Archive of SID

جغرافیا و توسعه شماره ۴۶ بهار ۱۳۹۶
وصول مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۱۶
تأیید نهایی : ۱۳۹۵/۰۸/۰۵
صفحات : ۲۴۶-۲۲۵

معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مبنا به منظور پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار

عطاالله شیرزادی[۱]، دکتر کریم سلیمانی[۲]، دکتر محمود حبیب‌نژاد روشن‌بها[۳]، دکتر عطاالله کاویان[۴]، دکتر کامران چپی*[۵]

چکیده

افزایش صحت و اعتماد و در نتیجه کاهش عدم قطعیت نقشه‌های پیش‌بینی مکانی مخاطرات زمینی از جمله زمین‌لغزش‌ها یکی از چالش‌های پیش رو در این گونه مطالعات می‌باشد. هدف این پژوهش ارائه یک مدل ترکیبی جدید داده کاوی الگوریتم- مبنا به نام Random Subspace-Random Forest (RS-RF)، برای افزایش میزان صحت پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار می‌باشد. در ابتدا، نوزده عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای معمولی شیب (Curvature)، تقعر و تحدب شیب (Profile curvature)، همگرایی و واگرایی شیب (Plan curcvature)، شدت تابش خورشید (Solar radiation)، شاخص قدرت جریان، شاخص نمناکی توپوگرافی، شاخص طول و زاویه شیب، کاربری ارضی، شاخص پوشش گیاهی، لیتولوژی، فاصله از گسل، تراکم گسل، بارندگی، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه و فاصله از شبکه جاده شناسایی شدند. سپس، بر اساس شاخص Information Gain Ratio دوازده عامل مؤثر از بین آن‌ها انتخاب و جهت مدل‌سازی به کار گرفته شدند. اهمیّت نسبی هر کدام از عوامل در مدل Random Forest و مدل ترکیبی RS-RF بررسی شدند. معیارهای Kappa، Precision، Recall، F-Measure، AUROC برای ارزیابی مدل‌ها هم برای داده‌های تعلیمی و هم برای داده‌های صحت‌سنجی استفاده شدند. نقشه‌های پیش‌بینی مکانی وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی با این دو مدل نیز به دست آمدند. نتایج نشان داد که در مدل RF جهت شیب و در مدل ترکیبی RS-RF درجه شیب مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه شناخته شدند. نتایج ارزیابی مدل توسط معیارهای معرفی شده بیانگر تأیید این مدل‌ها برای داده‌های تعلیمی و داده‌های صحت‌سنجی بودند. نتایج ارزیابی صحت نقشه پهنه‌بندی به دست آمده نشان داد که درصد مساحت زیر منحنی ROC (AUROC) برای داده‌های تعلیمی در مدل RF و مدل ترکیبی RS-RF ارائه شده به ترتیب ۰/۷۲۹ و ۰/۷۸۴ و برای داده‌های صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۱۷ و ۰/۷۷۱ به دست آمدند. بطور کلی، نتایج نشان داد که تکنیک Random Subspace منجر به افزایش صحت پیش‌بینی مکانی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه شده است. دستیابی به یک نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی با صحت بالاتر، کمک‌شایانی در توسعه‌ی معقول‌تر تأسیسات، اراضی شهری و روستایی، طرح‌های آمایش سرزمین، طرح‌های آبخیزداری و همچنین جلوگیری از هدر رفت خاک و فرسایش توده‌ای و انتقال رسوبات به پایین‌دست خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لغزش سطحی، الگوریتم، Random Forest، Random Subspace، بیجار

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی ساری، ساری، ایران Atashirzadi@gmail.com
۲- استاد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران Solaimani2001@Yahoo.comco.uk
۳- استاد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران Roshanbah@Yahoo.com
۴- دانشیار آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران Ataollah.kavian@yahoo.com
۵- استادیار آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران* K.Chapi@uok.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

توسعه‌ی پایدار هر کشور در گرو توسعه‌ی هماهنگ همه‌ی ساختارهای جغرافیایی، اجتماعی- اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد و در این راه لازم است علاوه بر عوامل لازم در توسعه، تمامی مخاطرات، تهدیدات و موانع توسعه‌ی پایدار هم شناخته شوند. یکی از مخاطرات محیطی که به عنوان یک مانع فیزیکی در راستای توسعه‌ی جغرافیایی یک منطقه ممکن است عمل نماید، حرکت‌های توده‌ای هستند که در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف در یک منطقه روی می‌دهند. زمین‌لغزش که نوعی خاصی از حرکت-های توده‌ای است، یک فرآیند تصادفی، ناپیوسته و ایزوله شده‌ای از مخاطرات طبیعی است که در سطح کوچک اما با فراوانی زیاد اتفاق افتاده و مقدار انتقال دبی رسوب ناشی از آن‌ها به آبراهه در زمان و مکان متغیّر (*Benda & Dunne, 1997:2849*) است. بروز آن‌ها می‌تواند ناشی از عوامل متعدد زمین‌شناسی (لیتولوژی)، ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و انسانی باشد. با این وجود، مهم‌ترین عوامل محرک زمین‌لغزش‌ها؛ بارندگی شدید، ذوب سریع برف، تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی، زمین‌لرزه و فرسایش با سرعت زیاد می‌باشند(*Sidle and Ochiai, 2006:129*). زمین‌لغزش‌ها به دو نوع زمین‌لغزش‌های عمیق و زمین‌لغزش‌های سطحی تفکیک می‌گردند. زمین‌لغزش‌هایی که درآن سطح لغزش اکثراً به صورت عمیق و زیر حداکثر عمق ریشه‌های درختان (معمولاً در عمق بیشتر از ۱۰ متر) واقع شده‌اند، زمین‌لغزش-های عمیق نامیده می‌شوند (*Acharya, 2011:45*). پژوهشگران معمولاً معتقدند که زمین‌لغزش‌های با عمق زیاد توسط بارندگی با شدت متوسط و مدت زیاد ایجادمی‌شود.درحالی‌که،زمین‌لغزش‌های‌سطحی‌هنگامی که عمق‌لغزشی کمتر از۲متر(*Rickli&Graf,2009: 3*) یا ۲ تا ۳ متر (*ابراهیمی و یزدی، ۱۳۹۲:1*) با ضخامت کم (۲-۰/۳ متر) داشته باشند، تعریف می‌شوند. بسیاری از پژوهشگرانی که زمین‌لغزش‌های سطحی را مطالعه کرده‌اند بر این باورند که معمولاً بارندگی عامل محرک زمین‌لغزش‌های سطحی با ابعاد معمولی از ۰/۵ تا ۱/۵ متر و مساحت اسکارپ از ۵۰ تا ۱۰۰۰ مترمربع و حجم‌هایی از چند تا چندین صد مترمکعب هستند (*Avanzi et al., 2004: 220*). بر اساس مطالعات انجام شده توسط شبکه‌ی موضوعی ژئوتکنیکی اروپا زمین‌لغزش به تنهایی ۱۷٪ از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است و میزان مرگ و میر ناشی از این پدیده طی سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۴ به‌ترتیب در آسیا ۲۹ درصد ، آمریکا ۳۹ درصد، اروپا ۳۰ درصد، آفریقا ۱ درصد و اقیانوسه ۱ درصد می‌باشد (*فعله‌گری و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۲۸*). از یک طرف، در دهه‌ی گذشته، پیش‌بینی مکانی حساسیت زمین‌لغزش‌ها به دلیل خسارت‌های مستقیم (خطرات جانی و مالی) و غیرمستقیم (آثار اکوسیستمی و زیست محیطی) به عنوان پیش درآمدی در مطالعه و ارزیابی خطر و ریسک زمین‌لغزش برای جوامع بین-المللی موضوع مهم پژوهش شده است. از طرف دیگر به دلیل رشد جمعیّت، توسعه‌ی مناطق شهری و افزایش مناطق نفوذ ناپذیر و جنگل‌زدایی و تخریب منابع طبیعی و همچنین بارندگی‌های‌منطقه‌ای به دلیل تغییرات اقلیمی درسال‌های اخیر فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در حال افزایش هستند (*Zare et al., 2013: 2874*). بنابراین، تعیین مناطقی که پتانسیل و استعداد وقوع زمین‌لغزش بالایی دارند بسیار حائز اهمیّت بوده و این روش می‌تواند کمک شایانی در کاهش خسارت‌های ناشی از آن‌ها بنماید.

پژوهش‌ها در مورد زمین‌لغزش‌ها در دو مقیاس مطالعه شده‌اند؛ در یک مکان مشخص با مقیاس کمتر از ۱:۵۰۰۰ از مساحت خیلی کم در حد متر مربع تا کل دامنه با استفاده از مدل‌های قطعی (استفاده از

www.SID.ir

Archive of SID

فاکتور اطمینان؛ تعادل میان تنش برشی و مقاومت برشی خاک) و ارزیابی‌های منطقه‌ای با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ تا ۱:۲۵۰۰۰ از مساحت‌های چند هکتاری تا هزاران کیلومتر مربع به کمک روش‌های کمّی و کیفی، می‌شوند. چالش اصلی در روش اول، تبدیل فاکتور اطمینان به عبارتی مفید و ملموس از خطر است که بتواند به عنوان مؤلفه‌ای برای ارزیابی ریسک زمین‌لغزش به کار برود. هدف اصلی ارزیابی‌های منطقه‌ای، تعیین شرایط زمانی و مکانی وقایع آینده بر اساس شرایط زمانی و مکانی وقایع اتفاق افتاده در گذشته می‌باشد. از آن‌جا که روش‌های قطعی نیاز به جمع‌آوری دقیق اطلاعات در ارتباط با خصوصیات مکانیکی خاک، تراز آب زیرزمینی، فشار آب منفذی، چسبندگی خاک و غیره داشته و امکان مطالعه زمین‌لغزش‌های با تعداد زیاد نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد هستند، محققان طی دهه‌ی اخیر به تهیه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری برای تعیین مناطق حساس روی آورده‌اند (Fell et al., 2008:104).

نقشه‌ی پهنه‌بندی بیانگر تفکیک یک ناحیه‌ی مشخص به وقوع (احتمال وقوع) زمین‌لغزش بر اساس فاکتورهای زیست محیطی آن منطقه (Wang et al., 2015: 271) در آینده براساس توزیع و پراکنش‌زمین-لغزش‌های اتفاق افتاده در گذشته (Yalcin, 2008: 1) و همچنین تفکیک مناطق بر اساس احتمال عدم وقوع زمین‌لغزش در آینده براساس موقعیت زمین‌لغزش‌های گذشته (Ballabio&Sterlacchini, 2011:4)، می‌باشد. به این دلیل که استاندارد خاصی برای تهیه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌ها وجود ندارد، مطالعات مختلف توسط فاکتورهای مؤثر مختلف مورد بررسی واقع شده است (Dou et al., 2015: 1750). از طرفی هم یک استاندارد و چهارچوب خاصی برای انتخاب عوامل اثرگذار بر وقوع زمین‌لغزش‌ها وجود نداشته (Ayalew & Yamagishi, 2005:29) و هنوز هم به دلیل طبیعت پیچیده زمین لغزش‌ها رسیدن به یک نقشه معقول پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش آسان نبوده با چالش روبه رو می‌باشد (Tien Bui et al., 2012a:2).

روش‌های کمی زیادی در مطالعات پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌ها تاکنون استفاده شده است، از جمله؛ شبکه عصبی مصنوعی (Dou et al.,2015;Tien Bui et al,2015)، رگرسیون‌دومتغیّره (Xu et al., 2012)، رگرسیون چند متغیّره (Akgun and Turk, 2011)، رگرسیون لجستیک (Shirzadi et al., 2012; Wang et al., 2013;Umar et al., 2014)، منطق فازی (Tien Bui et al., 2012b)، احتمال شرطی (Sujatha et al., 2012)، درخت تصمیم‌گیری (TienBui et al., 2014)، مدل دمپسر- شیفر (Park, 2010)، ماشین پشتیبان بردار (Tien Bui et al.,2015)، تئوری بیزین (Bayesian theorem) (Tien Bui et al., 2012a) وزن‌دهی شواهد (Tehrany et al., 2014; Guo et al., 2015) و غیره.

علاوه بر روش‌های اشاره شده، اخیراً برخی از محققان رو به استفاده از ترکیب مدل‌ها و روش‌های مختلف جهت افزایش صحت و دقت نقشه مکان‌یابی مخاطرات طبیعی آورده‌اند. به عنوان مثال؛ تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) به پهنه‌بندی نقشه حساسیت به سیل‌خیزی با ترکیب مدل احتمالاتی بر پایه‌ی تئوری بیزین (مدل WoE) و مدل ماشین پشتیبان بردار با توابع مختلف در ترنگانو در کشور مالزی اقدام نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که درصد مساحت زیر منحنی نقشه پهنه‌بندی به دست آمده در مدل SVM با تابع RBF در ترکیب با مدل WoE نسبت به سایر ترکیب‌ها به ترتیب در داده‌های تعلیمی ۹۶/۴۸ و برای داده‌های صحت‌سنجی مقدار ۹۵/۶۷ به دست آمدند.

www.SID.ir

Archive of SID

دهنوی و همکاران (۲۰۱۵) زمین‌لغزش‌های ایران را به کمک یک مدل استنباطی شبکه عصبی- فازی در ترکیب با روش نسبت ارزیابی وزن گام به گام[1] بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بیان‌گر افزایش صحت نقشه‌ی پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها با افزایش در درصد مساحت زیر منحنی داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی در مدل ترکیبی ارائه شده است.تمامی روش‌های کمی در مطالعات پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌ها نیاز به صحت‌سنجی دارند *(Guzzetti et al. 2006:167)*. اگرچه مدل‌ها و روش‌های زیادی در دنیا برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی‌حساسیت زمین‌لغزش‌ها به‌کار گرفته‌شده‌اند، با این حال، نیاز ضروری به‌استفاده از روش و تکنیک‌هایی برای افزایش صحت پیش‌بینی زمین- لغزش‌ها در مقیاس منطقه‌ای وجود دارد. بنابراین، مهم‌ترین اهدافی که در این پژوهش دنبال می‌شوند عبارتند از: ۱- انتخاب فاکتورهای مهم‌تر و مؤثرتر در وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه ۲- ارائه یک مدل جدید ترکیبی داده‌کاوی الگوریتم مبنا به نام "Random Subspace-Random Forest (RS-RF)" جهت رسیدن به یک تخمین معقول و دقیق از پیش‌بینی‌مکانی با پتانسیل‌های‌مختلف‌زمین‌لغزش‌های سطحی در اطراف شهر بیجار.

داده‌ها و روش انجام پژوهش

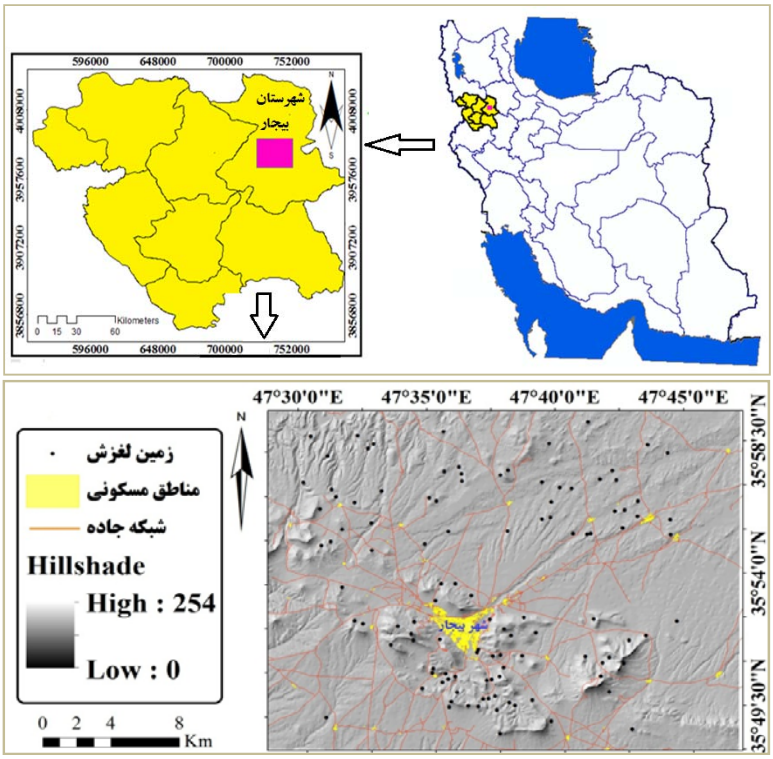
موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان بیجار در طول جغرافیایی ″۵۱ ,′۰۴ ,°۴۷ تا ″۰۸′,۲۵ ,°۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ″۰۵′,۵۹ ,°۳۵ تا ″ ۱۲,′۰۹ ,°۳۶ شمالی جای گرفته است. منطقه‌ی مورد مطالعه زمین‌لغزش‌های اطراف شهرستان بیجار در مساحتی حدود ۵۹۸ کیلومتر مربع را شامل می‌گردد. از نظر توپوگرافی و فیزیکی، حداکثر، حداقل و میانگین ارتفاع از سطح دریا به ترتیب ۱۵۷۳، ۲۵۵۰ و ۱۸۹۸ متر با اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه حدود ۹۷۷ متر می‌باشد. حداقل و حداکثر و میانگین درجه شیب به ترتیب صفر، حدود ۶۰ و ۶/۲۷ درجه می‌باشد. تیپ غالب اراضی منطقه دشت با تپه‌ماهورهای فراوان را شامل می‌گردد. از نظر زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه متعلق به زون سنندج- سیرجان در سه گروه شامل‌دوره‌ی کواترنر(دوران سنوزوئیک)، دوره‌ی ترسیر (دوران‌سنوزوئیک) و دوره‌ی کرتاسه (مزوزوئیک) با غالبیت جنس سنگ‌های کربناته، دولومیت‌های پرمین و کارست، سنگ آهک در ارتفاعات و مارن با تناوبی از شیل، ماسه سنگ و کنگلومرا در مناطق تپه ماهوری و دشت‌ها تفکیک می‌گردد. میانگین بارندگی سالیانه، حداکثر دمای سالیانه، حداقل دمای سالیانه، میانگین سالیانه دما به‌ترتیب ۳۴۴ میلی‌متر، ۳۱/۷ درجه سانتی‌گراد، ۶/۹- درجه سانتی‌گراد و ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر اقلیم بر طبق تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن با ضریب ۱۶/۵ اقلیم نیمه خشک و بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه با ضریب ۳۱/۲ اقلیم از نوع نیمه‌خشک سرد می‌باشد *(حنفی و حاتمی، ۱۳۹۲: ۲۷)*. از نظر کاربری اراضی بیشتر منطقه تحت پوشش کاربری اراضی زراعی با غالبیت کشت دیم از نوع گندم و جو می‌باشد.از نظر ژئومورفولوژی منطقه‌ی مورد مطالعه در بین دو گسل اصلی تبریز در شرق و ارومیه یا زرینه رود در غرب واقع است، در نتیجه کوه‌های‌گنبدی با دامنه‌های ملایم،یکنواخت و دره‌های باز ایجاد شده است. اکثر زمین‌لغزش‌های استان کردستان به دلیل نزدیکی سنگ بستر به سطح زمین دارای عمق کم و به صورت سطحی اتفاق می‌افتند. به دلیل حساسیت سازندهای شهرستان بیجار در شرق استان کردستان به فرسایش متمرکز و غیرمتمرکز، زمین‌لغزش‌های این منطقه برای مطالعه انتخاب شدند (شکل ۱).

1-Stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه در استان کردستان و ایران

مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴

نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌های‌سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

تعیین دقیق محل وقوع زمین لغزش‌ها و ایجاد یک پایگاه مکانی داده‌ای جهت مطالعات آینده خطر و ریسک آن‌ها ضروری می‌باشد. هر چند تعیین محل دقیق و تعیین مساحت اسکارپ هنوز با چالش موجه بوده و زمان بر نیز می‌باشد. با این حال، تعیین محل دقیق زمین‌لغزش‌ها مستلزم پیمایش صحرایی در عرصه و نیز چک کردن مناطق ثبت شده از روی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش، اطلاعات محل وقوع زمین‌لغزش‌ها از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه و سپس با استفاده از پیمایش صحرایی، تفسیر عکس‌های هوایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث تفسیر و محل وقوع برخی از آن‌ها اصلاح شد. پیمایش صحرایی زمین‌لغزش‌ها نشان داد که تشکیلات سست و حساس زمین‌شناسی سازندهای دوران چهارم (کواترنر) به فرسایش آبی، قطع نادرست دامنه در امتداد جاده هنگام احداث و تعریض جاده، نحوه‌ی ساختار و لایه‌بندی خاک در پروفیل خاک و تغییر کاربری ارضی در مناطق تپه ماهوری و تبدیل و شخم غیراصولی دامنه‌ها ازعوامل اصلی‌ایجاد زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه موردمطالعه بوده‌اند. همچنین پیمایش صحرایی نشان داد که نوع لغزشی، پیچیده و ریزشی و به ترتیب با فراوانی ۷۰/۶، ۲۲/۴ و ۶/۳ درصد،بیشترین نوع زمین‌لغزش‌ها را به خود اختصاص دادند. مساحت پهنه‌های لغزشی در منطقه مورد مطالعه از ۱×۱۰^{۳} تا ۱×۱۰^{۵} متر مربع و با عمق کمتر از ۳ متر با شامل می‌شوند. جنس زمین شناسی در محل وقوع زمین‌لغزش‌ها بیشتر از نوع مارن در تناوب با کنگلومرا و ماسه سنگ می‌باشند. در مجموع ۱۱۱ نقطه (مرکز پهنه‌ها) به‌عنوان مناطق مستعد به زمین‌لغزش سطحی

www.SID.ir

Archive of SID

شناسایی و به دو دسته شامل ۷۰درصد داده‌های آموزشی برای تعلیم و اجرای‌مدل و ۳۰درصد داده‌های آزمون جهت صحت‌سنجی طبقه‌بندی شدند(شکل ۱). همچنین،تعداد ۱۱۱مکان به‌عنوان مناطقی که زمین-لغزش در آنجا اتفاق نیفتاده، به صورت کاملاً تصادفی انتخاب و شبیه به مرحله مدل‌سازی و صحت‌سنجی به دو دسته ۷۰ و ۳۰ درصد طبقه‌بندی شدند.

عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی

نخستین مرحله در تهیه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه‌ی مورد مطالعه، تبدیل لایه‌های وکتوری (برداری) به لایه‌های رستری می‌باشد.اندازه‌ی تفکیک مکانی[1] تمامی لایه‌ها ۲۰×۲۰ متر بوده که به اندازه‌ی کافی برای قرار گرفتن خصوصیات مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی کوچک بوده و نیز به اندازه کافی برای کاهش پیچیدگی محاسبات بزرگ می‌باشد. مطالعه‌ی حاضر در ابتدا بر اساس تهیه‌ی نقشه‌ی موقعیت جغرافیایی زمین‌لغزش-های سطحی بر اساس پیمایش صحرایی و همچنین چک کردن آن‌ها از طریق عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ آغاز شد. از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج شده با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و تفکیک مکانی ۲۰ متر در ۲۰ متر، نقشه‌ی رقومی زمین‌شناسی شهرستان بیجار با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین شناسی کشور در سال ۱۳۹۴، تصویر ماهواره‌ای ETM^+ منطقه‌ی مورد مطالعه سال ۲۰۰۵ برگرفته از سایت GLOVIS[2]، عکس‌های هوایی سال ۱۳۸۱ با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰، پرسشنامه‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان، نوزده 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، تقعر و تحدب شیب، همگرایی و واگرایی شیب، شدت تابش خورشید، شاخص قدرت جریان، شاخص نمناکی توپوگرافی، شاخص طول و زاویه شیب دامنه از نقشه‌ی رقومی ارتفاع در محیط Arc GIS10.2 ساخته شدند. نقشه‌ی کاربری ارضی و شاخص پوشش گیاهی[3] از تصویر ماهواره‌ای ETM^+ منطقه‌ی مورد مطالعه سال ۲۰۰۵، نقشه‌های لیتولوژی (جنس سنگ‌شناسی)، فاصله از گسل و تراکم گسل از نقشه زمین‌شناسی شهرستان بیجار با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌ی بارندگی یا خطوط همباران بر اساس رابطه‌ی رگرسیونی بین ارتفاع و میانگین بلندمدت سالیانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و خارج محدوده‌ی مورد مطالعه، نقشه‌های فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه و فاصله از شبکه جاده به ترتیب براساس فواصل از اطراف شبکه‌ی آبراهه‌ها و شبکه‌ی جاده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه شد.

روش انجام پژوهش

انتخاب مؤثرترین عوامل در مدل‌سازی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی

تکنیک‌های متعددی برای تشخیص‌صلاحیت و قابلیت پیش‌بینی متغیّرهای اثرگذار بر وقوع یک پدیده وجود دارند؛از جمله *Fuzzy-Rough Sets(Dubois & Prade, 1990)*، *Information Gain (IG) (Hunter et al, 1993)* *Information Gain Ratio (IGR)(Quinlan, 1966)* پایه و اساس IG، تئوری اطلاعات[4] است که با کاهش آنتروپی، صلاحیت اهمیّت‌دار بودن عوامل مؤثر را تعیین کرده و به عنوان یک تکنیک استاندارد برای اندازه‌گیری توانایی پیش‌بینی عوامل اثرگذار بر وقوع یک پدیده در روش داده کاوی بررسی می‌گردد *(Thien Bui et l., 2014;7)*. با این دحال، IG یک انحراف طبیعی است که به سمت مشخصه‌های صلاحیت‌دار با مقادیر احتمال بالا تمایل داشته که این حالت ممکن است به یک قابلیت پیش‌بینی کم از

1-Resolution
2-The USGS Global Visualization Viewer
3-Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
4-Information Theory (IT)

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج مدل‌ها منجر شود. برای غلبه بر این موضوع، *Quinlan (1993)*، شاخص *IGR* را به این ترتیب پیشنهاد داد که مقادیر *IGR* بالاتر نشان‌دهنده‌ی توانایی پیش‌بینی بالاتر آن عامل مؤثر برای مدل‌سازی است. بنابراین، جهت شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه‌ی مورد مطالعه، از میان ۱۹ عامل مؤثر معرفی شده، 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(زمین لغزش، بدون زمین لغزش) باشد، در این صورت داریم:

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

با توجه به عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، مقدار اطلاعات مورد نیاز برای تقسیم S به مجموعه $(S_1، S_2، ... ،S_m)$، از رابطه‌ی زیر برآورد می‌گردد:

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

شاخص *IGR* برای یک عامل مؤثر خاص مثل فاکتور A (به عنوان مثال: درجه شیب) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن Split Info نشان‌دهنده‌ی اطلاعات تولید شده توسط تقسیم S داده‌های آموزشی به m زیر مجموعه است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

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

الگوریتم Random Forest (RF)

این‌الگوریتم ترکیبی از پیش‌بینی‌کننده‌های الگوریتمی درخت تصمیم[1] است که توسط *Breiman* در سال ۲۰۰۱ ارائه شد *(Miao, 2015: 772)*. این الگوریتم چندین درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی[2] را ایجاد و در نهایت نتیجه‌ی کلاس‌بندی در میان تمامی درختان در یک مجموعه به‌نام جنگل*(Forest)* تعیین می‌گردد. فرآیند اجرای این الگوریتم به صورت زیر در چندین مرحله می‌باشد *(Breiman, 2001:4)*.

۱- ایجاد چندین گروه از نمونه‌های کوچک‌تر به صورت تصادفی و خود راه‌انداز[3] که این فرآیند Bagging نامیده می‌شود. برای هر گروه خود راه‌انداز، نمونه‌های انتخاب نشده که OOB[4] تعریف می‌شوند، به عنوان نمونه تست(صحت‌سنجی) جهت محاسبه‌ی آماره‌ی تست در مدل Random Forest استفاده می‌شوند.

۲- یک درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی برای هر کدام از زیرگروه‌های خود راه‌انداز رشد می‌یابد. به این ترتیب که فرآیند bootstrap-CART برای نمونه‌ها ۵۰۰ بار تکرار و نیز تعداد ۵۰۰ عدد از CARTها ایجاد می‌گردد.

۳- هنگامی که یک نمونه تست و یا یک نمونه‌ی جدید وارد این جنگل یا مجموعه شود، الگوریتم، داده‌ها را برای هر شاخه یا گروه جهت طبقه‌بندی آن‌ها توزیع و تقسیم می‌کند. نتیجه‌ی طبقه‌بندی نهایی در میان نتایج این مجموعه، تصویب و مشخص می‌گردد.

۴- نمونهOOB به عنوان تست استفاده می‌شود و نسبت انتخاب‌های اشتباه در طبقه‌بندی برای ارزیابی کارایی مدلRandomForest محاسبه می‌گردد.

۵- فرآیند تصادفی Bagging برای اطمینان پایداری یا تداوم بیشتر ترسیم می‌گردد. فرایندهای تصادفی دو نمونه در طول ترسیم (در فرآیند bootstrap و انتخاب‌گره‌ها در فرآیند CART) یک اطمینان از

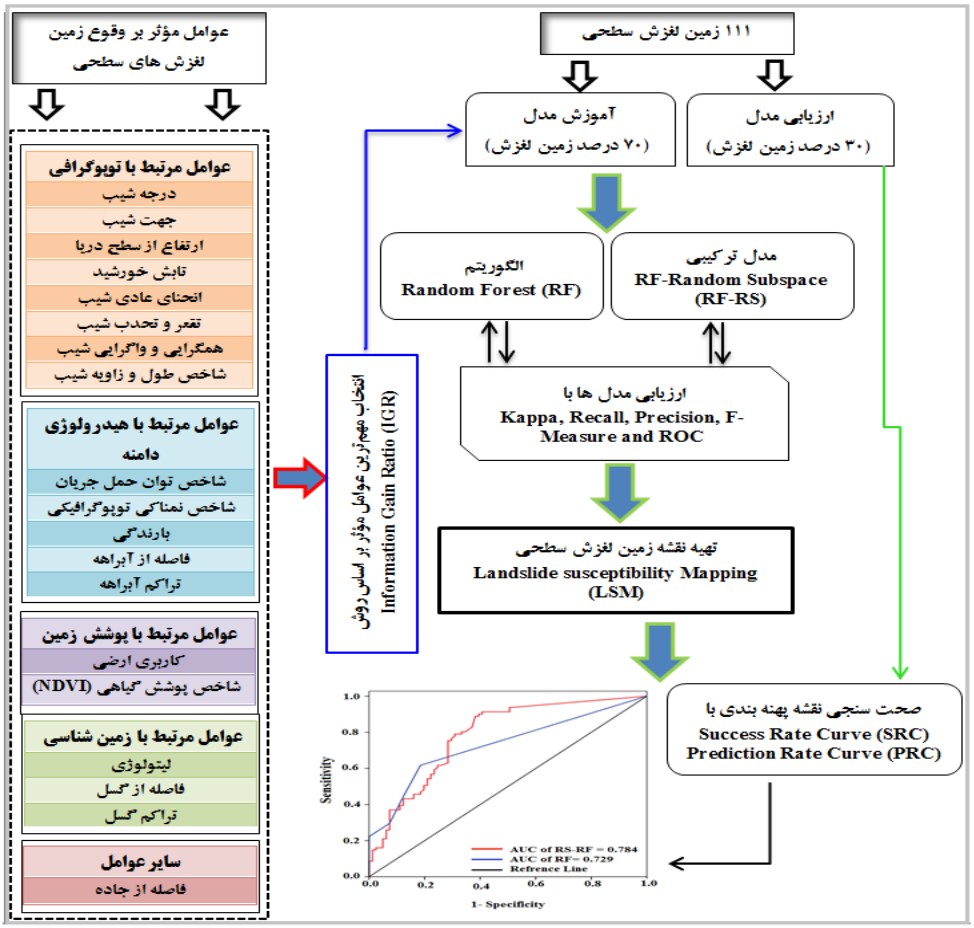
1-Decision Tree (DT)
2-Classification and Regression Tree(CART)
3-Bootstrap
4-Out of Bag

www.SID.ir

Archive of SID

صحت بالاتر در پیش‌بینی طبقه‌بندی نمونه‌ها بدون ایجاد پدیده Over-fitting در داده‌ها را فراهم می‌آورد. علاوه بر این به دلیل رشد و توسعه‌ی تعداد زیاد درختان در این مجموعه (*Forest*) خطای سیستمی در تعمیم‌گرایی[1] می‌تواند محدود شود.

این الگوریتم منجر به افزایش تنوع در میان درختان طبقه‌بندی توسط تکرار در نمونه‌ها با جایگزینی و تغییرتصادفی گروه‌های متغیّرهای پیش‌بینی‌کننده در درختان مختلف می‌گردد (*Youssef et al., 2015:9*) بطوری‌که این‌افزایش تنوع باعث افزایش صحت طبقه‌بندی نمونه‌ها می‌گردد. برای اطلاعات بیشتر به مقاله Jing-chun et al., (2015) رجوع شود. شکل شماره ۲ روش انجام پژوهش در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲: فلوچارت روش‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

1-Generalization

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم Random Subspace (RS)

الگوریتم random subspace (RS) توسط آقای هو (Ho) در سال ۱۹۹۸ به عنوان یک الگوریتم یادگیری موازی[1] برای بهبود عملکرد طبقه‌بندی در روش‌های داده‌کاوی ارائه شد. این الگوریتم ابتدا از طریق تقسیم داده‌های مکانی اصلی[2] به‌نام FR به L تعداد داده‌های کوچک‌تر (زیرگروه‌ها)[3] به نام FS با p خصوصیات ابعادی مکانی[4] و سپس اجرای الگوریتم مبنا[5] برای هر دسته از داده‌های کوچک‌تر و ترکیب نتایج آن‌ها باعث افزایش عملکرد در طبقه‌بندی در حالتی که فقط از یک الگوریتم مبنا استفاده می‌شود، می‌گردد *(Piao et al., 2015:1)*. شکل شماره‌ی ۳ ساختار عملکردی‌تکنیک الگوریتم‌ترکیبی RS را نشان می‌دهد. اگر هر کدام از داده‌های تعلیمی زمین‌لغزش‌ها را $X_i(X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{ip})$ باابعادمکانی $X_i(i=1, 2, \ldots, n)$ فرض کنیم، در این الگوریتم ترکیبی، یک انتخاب تصادفی در داده‌ها با شرط $r > p$ ایجاد می‌گردد. بطوری که زیر گروه‌های تصادفی با r بعد از داده‌های مکانی‌اصلی با p بعد ایجادمی‌گردند.بنابراین گروه‌های تعلیمی ایجاد شده $\tilde{X}^b = (\tilde{X}_1^b, \tilde{X}_2^b, \ldots, \tilde{X}_n^b)$ از r مؤلفه‌باعنوان $\tilde{X}^b = (\tilde{X}_{i1}^b, \tilde{X}_{i2}^b, \ldots, \tilde{X}ir^b), (i=1, 2, \ldots, n)$ به صورت تصادفی از p مؤلفه $x_{ij}(j=1, 2, \ldots, p)$ داده‌های برداری تعلیمی Xi انتخاب می‌شوند. سپس یک طبقه‌بندی در RS به نام $\tilde{X}^b$ ساخته شده و ترکیب آنها منجر به نتیجه‌ی نهایی الگوریتم خواهد شد.بنابراین این الگوریتم طیّ مراحل زیرعمل می‌کند:

۱- تکرار در داده‌های تعلیمی $b = 1, 2, \ldots, B$

۱-۱- انتخاب r بعد به صورت تصادفی از داده‌ای مکانی به نام $\tilde{X}^b$ از داده‌های p بعد مکانی اصلی با خصوصیت فضای X

۱-۲- ساختن یک طبقه‌بندی $C^b(x)$ از طریق تصمیم مرزی $C^b(x) = 0$ در $\tilde{X}^b$

۲- ترکیب طبقه‌بندی $C^b(x), b = 1, 2, \ldots, B$ از طریق رأی اکثریت[6] برای رسیدن به یک نتیجه نهایی از طریق معادله زیر:

(۵)

$$\beta(x) = argmax \sum_{b}^{\delta} sgn\left(C^b(x)\right), y; y \in \{-1, 1\}$$

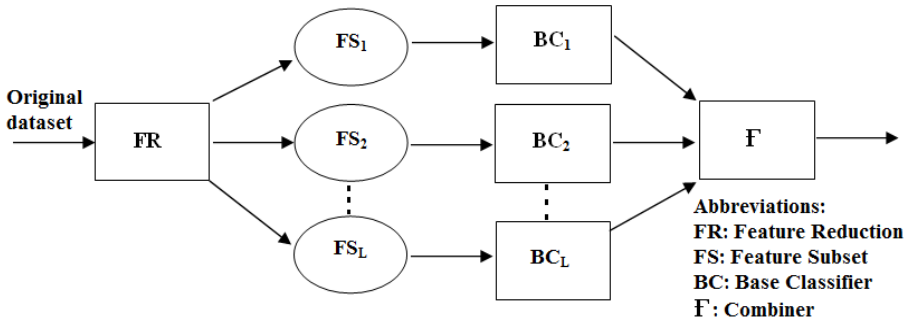
که در آن؛ $\delta_{i,j}$ نشانه Kronecker و $y \in \{-1, 1\}$ برچسب کلاس عوامل مؤثر برای طبقه‌بندی می‌باشند.

1-Parallel Learning Algorithm (PLA)
2-Original Feature Space (FR)
3-Feature Subsets (FS)
4-P-dimensionality
5-Base Classifier (BC)

6-Majority vote

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳: ساختار الگوریتم Random Subspace (RS)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

مدل ترکیبی Random Subspace-Random Forest (RS-RF)

بر این اساس ابتدا بر روی داده‌های تعلیمی الگوریتم Random Subspace به عنوان یک Meta classifier اعمال و سپس الگوریتم Random Forest به عنوان یک decision tree در قسمت classifier انتخاب می‌گردد. به این ترتیب یک‌انتخاب تصادفی در داده‌های تعلیمی ایجاد و با استفاده از الگوریتم Random Forest برای هر داده زمین‌لغزش یک عدد احتمال بین صفر و یک محاسبه می‌گردد. در مرحله‌ی بعد همین روند برای داده‌های صحت‌سنجی تکرار و نتایج مدل‌سازی محاسبه می‌گردند. مدل‌سازی الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF در محیط نرم‌افزار Weka 3.7.12 انجام شد.

معیار و ملاک‌های ارزیابی مدل‌سازی با الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های‌سطحی‌توسط معیارهای درصدمساحت زیر منحنی ROC[1]، دقت[2]، صحت[3]و شاخص کاپا[4] بررسی شد. بر این‌اساس،در مدلی که مقادیر معیارهای اشاره شده به سمت یک تمایل داشته باشند، مدل مناسبی شناخته می‌شود *(Bui et al., 2015:10)*. نتیجه معیارهای‌مدل‌سازی در مناطقی که زمین‌لغزش حضور دارند و یا حضور ندارند به صورت دوگانه مثبت و منفی[5] می‌باشند. این طبقه‌بندی به ایجاد چهار حالت شامل TP، TN، FP و FN می‌شود که در آن به ترتیب‌عبارتند از:تعداد پیکسل زمین‌لغزش‌هایی (کد۱) که به درستی به عنوان زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند (TP)،تعداد پیکسل عدم‌حضور زمین‌لغزش‌هایی (کد صفر)است‌که به‌اشتباه به عنوان زمین‌لغزش طبقه‌بندی می‌شود (FP)، تعداد پیکسل عدم حضور زمین‌لغزش-هایی که به درستی به عنوان عدم حضور زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند (TN)، تعداد پیکسل حضور زمین‌لغزش‌هایی که به اشتباه به عنوان عدم حضور زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند (FN) *(Tsangaratos and Benardos, 2014:1498)*.

در نهایت بهترین نتیجه از این چهار حالت زمانی است که مقدار TP زیاد و مقدار FP کم باشد *(Althuwaynee et al., 2014: 1076)*.

$$AUC_{ROC} = \sum TP + \sum TP \,/ P + N \qquad (۶)$$

که در آن P و N به ترتیب تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزش و عدم حضور زمین‌لغزش می‌باشند.

1-Area Under the ROC curve (AUROC)
2-Precision
3-Recall
4-Kappa

5-Positive and Negative

www.SID.ir

Archive of SID

$$Precision = TP/TP + FP \quad (۷)$$

$$Recall = TP/TP + FN \quad (۸)$$

$$Kappa = P_{obs} - P_{\exp}/1 - P_{\exp} \quad (۹)$$

$$P_{obs} = TP + FN/TP + FP + TN + FN \quad (۱۰)$$

$$P_{\exp} = \left(\frac{(TP+FN)\times(TP+FP)+(FP+TN)\times(FN+TN)}{\sqrt{TP+FN/TP+FP+TN+FN}} \right) \quad (۱۱)$$

بررسی اهمیّت نسبی نقش عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

نقش اهمیّت نسبی عوامل اثرگذار بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی توسط همان ملاک‌ها و معیارهای ارزیابی در مرحله‌ی مدل‌سازی انجام می‌گردد. چرا که بعضی از این عوامل ممکن است در یک مدل نقش بسیار بالایی داشته باشند در حالی که برای یک مدل دیگر چندان مفید نباشند و بالعکس *(Tien Bui et al., 2015:11)*. در این مطالعه ابتدا هر یک از عوامل اثرگذار از مدل‌سازی حذف و مقدار ROC با زمانی که سایر متغیّرها به ترتیب حذف می‌شوند، مقایسه و به این ترتیب اهمیّت نسبی هر کدام از عوامل در هر دو روش مشخص می‌گردد.

نتایج و بحث

تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثربر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

جدول شماره ۱ نتایج میانگین شاخص IGR را برای نوزده عامل مؤثر انتخاب شده بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر این اساس، بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب به عوامل درجه‌شیب،شاخص‌نمناکی توپوگرافی، همگرایی و واگرایی شیب، تابش خورشید، شاخص قدرت حمل جریان، ارتفاع از سطح دریا، کاربری ارضی، جهت شیب، انحنای معمولی شیب، بارندگی و تقعر و تحدب شیب اختصاص یافتند. در حالی که عوامل فاصله از جاده، شاخص تراکم پوشش گیاهی، فاصله از گسل، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و لیتولوژی به دلیل اختصاص مقدار صفر برای این شاخص با ایجاد یک حالت نویز منجر به اثرگذاری منفی بر نتایج مدل سازی شده و همچنین به دلیل تأثیرگذاری ناچیز بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه‌ی‌مورد مطالعه از مدل‌سازی نهایی حذف و مدل‌سازی با دوازده فاکتور باقیمانده انجام شد.

جدول ۱: تعیین مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی در منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس میانگین IGR

عوامل مؤثر	میانگینIGR	عوامل مؤثر	میانگینGR
درجه شیب	۰/۶۵۴۴	بارندگی	۰/۰۵۱۲
شاخص نمناکی توپوگرافی	۰/۴۷۷۴	تقعر و تحدب شیب	۰/۰۳۸۱
همگرایی و واگرایی شیب	۰/۴۳۸۱	فاصله از جاده	۰/۰۰۰
عامل طول و زاویه شیب	۰/۱۹۴۸	فاصله از گسل	۰/۰۰۰
تابش خورشیدی	۰/۱۱۷۹	NDVI	۰/۰۰۰
شاخص قدرت حمل جریان	۰/۱۱۵۷	تراکم گسل	۰/۰۰۰
ارتفاع از سطح دریا	۰/۱۱۱۴	تراکم آبراهه	۰/۰۰۰
کاربری ارضی	۰/۰۸	فاصله از آبراهه	۰/۰۰۰
جهت شیب	۰/۰۷۱۵	لیتولوژی	۰/۰۰۰
انحنای معمولی شیب	۰/۰۶۴۷	-----	-----

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

www.SID.ir

Archive of SID

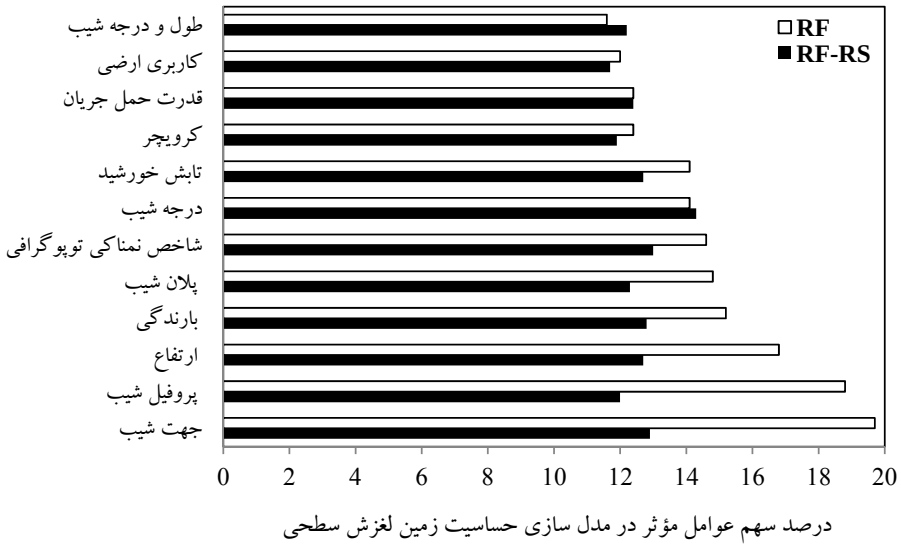
اهمیّت نسبی نقش عوامل مؤثر بر وقوع زمین-لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

نتایج بررسی اهمیّت هر کدام از عوامل به ترتیب اولویت در هر دو روش در شکل شماره ۴ مشهود است. بر این اساس، مهم‌ترین عوامل در مدل Random Forest به ترتیب عبارتند از جهت شیب، پروفیل شیب (تقعر و تحدب شیب)، ارتفاع، پلان شیب (همگرایی و واگرایی شیب)،شاخص نمناکی‌توپوگرافی، درجه شیب، تابش خورشید، انحنای معمولی شیب، قدرت حمل جریان، کاربری ارضی و عامل طول و درجه شیب (LS/STI)، در حالی که مهم‌ترین عوامل مؤثر در مدل ترکیبی RF-RS به ترتیب عبارتند از درجه شیب، شاخص نمناکی توپوگرافی، جهت شیب، بارندگی، تابش خورشید، ارتفاع، قدرت حمل جریان، پلان شیب، طول و درجه شیب، پروفیل شیب، انحنای شیب و کاربری ارضی. جهت شیب از نظر برخورداری از میزان انرژی خورشید بر وقوع زمین‌لغزش می‌تواند اثرگذار باشد، بطوری که در نیم‌کره شمالی شیب‌هایی که رو به سمت غرب و شمال هستند نسبت به شیب-های شرقی و جنوبی به دلیل دریافت کمتر شدت تابش دارای رطوبت بیشتر و مقاومت برشی خاک کمتر بوده و در نتیجه احتمال وقوع این نوع از حرکت‌های توده‌ای زمین نیز بیشتر خواهد بود *(شیرانی و عرب‌عامری،۱۳۹۴: ۳۳۱)*.توزیع زمین‌لغزش‌ها بر روی جهت‌های شیب نشان می‌دهد که بیشتر از ۵۰ درصد آن‌ها در شیب‌های غربی و شمالی رخ داده‌اند و کمتر از ۴۸ درصد در شیب‌های جنوبی و شرقی رخ داده‌اند. نتایج به دست آمده نیز با نتایج شیرانی و عرب عامری (۱۳۹۴) در اثرگذاری عامل جهت شیب بر وقوع زمین‌لغزش مطابقت دارد.

عامل جهت شیب در مدل RF به درجه شیب در مدل ترکیبی جدید تغییر یافت. از آن‌جا که زمین‌لغزش در شیب‌های کمتر به‌دلیل برتری نیروهای مقاومت برشی نسبت به تنش برشی کمتر *(شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴: ۳۳۱)* در شیب‌های خیلی زیاد هم به دلیل عدم توسعه و وجود خاک با ضخامت قابل ملاحظه کمتر به وقوع می‌پیوندد. بنابراین در شیب‌های میانه با تساوی سایر شرایط می‌توان انتظار تعداد وقوع زمین‌لغزش بیشتری داشت. با این حال، به دلیل تپه ماهوری بودن و اختلاف ارتفاع کم ناهمواری‌های منطقه‌ی مورد مطالعه (۹۷۷ متر) توزیع زمین‌لغزش در کلاس‌های درجه شیب نشان داد که حدود ۷۰ درصد از آن‌ها در شیب‌های کمتر از ۱۵ درجه (حدود ۲۷ درصد) رخ داد داده‌اند و فقط ۵/۴ درصد در شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه (حدود ۵۸ درصد) که تنها ۱/۸ درصد منطقه را فرا گرفته‌اند، اتفاق افتاده‌اند. این نتیجه با نتایج عابدینی و همکاران (۱۳۹۳) مبنی درجه شیب به عنوان اثرگذارترین عامل بر روقوع زمین لغزش مطابقت دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: اهمیّت نسبی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار با مدل RF و مدل ترکیبی جدید RF-RS

مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴

مدل‌سازی و ارزیابی کارایی الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF با داده‌های تعلیمی (Training dataset)

جدول شماره‌ی ۲ نتایج ارزیابی مدل‌سازی با دو الگوریتم RF و RS-RF برای داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. مشاهده‌ی جدول نشان می‌دهد که معیارهای کاپا، نرخ TP[1]، نرخ FP[2] دقت، صحت و مساحت زیر منحنی ROC برای داده‌های تعلیمی در مدل RF به ترتیب ۰/۹۸۷، ۰/۹۹۴، ۰/۰۰۶، ۰/۹۹۴، ۰/۹۹۴ و ۱ می‌باشند. در حالی که این مقادیر به ترتیب برای مدل ترکیبی جدید ارائه شده دارای مقادیر ۱، ۱، ۰، ۱، ۱ و ۱ می‌باشند. از طرفی نتایج این مقادیر برای داده‌های صحت‌سنجی در مدل RF شامل ۰/۴۶۷، ۰/۷۳۳، ۰/۲۶۷، ۰/۷۷۸، ۰/۷۳۳ و ۰/۸۶۸می‌باشند. درحالی‌که این مقادیر به ترتیب برای مدل ترکیبی جدید ارائه شده دارای مقادیر ۰/۴۶۷، ۰/۷۳۳، ۰/۲۶۷، ۰/۸۲۶، ۰/۷۳۳ و ۰/۸۷۴ می‌باشند. این نتایج حاکی از آن است که تمامی این مقادیر در مدل ترکیبی جدید ارائه شده نسبت به مدل دیگر دارای مقادیر بالاتری می‌باشند. این در حالی است که مقدار نرخ TP این مدل نیز کمتر از مدل RF می‌باشد. بنابراین اگرچه مدلRF نیز کارایی خوبی از خود نشان داد اما کارایی تکنیک Random Subspace به کمک مدل RF به میزان کارایی مدل افزوده است.

1-True Positive Rate (TPR)
2-False Positive Rate (TPR)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲: ارزیابی مدل سازی داده‌های تعلیمی و آموزشی با الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF

شاخص	داده‌های تعلیمی		داده‌های صحت سنجی	
	RF	RF-RS	RF	RF-RS
شاخص کاپا (Kappa)	0.987	1	0.467	0.467
نرخ TP	0.994	1	0.733	0.733
نرخ FP	0.006	0	0.267	0.267
دقت (Precision)	0.994	1	0.778	0.826
صحت (Recall)	0.994	1	0.733	0.733
مساحت زیر منحنی ROC(AUROC)	1	1	0.868	0.874

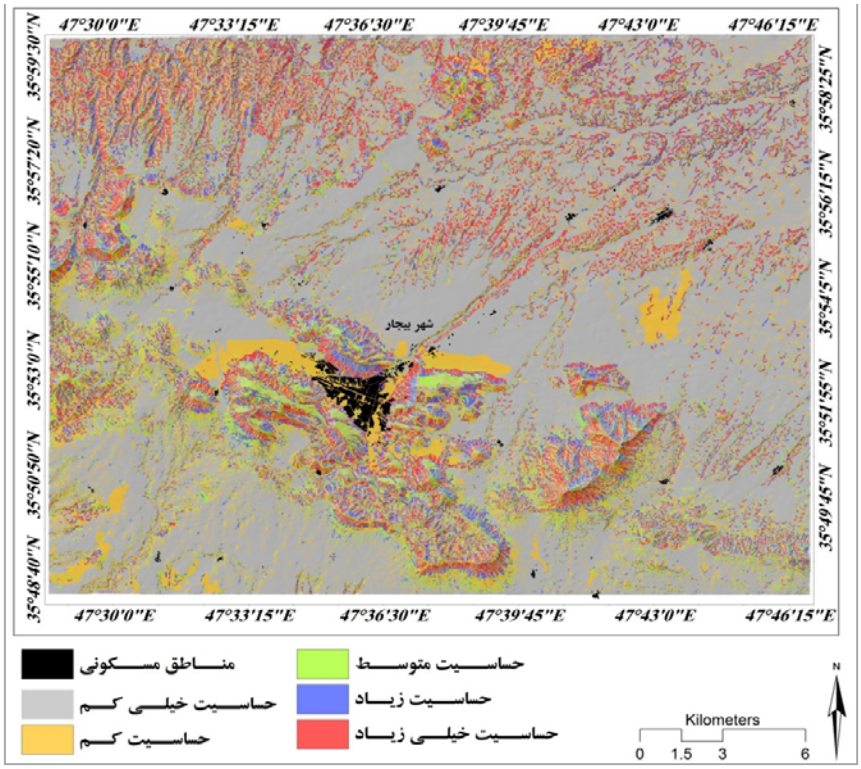
مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴

تهیه‌ی نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

بر اساس توضیحات بخش روش انجام پژوهش، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش سطحی بر اساس الگوریتم‌های RF و ترکیب دو الگوریتم یعنی RS-RF با روش Quintile در محیط ArcGIS به پنج کلاس با حساسیت خیلی کم (بدون حساسیت)، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت بالا و حساسیت خیلی بالا طبقه‌بندی و تهیه شدند. شکل‌های شماره ۵ و ۶ این نقشه‌ها را به ترتیب برای روش RF و مدل ترکیبی RS-RF نشان می‌دهند. مشاهده‌ی این شکل‌ها نشان می‌دهد که از سمت خط‌الرأس‌ها به سمت پاشنه دامنه‌ها به مقدار حساسیت وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی افزوده شده است؛ بطوری که این مناطق را می‌توان پر رنگ‌تر مشاهده کرد. همچنین مشاهده این شکل‌ها نشان می‌دهد که مناطق بدون شیب و فلات دارای حساسیت خیلی‌کم (بدون حساسیت) بوده و به سمت مناطقی که شیب و رطوبت دامنه بیشتر شده است به میزان حساسیت وقوع آن‌ها افزوده شده است.

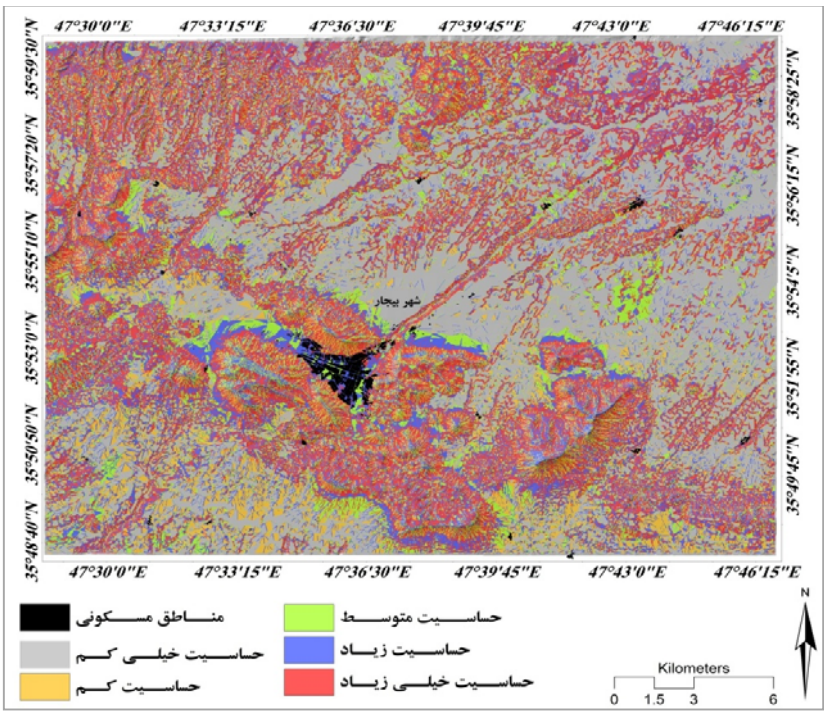
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ : نقشه‌ی پیش بینی مکانی زمین‌لغزش های سطحی اطراف شهر بیجار با الگوریتم RF

مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴



شکل ۶: نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار با مدل ترکیبی RS-RF

مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴

www.SID.ir

Archive of SID

ارزیابی‌صحت نقشه‌های پیش‌بینی مکانی‌حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه

منحنی ROC یک منحنی است که بر روی محور Xها مقدار1-Specificiy (نسبت‌پیکسل‌های عدم‌حضور زمین‌لغزش که به درستی به عنوان عدم حضور زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند) و بر روی محور Yها مقدار Sensitivity (نسبت پیکسل‌های زمین‌لغزش که به درستی به عنوان زمین‌لغزش طبقه‌بندی شده‌اند) مشخص می‌باشد.

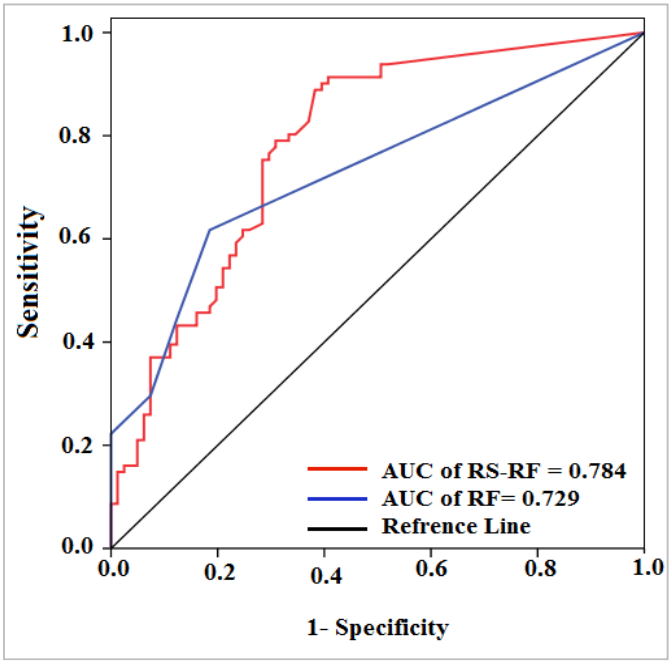
(۱۲)

$$Specificity = n(TN)/[n(TN)+n(FP)]$$

(۱۳)

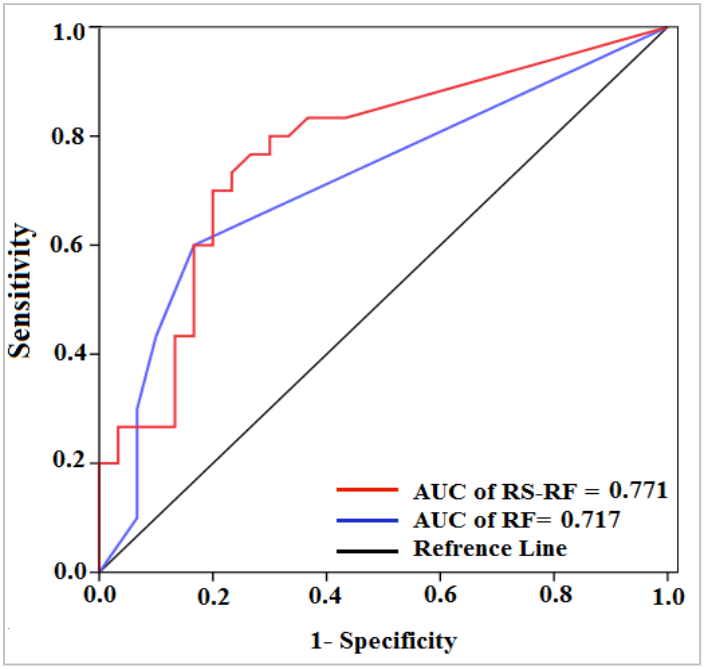
$$Sensitivity = n(TP)/[n(TP)+n(FN)]$$

در موضوع ارزیابی صحت نقشه مکان‌یابی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش سطحی هم از داده‌های تعلیمی و هم داده‌های صحت‌سنجی استفاده می‌گردد. بر این اساس، هنگامی که از داده‌های تعلیمی استفاده شود، منحنی ارزیابی صحت success rate curve (SRC) نام‌دارد و درهنگام استفاده از داده‌های صحت-سنجی به منحنی ارزیابی صحت نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی، واژه prediction rate curve (PRC) اطلاق می‌گردد. بهترین حالت این منحنی‌ها زمانی است که مقدار سطح زیر این منحنی‌ها برابر عدد یک باشد و بالعکس هرچه به‌سمت صفر نزدیک‌تر باشد، پیش‌بینی ضعیف‌تری حاصل‌می‌گردد *(Tien Bui et al., 2014:10)*. شکل‌شماره۷ نتایج ارزیابی صحت نقشه‌های پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه را با داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد.



www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: ارزیابی نقشه‌های پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی بر اساس الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF با داده‌های تعلیمی (سمت چپ) و با داده‌های صحت سنجی (سمت راست)

مأخذ: نویسندگان، ۱۳۹۴

مشاهده‌ی این شکل نشان می‌دهد که در منحنی SRC بر اساس داده‌های تعلیمی مقدار سطح زیر منحنی با استفاده از الگوریتم RF، ۰/۷۲۹ می‌باشد که به این معنی است این الگوریتم ۷۲/۹ درصد توانایی پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش را داشته است. در حالی که مدل ترکیبی RS-RF برای همین نوع داده با دارا شدن مقدار ۰/۷۸۴ مساحت زیر این منحنی، ۷۸/۴ درصد توانایی در پیش‌بینی مناطق حساس را داشته است. این در حالی است که برای داده‌های صحت‌سنجی مقدار سطح زیر منحنی PRC به ترتیب برای الگوریتم RF و مدل ترکیبی RS-RF، ۰/۷۱۷ و ۰/۷۷۱ به دست آمد. بطور کلی نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های به دست آمده با هر دو روش تأیید شدند؛ با این توضیح که مدل ترکیبی ارائه شده منجر به افزایش درصد مساحت زیر منحنی هم برای داده‌های تعلیمی و هم داده‌های صحت‌سنجی شده است.

نتیجه

از آن‌جا که هیچ‌گونه استاندارد خاصی برای انتخاب متغیّرهای اثرگذار بر وقوع زمین‌لغزش‌ها وجود ندارد، وجود چالش عدم قطعیت و میزان صحت و اعتماد به نقشه‌های به دست آمده از این متغیّرها، مسأله‌ی اصلی در بحث تهیه‌ی نقشه‌های پیش‌بینی مکانی (پهنه‌بندی حساسیت) می‌باشد. بنابراین، استفاده از هر گونه تکنیک یا ابزار و روشی جهت رسیدن به این هدف می‌تواند به حل این چالش کمک نماید. با این توصیف، هدف این پژوهش نیز استفاده از تکنیک Random Subspace (RS) به عنوان یک تکنیک تلفیقی (Ensemble) در روش داده کاوی جهت افزایش میزان صحت و اعتماد بیشتر به نقشه پیش-بینی مکانی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار در استان کردستان می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج بررسی مهم‌ترین عوامل اثرگذار از میان نوزده عامل‌مؤثر شناخته شده بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس شاخص Information Gain Ratio (IGR) نشان داد که هفت عامل فاصله از آبراهه، جاده و گسل، تراکم آبراهه و گسل، لیتولوژی و شاخص تراکم پوشش گیاهی (NDVI) به دلیل دارا بودن مقدار صفر این شاخص و عدم تأثیرگذاری این عوامل از مدل سازی نهایی حذف شدند. از طرفی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین-لغزش‌های سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب اولویّت؛ عامل جهت شیب در مدل Random Forest و عامل درجه‌شیب در مدل ترکیبی جدید (RF-RS) شناخته شدند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی مدل-های ارائه شده از معیارهای کاپا، TP، دقت، صحت و مساحت زیر منحنیROC استفاده شدند. بر این اساس این مقادیر هم در داده‌های تعلیمی و هم در داده‌های صحت‌سنجی در مدل ترکیبی RS-RF نسبت به مدل RF دارای مقادیر بیشتر و مقدار معیار FP کمتر می-باشند. این نتیجه بیان‌گر این مطلب است که هر دو مدل از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفته‌اند. هر چند که مدل ترکیبی ارائه شده نسبت به مدل RF دارای صحت پیش‌بینی (*Prediction accuracy*) بالاتری می باشد. همچنین، مشاهده‌ی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش سطحی بر اساس الگوریتم RF و الگوریتم ترکیبیRF-RS نشان دادند که بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در انتهای دامنه (پاشنه‌ی دامنه) جایی که دامنه نزدیک به محل اتصال آبراهه‌ها می‌گردد، واقع شده‌اند. شاید دلیل این امرحرکت آب‌های‌زیرسطحی ازطرف آبراهه‌ها به سمت دامنه‌های اطراف (در ارتباط با موضوع Variable source area) و ایجاد یک جبهه‌ی رطوبتی (فشار آب منفذی زیاد) و در نتیجه کاهش مقاومت برشی خاک در این ناحیه باشد که وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی با عمق کمتر را فراهم آورده است. این مناطق را می‌توان با رنگ‌های تیره‌تر در نقشه‌ها مشاهده کرد.

صحت‌سنجی نقشه‌های به دست آمده از الگوریتم‌ها براساس داده‌های تعلیمی (ترسیم منحنی SRC جهت پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش‌های موجود) و داده‌های صحت‌سنجی (ترسیم منحنی PRC جهت پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش‌های آینده)توسط مساحت زیرمنحنی ROC انجام گرفت. نتایج مؤید این مطلب است که مدل ترکیبی ارائه شده در این پژوهش به وضوح باعث افزایش مقدار درصد مساحت زیر منحنی در داده‌های تعلیمی و صحت‌سنجی شده است. با این توصیف، می‌توان اظهار داشت که تکنیک RS را می‌توان برای افزایش درصد صحت و اعتماد بیشتر نقشه‌های پیش-بینی مکانی با روش‌های دیگر داده کاوی (از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر تئوری بیزین، الگوریتم‌های شاخه درختی و غیره) و حتی در ترکیب با سایر روش‌های‌آماری(ازجمله رگرسیون لجستیک،رگرسیون چندمتغیّره و غیره) و روش‌های دانش-مبنا (از جمله تحلیل سلسله مراتبی سیستم‌ها، روش وزن‌دهی شواهد، نسبت فراوانی و غیره) آزمون و مورد بررسی قرار داد. نقشه‌ای که دارای صحت بالا و معقول در شناسایی و تفکیک مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش باشد، به مهندسان جهت‌معرفی مناطق با حساسیت‌های‌مختلف وقوع زمین‌لغزش به منظور احداث مکان مناسب برای جلوگیری از تخریب سازه-های رسوبگیر و اصلاحی، زهکشی و انتقال آب از مناطق حساس و نزدیک به اجرای سازه، توسعه‌ی بهینه‌ی شبکه‌ی جاده‌های شهری و روستایی، استفاده در برنامه‌ریزی شهری و مسائل آمایش سرزمین و توسعه‌ی جغرافیایی و فیزیکی کمک شایانی می‌نماید تا بدین وسیله زیرساخت‌های لازم برای توسعه‌ی پایدار آن منطقه فراهم گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

- ابراهیمی، خدیجه؛ محمدجواد یزدی (۱۳۹۲). بررسی عوامل موثر در زمین‌لغزش‌های کم‌عمق توسط برخی پارامترهای خاکی در زیرحوضه تول بنه. کنفرانس علوم کشاورزی و محیط زیست. ۶ ص.
- حنفی، علی؛ ایرج حاتمی (۱۳۹۲). تهیه نقشه اقلیمی استان کردستان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، مجله اطلاعات جغرافیایی (سپهر). دوره ۲۲. شماره ۷۸. صفحات ۲۸-۲۴.
- شیرانی، کورش؛ علیرضا عرب‌عامری (۱۳۹۴). پهنه-بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوضه دزعلی)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی.علوم آب و خاک. سال نوزدهم. شماره هفتاد و دوم. صفحات ۳۲۱-۳۳۴.
- عابدینی، موسی؛ بهاره قاسمیان؛ عطاالله شیرزادی (۱۳۹۳). مدل‌سازی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار)، مجله جغرافیا و توسعه. شماره ۳۷. صفحات ۱۰۲- ۸۵.
- فعله‌گری، محسن؛ علی طالبی؛ یاسر کیااشکوریان (۱۳۹۲). بررسی اثر جاده‌سازی در وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل پایداری دامنه (FLAC SLOP) مطالعه: موردی حوضه آب خیز سد ایلام، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. جلد بیستم. شماره اول. گزارش کوتاه علمی. صفحات ۲۴۰ -۲۲۷.
- Acharya, G. (2011). Analyzing the Interactions between Water-induced Soil Erosion and Shallow Landslides, Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury PhD thesis, 211 pp.
- Akgun, A., Turk, N. (2011). Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: a case study from the AyvalIk Region, NW Turkey. Computer Geosciences, 37, 1515–1524.
- Althuwaynee, O.F., Biswajeet, P., Park, H-J., Lee, J.H. (2014). A novel ensemble decision tree-based CHi-squared automatic interaction detection (CHAID)and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. Landslides, 11(6), 1063–1078.
- Avanzi, G.D., Giannecchini, R, & Puccinelli, A. (2004). The influence of geological and geo - morphological settings on shallow landslides. An example in temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). Engineering Geology, 73, 215–228.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko mountains, central Japan. Geomorphology, 65,15–31.
- Ballabio, C., Sterlacchini, S. (2012). Support vector machines for landslide susceptibility mapping: the Staffora River Basin case study, Italy. Mathematical Geosciences, 44, 47–70.
- Benda, L., and Dunne, T. (1997). Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow. Water Resources Research, 33, 2849–2863.
- Breiman, L. (2001). Random Forest. Machine Learning, 45, pp. 5-32.
- Dehnavi, A., Aghdam, I.N., Pradhan, B., Varzandeh, M.H.M. (2015). A new hybrid model using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran. Catena, 135, 122-148
- Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi H-R., Yunus,A-P., Song, X., Xu, Y., Zhu, Zh. (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. Natural Hazards, 78:1749–1776.
- Dubois, D., Prade, H. (1990). Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets.International Journal of General Systems, 17:191–209
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi,E.,Savage,W(2008).Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-useplanning. Engineering Geology,102,99-111.

www.SID.ir

Archive of SID

- Shirzadi, A., Saro, L., Hyun-Joo, Oh and Chapi, K. (2012). A GIS-based logistic regression model in rock fall susceptibility mapping along a mountainous road: Salavat Abad case study, Kurdistan, Iran. Natural Hazard, 64, 1639-1656.
- Sidle, R.C., Ochiai, H. (2006). Landslides: Processes, Prediction, and Land use. Water Resource Monograph: 18, AGU books, ISSN: 0170-9600.
- Sujatha, E.R., Kumaravel, P., Rajamanickam,V.G. (2012). Landslide Susceptibility Mapping Using Remotely Sensed Data through Conditional Probability Analysis Using Seed Cell and Point Sampling Techniques.Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 40(4), 669-678.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology, 512,332-343.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., (2012a). Landslide susceptibility assessment in Vietnam using Support vector machines, Decision tree and Naive Bayes models. Mathematical Problems in Engineering, http://dx.doi.org/ 10.1155/2012/974638, 2012.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B.(2012b). Landslide susceptibility mapping at HoaBinh province (Vietnam) using an adaptive neuro fuzzy inference system and GIS. Computers & Geosciences, 45, 199–211.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Revhaug, I., Trung Tran, C. (2014). A comparative assessment between the application of fuzzy unordered rules induction algorithm and J48 Decision tree models in spatial prediction of shallow landslides at Lang Son City, Vietnam. In: Srivastava, P.K., Mukherjee, S., Gupta, M., Islam, T(Eds.), Remote Sensing Applications in Environmental Research. Springer International Publishing, PP: 87–111.
- Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., 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. Landslides, http://dx.doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6.
- Guo, C., Montgomery, D.R., Zhang, Y., Wang, K., Yang, Z. (2015). Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau. China Geomorphology, 248, 93-110.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81, 166-184.
- Ho, T.K. (1998). The random subspace method for constructing decision forests Pattern Analysis and Machine Intelligence.IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(8), 832-844.
- Hunter, E., Matin, J., Stone, P(1966). Experiments in induction. Academic, New York.
- Jing-chun, X., Rui, L., Hui-wen, L., Zi-li, L. (2015). Analysis of landslide hazard area in Ludian earthquake based on Random Forests, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Berlin, Germany, 865-869.
- Miao T.Y., Wang, M. (2015). Susceptibility Analysis of Earthquake-Induced Landslide Using Random Forest Method, International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA), 771-775.
- Park, N-W.(2010). Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslidesusceptibility analysis.Environmental Earth Sciences, 62(2), 367-376.
- Piao,Y., Piao, M., Hao, Jin, C., Sun, S-H., Chung, J-M., Hwang, B., Ho, R. (2015). A New Ensemble Method with Feature Space Partitioning for High-Dimensional Data Classification, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Article ID590678,13pp.
- Quinlan, J.R. (1993). C4.5: programs for machine learning. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.
- Rickli, C., Graf, F. (2009). Effects of forests on shallow landslides; case studies in Switzerland.Forest, Snow and Landscape Research, 82(1), 33-44.

www.SID.ir

Archive of SID

- Yalcin,A(2008).GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey). Comparisons of results & confirmations, Catena 72:1−12.
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H-R., Pourtaghi, Z-S.,Al-Katheeri,M.M.(2015).Landslidesusceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at WadiTayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. Landslides, DOI 10.1007/s10346-015-0614- 1: 1-18.
- Zare, M., Pourghasemi, H., Vafakhah, M., Pradhan, B (2013). Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. Arabian Journal of Geosciences, 6, 2873–2888.
- Tsangaratos, P., Benardos A. (2014). Estimating landslide susceptibility through an artificial neural networkclassifier.NaturalHazards,74(3),1489-1516.
- Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., NeamahJebur, M.,ShafapourTehrany, M. (2014). Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. Catena, 118, 124-135.
- Wang, L-J., Guo, M., Sawada K., Lin J., Zhang J. (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.
- Wang, L-J., Sawada K., MoriguchiS.(2013). Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy.Computers & Geosciences,57,81-92.
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Xiao, J., Tan, X., Yuan, R. (2012). Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui River watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. Journal of Earth Science, 23, 97–120.

www.SID.ir