمین‌لغزش‌هایی (ارزش ۰) که به‌اشتباه به‌عنوان زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
False negative	-	تعداد پیکسل حضور زمین‌لغزش‌هایی که به‌اشتباه به‌عنوان عدم حضور زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند.
Sensitivity	$SST = \frac{TP}{TP + FN}$	حساسیت: نسبت پیکسل‌های لغزشی که به‌درستی به‌عنوان لغزش طبقه‌بندی شده‌اند. این بیانگر قابلیت پیش‌بینی خوب مدل لغزشی برای طبقه‌بندی پیکسل‌های لغزشی است
Specificity	$SPF = \frac{TN}{FP + TN}$	شفافیت: نسبت پیکسل‌های غیر لغزشی که به‌درستی به‌عنوان غیر لغزش طبقه‌بندی شده‌اند. این بیانگر قابلیت پیش‌بینی خوب مدل لغزشی برای طبقه‌بندی پیکسل‌های غیر لغزشی است
Accuracy	$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP}$	صحت: نسبت پیکسل‌های لغزشی و غیر لغزشی که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. این بیانگر چگونگی عملکرد خوب مدل لغزشی است.
Root Mean Squared Error (RMSE)	$RMSE = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\epsilon_i - \bar{\epsilon}_i)^2 \right]^{0.5}$	مجذور مربعات خطا: مقدار خطای متریک در همان داده‌ها با داده‌های اصلی است. مقدار RMSE کمتر بیانگر عملکرد بهتر مدل لغزشی است.

مأخذ: نگارندگان

با توجه به نتایج به‌دست آمده از (جدول ۶) و استفاده از بهترین فاکتورهای مؤثر، مدل‌های SVM و LMT برای مجموعه داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی ساخته شدند. نتایج نشانگر آن است که معیارهای حساسیت، شفافیت و صحت برای داده‌های تعلیمی در مدل SVM به ترتیب ۰/۹۵۱، ۰/۹۶۶ و ۰/۹۵۸ می‌باشند. درحالی‌که این مقادیر برای مدل LMT به ترتیب ۰/۹۲۱، ۰/۹۶۵ و ۰/۹۴۲ می‌باشند. از سوی دیگر نتایج این مقادیر برای داده‌های صحت‌سنجی در مدل SVM به ترتیب ۰/۸۵۰، ۰/۸۵۰ و ۰/۸۵۱ می‌باشند درحالی‌که برای مدل LMT شامل ۰/۸۱۰، ۰/۸۴۲ و ۰/۸۲۵ می‌باشند. همچنین، مقدار RMSE در داده‌های تعلیمی مدل SVM (۰/۰۵۸) و در داده‌های صحت‌سنجی مدل SVM (۰/۱۲۶) از مقدار کمتری در داده‌های تعلیمی مدل LMT (۰/۱۲۶) و در داده‌های صحت‌سنجی مدل LMT با مقدار (۰/۱۸۵) برخوردار است.

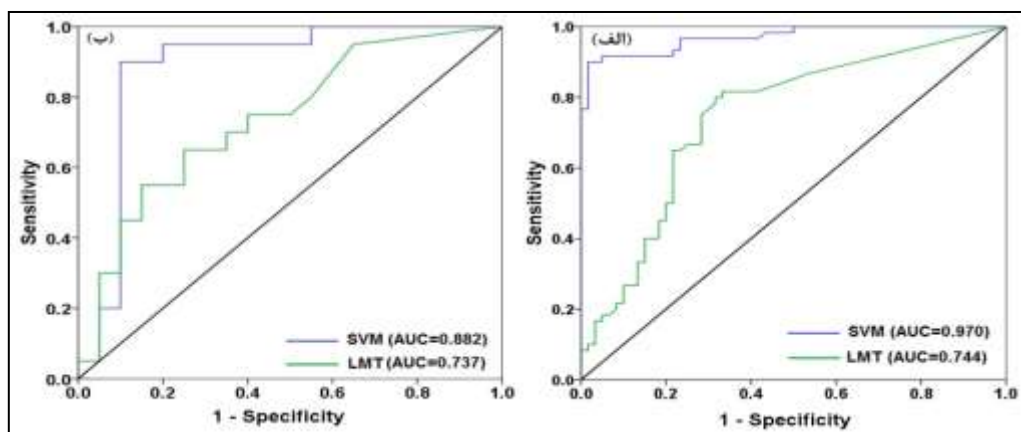
جدول ۶: ارزیابی مدل سازی داده های تعلیمی با الگوریتم SVM و LMT

شاخص	داده های تعلیمی		داده های صحت سنجی	
	SVM	LMT	SVM	LMT
True positive	۵۸	۵۸	۱۷	۱۷
True negative	۵۷	۵۵	۱۷	۱۶
False positive	۲	۲	۳	۳
False negative	۳	۵	۳	۴
Sensitivity (%)	۰/۹۵۱	۰/۹۲۱	۰/۸۵۰	۰/۸۱۰
Specificity (%)	۰/۹۶۶	۰/۹۶۵	۰/۸۵۰	۰/۸۴۲
Accuracy (%)	۰/۹۵۸	۰/۹۴۲	۰/۸۵۱	۰/۸۲۵
RMSE	۰/۰۵۸	۰/۱۴۹	۰/۱۲۶	۰/۱۸۵

مأخذ: نگارندگان

ارزیابی صحت نقشه های پیش بینی مکانی حساسیت زمین لغزش های سطحی منطقه مورد مطالعه

اعتبارسنجی، یک بخش ضروری از حساسیت زمین لغزش به شمار می رود و نقشه های حساسیت زمین لغزش بدون اعتبارسنجی فاقد ارزش می باشند (پرادهان، ۲۰۱۱: ۳۳۴). در پژوهش حاضر ارزیابی حساسیت زمین لغزش با داده های تعلیمی و صحت سنجی با استفاده از شاخص های نرخ موفقیت و نرخ پیش بینی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در حال حاضر قابلیت پیش بینی حساسیت لغزش های منطقه مورد مطالعه با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) مورد بررسی قرار گرفت و از مقدار AUC، درصد نرخ موفقیت و قابلیت پیش بینی هر دو مجموعه داده های آموزشی و داده های اعتبارسنجی به دست آمد. در موضوع ارزیابی صحت نقشه مکان یابی مناطق حساس به وقوع زمین لغزش هم از داده های تعلیمی و هم از داده های صحت سنجی استفاده می گردد. بر این اساس، هنگامی که از داده های تعلیمی استفاده شود منحنی ارزیابی صحت (SRC) success rate curve نام دارد و در هنگام استفاده از داده های صحت سنجی به منحنی ارزیابی صحت نقشه پیش بینی مکانی، واژه prediction rate curve (PRC) اطلاق می گردد (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۳). مقادیر AUC مابین ۰/۵ الی ۱ است و ایدئال ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد (پور قاسمی، ۱۳۸۹: ۷۷). چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی تخمین زند، مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی ROC سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد، بهترین دقت را از نقشه پهنه بندی نشان می دهد (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۳). همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین بدین صورت است: (۱ - ۰/۹، عالی؛ ۰/۸ - ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷ - ۰/۸، خوب؛ ۰/۶ - ۰/۷، متوسط؛ و ۰/۵ - ۰/۶، ضعیف) (یاسلینسار^{۵۴}، ۲۰۰۵: ۴۲۳). در این پژوهش با استفاده از ۷۰ درصد از لغزش مجموعه داده تعلیمی، منحنی ROC برای مدل های به کار رفته ترسیم شد که برابر با (شکل ۴) بود.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۴: ارزیابی نقشه‌های پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی بر اساس الگوریتم SVM و الگوریتم LMT با داده‌های تعلیمی (الف) و با داده‌های صحت‌سنجی (ب)

مشاهده این شکل نشان می‌دهد که در منحنی SRC بر اساس داده‌های تعلیمی مقدار سطح زیر منحنی با استفاده از الگوریتم SVM، ۰/۹۷ و بر اساس مدل LMT، ۰/۷۴۴ می‌باشد که به این معنی است الگوریتم SVM، ۹۷ درصد توانایی پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش را داشته است. این در حالی است که برای داده‌های صحت‌سنجی مقدار سطح زیر منحنی PRC به ترتیب برای الگوریتم SVM و الگوریتم LMT، ۰/۸۸۲ و ۰/۷۳۷ به دست آمد. به‌طور کلی، نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های به‌دست‌آمده با هر دو روش تأیید شد؛ با این توضیح که مدل SVM، دارای مقدار درصد مساحت زیر منحنی داده‌های تعلیمی و آموزشی بالاتری نسبت به مدل LMT می‌باشد که این خود بیان‌کننده عملکرد عالی مدل SVM است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی مقایسه‌ای روش‌های داده‌کاوی ماشین پشتیبان بردار و مدل لجستیک درختی جهت پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر کامیاران واقع در استان کردستان می‌پردازد. اگرچه در طول دو دهه گذشته، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای مدل‌سازی زمین‌لغزش استفاده شده و مورد بحث قرار گرفته است، با این حال تاکنون مدل‌های به کار رفته در پژوهش حاضر تنها به تعداد معدودی از مطالعات محدود شده است. نقشه پراکنش زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی با ۶۰ نقطه لغزشی ساخته شد. نتایج بررسی مهم‌ترین عوامل اثرگذار از میان بیست‌ویک عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه مطالعاتی بر اساس شاخص IGR نشان داد که سیزده عامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، انحنای عرضی شیب، شاخص طول دامنه، کاربری اراضی، لیتولوژی، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، تراکم گسل، تراکم جاده به دلیل دارا بودن مقدار صفر این شاخص و عدم تأثیرگذاری این عوامل از مدل‌سازی نهایی حذف شدند. از طرفی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع

زمین لغزش‌های منطقه مطالعاتی عوامل هیدرولوژی (فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، شاخص قدرت حمل جریان و بارندگی) در هر دو مدل مورد نظر بودند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی مدل‌های ارائه شده از معیارهای sensitivity, specificity, accuracy, RMSE و مساحت زیر منحنی (ROC) استفاده شدند. بر این اساس این مقادیر هم در داده‌های تعلیمی و هم در داده‌های آموزشی در الگوریتم SVM نسبت به مدل LMT دارای مقادیر بیشتری می‌باشند. این نتیجه بیانگر این مطلب است که هر دو مدل از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفته‌اند. هر چند که مدل SVM نسبت به مدل LMT از توانایی بالاتری نیز در مدل‌سازی برخوردار شده است. در نهایت منطقه مطالعاتی به پنج کلاس حساسیت بسیار بالا، بالا، متوسط، خیلی کم و کم طبقه‌بندی شد که ارزیابی تمامی نتایج نشان‌دهنده عملکرد بالا و ظرفیت پیش‌بینی خوب مدل‌های پیشنهادی در شناسایی پهنه‌ها با پتانسیل بالای لغزشی است که می‌تواند جهت انتخاب مکان مناسب، کاهش خطرات و خسارات زمین‌لغزش، برنامه‌ریزی‌های کاربری اراضی، مدیریت و تصمیم‌گیری بهتر در شهرستان کامیاران مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین، مشاهده نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش سطحی بر اساس الگوریتم‌های به کار رفته نشان داد که بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در انتهای دامنه (پاشنه دامنه) جایی که دامنه نزدیک به محل اتصال آبراهه‌ها می‌گردد، اتفاق می‌افتد.

نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به‌عنوان یک ابزار مفید برای برنامه‌ریزی اراضی، مدیریت بحران و کاهش مخاطرات طبیعی در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش نشان داد که SVM یک ابزار قدرتمند و مدل کارآمدتری برای حساسیت زمین‌لغزش با دقت بالا در نظر گرفته شده است و به‌عنوان یک نتیجه‌گیری نهایی، نتایج تجزیه و تحلیل به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر اطلاعات بسیار مفیدی برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی در مناطق لغزشی فراهم می‌کند.

منابع

- ۱- ابراهیمی، مجید؛ الهیان، محمود، امیر احمدی، ابوالقاسم، بهرامی، شهرام. (۱۳۹۳): پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین-لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه (تئوری بیزین)؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز بار نیشابور، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره ۴، صص ۱۴۴-۱۲۵.
- ۲- بهاروند، سیامک؛ سوری، سلمان. (۱۳۹۴): پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و مدل تراکم سطح (مطالعه موردی حوضه کاکا شرف، جنوب شرقی شهر خرم‌آباد)، زمین‌شناسی مهندسی، دوره نهم، شماره ۴، صص ۳۱۱۲-۳۰۹۳.
- ۳- پور قاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید، مصطفی‌زاده، رتوف، جیرنده، عباس. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و خاک، سال شانزدهم، شماره شصت و دوم، صص ۱۲۱-۱۰۹.

- ۴- پور قاسمی، حمیدرضا. (۱۳۸۹): پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره نهم، ص ۸۰ - ۶۹.
- ۵- حسین زاده، محمدحسین. محمدرضا ثروتی، عادل منصوری، بابک میرباقری، سعید خضری. (۱۳۸۸): پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، صفحات ۲۷ - ۳۷.
- ۶- دولت‌خواهی، زهرا؛ جوادی، محمدرضا؛ وفا خواه، مهدی. (۱۳۹۶): استفاده از روش‌های آماری رگرسیون دو و چند متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز شمال تهران)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره هشتم، شماره ۱۵، صص ۱۷۹-۱۷۱.
- ۷- شیرزادی، عطا اله، سلیمانی کریم، حبیب نژاد محمود، گویان عطا اله، چپی کامران. (۱۳۹۶): معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا به منظور پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۶، صفحات ۲۴۶ - ۲۲۵.
- ۸- صفاری، امیر؛ رعیتی شوازی، منیره؛ جان احمدی، مریم؛ شیرزاد ما لیری، لیلا. (۱۳۹۴): پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان جم)، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال هشتم، شماره ۳۰، صص ۲۹-۱۵.
- ۹- صفاری، امیر؛ هاشمی، معصومه. (۱۳۹۵): پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با مدل‌های آنتروپی و منطق فازی (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه)، دوره نهم، شماره ۳۴، صص ۶۲-۴۳.
- ۱۰- عابدینی، موسی. (۱۳۹۵): ژئو مورفولوژی تکتونیک، تألیف، ۲ جلد، جلد دوم، چاپ اول، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، ۲۱۴ صفحه.
- ۱۱- عرب عامری، علیرضا؛ شیرانی، کورش؛ حلبیان، امیرحسین. (۱۳۹۵): ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل‌های آماری و لجستیک برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه ونک)، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال نهم، شماره ۳۲، صص ۱۴۰-۱۲۳.
- ۱۲- فتح‌آبادی، ابوالحسن؛ قندی، اکرم؛ روحانی، حامد؛ سیدیان، مرتضی. (۱۳۹۵): بررسی کارایی روش‌های دو و چند متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه‌ی چهل چای)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال چهارم، شماره ۲۴، صص ۴۶ - ۲۳.
- ۱۳- محمد نیا، ملیحه؛ امیر احمدی، ابوالقاسم؛ بهرامی، شهرام. (۱۳۹۵): کاربرد مدل شواهد وزنی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز جعفرق)، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و یکم، شماره دوم، شماره پیاپی ۷۰، صص ۱۵۴-۱۴۱.
- ۱۴- یمانی، مجتبی، احمدآبادی، علی، زارع، غلامرضا. (۱۳۹۱): به‌کارگیری الگوریتم ماشین‌های پشتیبان بردار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سوم، صص ۱۴۲ - ۱۲۵.

- 15- Ahmad, A. Dey, L. (2005): A Feature Selection Technique for Classificatory Analysis. Pattern Recogn. Let. 26 (1), 43-56.
- 16- Abedini M, Ghasemyan B, Rezaei Mogaddam M H, (2017): Landslide Susceptibility Mapping in Bijar City, Kurdistan Province, Iran: a Comparative Study By Logistic Regression And AHP Models, Environ Earth Sci, 76:308, DOI 10.1007/s12665-017-6502-3.
- 17- Cruden DM, (1991): A Simple definition of a landslide. Bull Eng. Geol Environ 43:27-29.
- 18- Debeljak, M. Dz'eroski, S. (2009): In: Jopp, F. Reuter, H. Breckling, B.)Eds.), Decision Trees in Scological Modelling in Modelling Complex Ecological Dynamics. Springer, Berlin Heidelberg, Pp.197-2092011.
- 19- Doetsch P, Buck C, Golik P, Hoppe N, Kramp M, Laudenberg J, Oberdörfer C, Steingrube Gama J (2004): Functional Trees. Mach Learn 55:219-250.
- 20- Han, J, Kamber M, (2012): "Data Mining: Concepts and Techniques", San Diego Academic Press, Pp1-740.

- 21- Hastie, T. Tibshirani, R. Friedman, J.H. (2001): *The Elements of Statistical Learning: Data Mining. Inference and Prediction.* Springer Verlag, New York.
- 22- Jie Wang, Min Guo b, Kazuhide Sawada, Jie Lina, Jinchi Zhanga, (2015): *Landslide Susceptibility Mapping in Mizunami City, Japan: A Comparison Between Logistic Regression, Bivariate Statistical Analysis and Multivariate Adaptive Regression Spline Models*, *Catena* 135: 271–282.
- 23- Kavzoglu, Taskin; Sahin Emrehan, Kutlug; Colkesen, Ismail (2015): *An Assessment of Multivariate and Bivariate Approaches in Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study of Duzkoy District*, *Nat Hazards*, 76:471–496.
- 24- Koehorst, B.A.N. Kjekstad, O. Patel, D. Lubkowski, Z. Knoeff, J.G. Akkerman, G.J, (2005): *Workpackage 6 Determination of Socio- Economic Impact of Natural Disasters, Assessing Socio Economic Impact in Europe*, Pp.173.
- 25- Landwehr, N. Hall, M. Frank, E. (2005): *Logistic Model Trees*. *Mach. Learn.* 59 (1), 161–205.
- 26- Nithya, N.S. Duraiswamy, K. (2014): *Gain Ratio Based Fuzzy Weighted Association rule Mining Classifier For Medical Diagnostic Interface*. *Sadhana* 39 (1), 39–52.
- 227- Peng Ling, Ruiqing Niu Bo Huang, Xueling Wua, Yannan Zhao, Runqing Ye, (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.
- 28- Pradhan, B. (2011): *Use of GIS-Based Fuzzy Logic Relations and Its Cross Application to Produce Landslide Susceptibility Maps in Three Test Areas in Malaysia*. *Environmental Earth Sciences* 63 (2), 329–349.
- 29- Pradhan Biswajeet (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*, *Computers & Geosciences* 51, PP: 350–365.
- 30- Quinlan, J.R. (1993): *C4.5: Programs For Machine Learning*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.
- 31- Shahabi H, Khezri S, Ahmad BB, Hashim M, (2014): *Landslide Susceptibility Mapping At Central Zab Basin, Iran: a Comparison Between Analytical Hierarchy Process, Frequency Ratio and Logistic Regression Models*. *CATENA* 115:55–70.
- 32- Shirzadi Ataollah, Tien Bui Dieu, Thai Pham Binh, Solaimani Karim, Chapi Kamran, Kavian Ataollah, Shahabi Himan, Revhaug Inge (2017): *Shallow Landslide Susceptibility Assessment Using a Novel Hybridintelligence Approach*, *Environ Earth Sci* 76:60, DOI 10.1007/s12665-016-6374-y.
- 33- Thai Pham, B.T. Tien Bui, D. Pourghasemi, H.R. Indra, P. Dholakia, M.B. (2015): *Landslide Susceptibility Assessment in The Uttarakhand Area (India) Using GIS: A Comparison Study of Prediction Capability of Naïve Bayes, Multilayer Perceptron Neural Networks, and Functional Trees Methods*. *Appl. Climatol.* 122 (3e4), 1e19.
- 34- Tien Bui Dieu, Biswajeet Pradhan, Owe Lofman, and Inge Revhaug, (2012): *Landslide Susceptibility Assessment in Vietnam Using Support Vector Machines, Decision Tree, A Naive Bayes Models*, *Mathematical Problems in Engineering*. Pp. 1-26, p 7.
- 35- Tien Bui Dieu, Tran Anh Tuan, Harald Klempe, Biswajeet Pradhan, Inge Revhaug, (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*, *Landslides*.
- 36- Tsangaratos P, Iliia I (2015): *Landslide Susceptibility Mapping Using a Modified Decision Tree Classifier in The Xanthi Perfection, Greece Landslides: 1-16* doi: 10.1007/s10346-015-0565-6.
- 37- Vapnik, V.N. (1995): *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York. 2 pp.
- 38- Yesilnacar, E, Topla, T, (2005). *Landslide Susceptibility Mapping a Comparison of Logistic Regression and Neural Networks Methods in A Medium Scale (Turkey)*. *Engineering Geology*, Vol. 79, Pp 251–266.

- 39- Zhao Y and Y. Zhang, (2008): "Comparison of Decision Tree Methods for Finding Active Objects," *Advances in Space Research*, Vol. 41, No. 12, Pp. 1955–1959.