

## مقایسه مدل‌های رگرسیون لجستیک و بیزین رگرسیون لجستیک به منظور پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای استان کردستان

کامران چپی - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج.  
داود طالب‌پور اصل\* - دکترای ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج.  
عطاله شیرزادی - دکترای آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴      تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش ارائه روش ترکیبی بیزین رگرسیون لجستیک و مقایسه کارایی آن با روش رگرسیون لجستیک به منظور تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان می‌باشد. در ابتدا، بر اساس مرور منابع ۱۸ عامل تأثیرگذار بر وقوع حرکت‌های توده‌ای شامل: درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای معمولی شیب، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شاخص توان حمل جریان، شاخص نمناکی توپوگرافی، شاخص طول و زاویه شیب، لیتولوژی، بارش، کاربری ارضی، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، فاصله از جاده و تراکم جاده انتخاب شدند. سپس، در روش رگرسیون لجستیک (LR) بر اساس سطح معنی‌داری آماری ۷ عامل و در روش بیزین لجستیک رگرسیون (BLR) بر اساس شاخص *Information Gain Ratio*، ۱۱ عامل به عنوان عوامل مؤثر انتخاب و جهت مدل‌سازی به کار گرفته شدند. ارزیابی مدل‌ها (داده‌های تعلیمی و داده‌های تست) توسط معیارهای *Accuracy*، *Sensitivity*، *Specificity*، درصد مساحت زیر منحنی ROC و ریشه میانگین مربعات خطا انجام شدند. نتایج ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد بین کارایی و نقشه‌های پیش‌بینی مکانی تهیه شده برای مناطق حساس به وقوع حرکت‌های توده‌ای خاک با روش‌های BLR و LR مشاهده نشد و می‌توان از مدل BLR نیز به مانند مدل LR به عنوان یک مدل معیار استفاده نمود. لذا با روش LR حدود ۲۶ درصد از مساحت استان کردستان در معرض حساسیت زیاد و خیلی زیاد به وقوع حرکت‌های توده‌ای (۵۴ درصد مجموع حرکت‌های توده‌ای) قرار دارد و با روش BLR حدود ۳۳ درصد از مساحت استان کردستان در معرض حساسیت زیاد و خیلی زیاد به وقوع حرکت‌های توده‌ای (۶۴ درصد مجموع حرکت‌های توده‌ای) قرار دارد که نواحی غرب استان دارای پتانسیل بیشتری هستند.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، تئوری بیزین، رگرسیون لجستیک، استان کردستان.

## مقدمه

زمین لغزش‌ها به عنوان یک نمونه برجسته از تخریب زمین در میان هفت عامل تهدید خاک به شمار می‌رود (کیسترا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). آنها باعث تغییرات زیاد، اختلال در چشم انداز، کاهش منابع تولی و اختلال در فعالیت های حمل و نقل و عبور و مرور می‌گردند (ستوکینگ و مورناغان<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱). دامنه‌ها در طبیعت تحت تأثیر فرایندهای بیرونی به دلیل تغییرات زمین‌شناسی، ژئومرفولوژیکی و اقلیمی می‌باشند. چنین فرایندهایی منجر به وقوع حرکت‌های دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش می‌گردند (هاکیو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). استراتژی مطالعه زمین‌لغزش شامل شناخت فرآیند، تحلیل خطوط پیش‌بینی زمین-لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارات ناشی از آن می‌باشد (لان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).

در دهه گذشته، ارزیابی حساسیت<sup>۵</sup>، خطر<sup>۶</sup> و ریسک<sup>۷</sup> زمین لغزش برای جوامع بین‌المللی موضوع مهم پژوهش شده است. در طول این مدت پژوهش‌ها در مورد زمین لغزش‌ها در دو مقیاس مطالعه شده‌اند: در مقیاس یک مکان مشخص<sup>۸</sup> با مقیاس کمتر از ۱:۵۰۰ و ارزیابی‌های منطقه‌ای<sup>۹</sup> با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۲۵۰۰۰۰ (واندروم<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات در مقیاس اول، طیف وسیعی از ناپایداری‌های دامنه و تمامی انواع فعالیت‌های زمین لغزش در یک ناحیه مشخص از مساحت خیلی کم در حد متر مربع تا کل دامنه (کوهستان) را شامل می‌شود. فعالیت‌ها در این محدوده شامل نقشه پهنه‌بندی هندسه و ناپایداری دامنه، پهنه‌بندی تشکیلات زیست محیطی، تعیین درجه فعالیت دامنه با استفاده از ابزارها و اندازه‌گیری‌های سطحی و مشاهدات زیر سطحی، مدل‌سازی ژئومرفولوژیکی و ژئوتکتونیک دامنه مورد مطالعه (واندروم و همکاران، ۲۰۱۶) می‌باشند. ارزیابی‌های منطقه‌ای، محدوده‌ای از مساحت‌های چند هکتاری تا هزاران کیلومتر مربع را شامل می‌گردد. مقیاس مورد مطالعه از ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۲۵۰۰۰۰ را به خود اختصاص می‌دهد. این روش عمدتاً بر اساس مدل‌سازی با روش‌های مختلف هستند که هدف اصلی آن‌ها تعیین شرایط زمانی و مکانی جهت پیش‌بینی وقایع آینده بر اساس شرایط زمانی و مکانی وقایعی است که در گذشته اتفاق افتاده‌اند، می‌باشد.

زمین لغزش‌ها در بسیاری از مناطق دنیا بخصوص کشورهای کوهستانی از جمله ایران، یکی از چالش‌های عمده محیط زیست به شمار می‌رود که بیشتر در استان‌های مازندران، گیلان، چهارمحال و بختیاری، اردبیل و کردستان اتفاق می‌افتند (متولی ۱۳۸۱). هاک و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه تلفات انسانی و خسارت‌های اقتصادی ناشی از زمین لغزش‌ها در ۲۷ کشور اروپا اقدام نمودند. طی ۲۰ سال جمع‌آوری داده‌های موجود، ۱۳۷۰ گزارش مرگ و میر و ۷۸۷ گزارش مجروحیت صدمه به مردم از ۴۷۶ زمین لغزش (به صورت میانگین  $82 \pm 108$ ) مرگبار ثبت شده است. در حدود ۱/۳ تا ۳/۶ میلیون اروپایی در مناطق حساس به وقوع زمین لغزش زندگی می‌کنند (جیدیک<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این، ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ کیلومتر از جاده‌ها و راه آهن‌ها در اروپا به شدت در معرض زمین لغزش‌ها قرار دارند (جیدیک و همکاران، ۲۰۱۴).

<sup>۱</sup>. Keesstra

<sup>۲</sup>. Stocking and Murnaghan

<sup>۳</sup>. Haque

<sup>۴</sup>. Lan

<sup>۵</sup>. Susceptibility

<sup>۶</sup>. Hazard

<sup>۷</sup>. Risk

<sup>۸</sup>. Site-specific scale

<sup>۹</sup>. Regional scale

<sup>۱۰</sup>. Vandromme

<sup>۱۱</sup>. Jaedicke

در اوایل شروع قرن بیست و یکم مناطق مستعد به وقوع زمین لغزش در اروپا با توجه به افزایش تعداد وقوع زمین لغزشها افزایش چشمگیری یافته است (جیدیک و همکاران، ۲۰۱۴). پایگاه داده بین المللی<sup>۱</sup> گزارش کرده است که در قرن گذشته، قاره اروپا به عنوان دومین قاره در جهان به خاطر تعداد مرگ و میر و خسارت های اقتصادی (۱/۵ بلیون یورو) شناخته شده است (گوها<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). در میان ۲۷ کشور اروپایی مطالعه شده کشور ترکیه با ۳۳۵ مرگ و میر ناشی از زمین لغزش اولین کشور به دلیل تهدید توسط زمین لغزش محسوب می گردد و کشورهای ایتالیا با ۲۸۳ مرگ و میر، روسیه با ۱۶۹ مرگ و میر و کشور پرتغال با ۹ آمار مرگ و میر در اولویت های بعدی قرار گرفتند (هاکیو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶).

استان کردستان از لحاظ وقوع تعداد زمین لغزش با ثبت ۲۹۲ زمین لغزش بعد از استان های مازندران و گلستان در رتبه ی ۳ کشوری قرار دارد و چنانچه ملاک رتبه بندی مساحت استان ها باشد این استان در رتبه ی بالاتری قرار می گیرد (میرصانعی و مهدیفر، ۱۳۸۵). بر اساس خصوصیات توپوگرافی، ژئومورفولوژی، خاک شناسی، زمین شناسی (لیتولوژی) و اقلیم؛ استان کردستان به دو بخش شرقی (شامل شرق، جنوب شرقی و مرکزی استان) و غربی (شامل غرب و جنوب غربی استان) تقسیم بندی شده است. زمین لغزش های سطحی و عمقی کردستان غربی به دلیل تأثیر برخورد صفحه عربستان با صفحه ایران و همچنین قرارگیری در ناحیه زاگرس رورارنده که با گسل خوردگی و شکستگی همراه است، ناشی از فعالیت های تکتونیک و ساختمانی می باشند. در حالی که در کردستان شرقی به این دلیل که اختصاصات زمین شناسی زون ساختاری-رسوبی، سنج-سیرجان را داشته و عمدتاً دارای رسوبات جوان کواترنری با عمق مناسب و شیب دامنه کمتر (تپه ماهوری) هستند، زمین لغزش های سطحی غالبیت داشته و بیشتر مصالح و مواد نسبت به فعالیت های تکتونیک و ساختمانی در وقوع آن ها نقش دارند. بنابراین، شناسایی مناطقی که پتانسیل بیشتری نسبت به وقوع زمین لغزش های سطحی دارند، می تواند از اولویت های برنامه های آمایش سرزمین و مدیریت کارآمد این مناطق در منطقه مورد مطالعه جهت پیشگیری و کاهش وقوع از طریق تهیه یک نقشه با دقت پیش بینی مکانی حساسیت زمین لغزش مناسب باشد (آرنون<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از ابزارهای مناسب برای مدیریت بحران در نواحی کوهستانی تهیه نقشه های حساسیت، خطر و ریسک زمین لغزش بوده است (داهال<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸). حساسیت زمین لغزش به اینکه "یک زمین در کجا می تواند اتفاق بیافتد" بر می گردد و به صورت احتمال وقوع زمین لغزش بر اساس رابطه مکانی میان زمین لغزش ها و یک سری عوامل اثرگذار بر وقوع آنها در یک ناحیه مشخص تعریف می گردد (براب<sup>۶</sup>، ۱۹۸۴).

اگر چه روش های کمی زیادی در مطالعات پیش بینی مکانی زمین لغزش ها تاکنون استفاده شده است، از جمله؛ شبکه عصبی مصنوعی (تین بوئی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ دویو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)، روش آماری دو متغیره (ناندی و شکور<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰؛

۱. The International Disaster Database (EM-DAT)

۲. Guha

۳. Haque

۴. Arnone

۵. Dahal

۶. Brabb

۷. Tien Bui

۸. Dou

۹. Nandi and Shakoor

خیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)، روش آماری چند متغیره (آگگون و تورک<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱)، روش داده‌کاوی منطق فازی (تین بوئی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)، احتمال شرطی (سوجاتا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)، درخت تصمیم‌گیری (تین بوئی و همکاران، ۲۰۱۴؛ تسائی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۳)، مدل دمپسر-شیفر (پارک<sup>۶</sup>، ۲۰۱۰)، و روش داده‌کاوی ماشین پشتیبان بردار (تین بوئی و همکاران، ۲۰۱۵؛ هونگ<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)، اما استفاده از مدل رگرسیون لجستیک<sup>۸</sup> به منظور ارزیابی مخاطرات طبیعی از جمله حرکت‌های توده‌ای خاک توسط پژوهشگران مختلف در داخل کشور (کرم و محمودی، ۱۳۸۴؛ شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۲) و خارج از کشور (عمر<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوخان<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ وانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴) مطالعه شده است. در این مطالعات، به دلیل توانایی خوب این مدل در برآورد و پیش‌بینی مکانی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش به عنوان مدل معیار<sup>۱۲</sup> جهت مقایسه کارایی مدل‌های جدید با آن مورد استفاده واقع شده است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های ترکیبی به منظور افزایش صحت و دقت نقشه پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی مورد توجه محققین بوده است. به عنوان مثال تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) به پهنه‌بندی نقشه حساسیت به سیل‌خیزی با ترکیب مدل احتمالاتی بر پایه تئوری بیزین<sup>۱۳</sup> 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 آموزشی<sup>۱۴</sup> ۹۶/۴۸ و برای داده‌های صحت‌سنجی مقدار ۹۵/۶۷ به دست آمد. 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 بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش صحت نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها با افزایش درصد مساحت زیر منحنی داده‌های تعلیمی و آموزشی در مدل ترکیبی ارائه شده است. اما روش ترکیبی رگرسیون لجستیک بر پایه تئوری بیزین تاکنون در داخل کشور مطالعه نشده است و در خارج از کشور نیز به صورت خیلی محدود و تنها توسط داس و همکاران (۲۰۱۲) برای زمین‌لغزش‌های کوه‌های هیمالیا در هندوستان انجام شده است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه استفاده از روش‌های قطعی (فاکتور اطمینان؛ تعادل میان تنش برشی و مقاومت برشی خاک) در مقیاس‌های کمتر از ۱:۵۰۰۰ 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 در گستره استان کردستان نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد دارد، لذا در این پژوهش به تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای خاک به کمک سیستم اطلاعات

<sup>۱</sup>. Xu

<sup>۲</sup>. Akgun and Turk

<sup>۳</sup>. Tien Bui

<sup>۴</sup>. Sujatha

<sup>۵</sup>. Tsai

<sup>۶</sup>. Park

<sup>۷</sup>. Hong

<sup>۸</sup>. Logistic Regression

<sup>۹</sup>. Umar

<sup>۱۰</sup>. Gokhan

<sup>۱۱</sup>. Wang

<sup>۱۲</sup>. Soft computing bench mark learning model

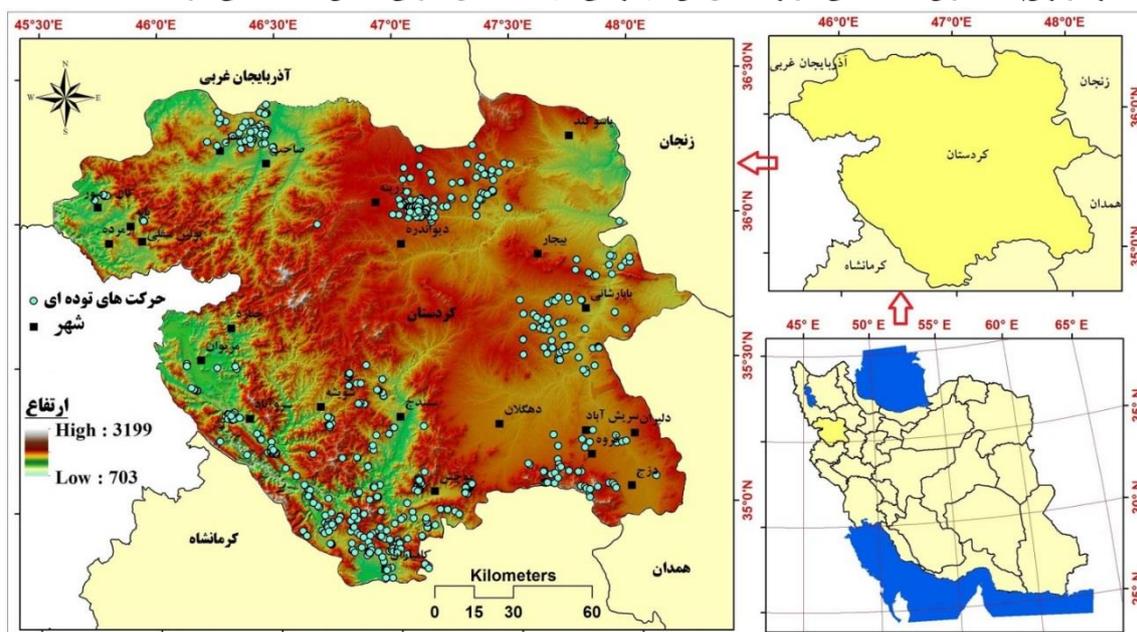
<sup>۱۳</sup>. Weight of Evidence

<sup>۱۴</sup>. Training

جغرافیایی به عنوان ابزاری برای تعیین مناطق حساس اقدام شده است تا بر اساس شرایط زمانی و مکانی لغزش‌هایی که در گذشته اتفاق افتاده است، شرایط زمانی و مکانی لغزش‌ها در آینده پیش‌بینی شوند. بنابراین، اهداف این پژوهش عبارتند از ۱) تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حساسیت حرکت‌های توده‌ای استان کردستان به منظور مدیریت نواحی حساس و استفاده در طرح‌های آمایش سرزمین و توسعه مناطق روستایی و شهری ۲) ارائه روش ترکیبی بیزین رگرسیون لجستیک و مقایسه کارایی آن با روش رگرسیون لجستیک ۳) شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان.

### معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

استان کردستان با گستردگی ۲۹۱۳۷ کیلومتر مربع در غرب ایران قرار دارد. این استان از شمال به استان‌های آذربایجان غربی و زنجان، از شرق به همدان و زنجان، از جنوب به استان کرمانشاه و از غرب به کشور عراق محدود است (شکل ۱). ناهمواری‌های این استان مشتمل بر دو بخش غربی و شرقی است. این دو قسمت از نظر شکل پستی و بلندی و جنس زمین متفاوتند. قسمت وسیعی از سندج، مریوان و سرزمین‌های اطراف آن‌ها تا جنوب کردستان بخش کوهستانی غربی را تشکیل می‌دهد. در این ناحیه، یکنواختی و سستی جنس زمین اشکال مشابهی را به وجود آورده که از ویژگی‌های آن کوه‌های گنبدی شکل با شیب یکنواخت همراه با دره‌های باز است. این یکنواختی را طبقات آهکی سخت و سنگ‌های درونی که بین لایه‌های سست ظاهر می‌شوند، درهم ریخته و آن را به صورت صخره‌های بدون پوشش درآورده است. نوع مشخص این ناهمواری‌ها، ناحیه کوهستانی چهل‌چشمه در بین مریوان و سقز است که دنباله پستی و بلندی‌های این ناحیه را در جنوب و مشرق تشکیل داده‌اند و دامنه غربی آن تا داخل کشور عراق کشیده شده است. در این ناحیه شعبه‌های رود قزل اوزن در شرق و شمال شرقی و رود سیران در جنوب چهره زمین را به طور کامل تغییر داده‌اند. در حد فاصل ناحیه غربی و شرقی، یک رشته از ارتفاعات آتشفشانی شمالی - جنوبی وجود دارد. در شرق این رشته کوه، شهرستان‌های قروه و بیجار قرار دارند که شکل زمین در آنها با پستی و بلندی‌های ناحیه غربی به کلی متفاوت است. از ویژگی‌های این ناحیه، وجود یک حصار کوهستانی متشکل از سنگ‌های دگرگونی و رسوبی است که دشت‌های مرتفع هموار و تپه ماهوری را احاطه کرده است. میانگین دمای سالیانه در ارتفاعات استان حدود ۸ درجه سانتی‌گراد و در محدوده‌های پست جنوب و جنوب شرقی استان ۱۳ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر متوسط بارندگی سالیانه در ارتفاعات غرب و شمال غربی منطقه (بانه و مریوان) به میزان ۸۰۰ میلی‌متر و حداقل آن در نواحی دره‌ای شمال شرقی استان، ۳۰۰ میلی‌متر است.



### شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان

## داده‌ها و روش تحقیق

### ۱) داده‌های پژوهش

لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز این تحقیق عبارتند از: داده‌های توپوگرافی؛ شامل تصاویر GDEM ماهواره ASTER با قدرت تفکیک ۲۸/۵ متر به منظور تهیه لایه‌های رستری سطوح ارتفاعی، شیب و جهت شیب منطقه مورد مطالعه با اندازه پیکسل‌های ۳۰ متر می‌باشند. داده‌های زمین‌شناسی؛ این داده‌ها که عبارتند از نقشه لیتولوژی، نقشه فاصله از گسل‌ها و نقشه تراکم گسل که از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ استان کردستان استخراج شدند. داده‌های اقلیمی؛ شامل آمار بارش به منظور تهیه نقشه خطوط همباران (نقشه بارندگی) و همچنین آمار دمای استخراج شده از ایستگاه‌های هواشناسی استان کردستان جهت اطلاع از وضعیت میانگین دمایی منطقه مورد مطالعه مورد نیاز می‌باشد. داده‌های کاربری زمین؛ شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده ETM) مورخ ۲۰۱۴/۰۶/۱۱ برگرفته شده از وب سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) به منظور تهیه نقشه کاربری ارضی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار PCI Geomatica 9.1 که به روش طبقه‌بندی نظارت شده انجام شد. نرم افزارهای تخصصی؛ شامل SPSS 18، Arc GIS 10.2، Saga2.1.1، PCI Geomatica 9.1 و Weka 3.6.9 به منظور تهیه نقشه‌ها و تحلیل آماری داده‌ها و در نهایت عملیات میدانی برای تکمیل سایر داده‌ها و انطباق نتایج با وضع موجود انجام شده است.

### ۲) نقشه پراکنش حرکت‌های توده‌ای زمین استان کردستان

موقعیت مکانی وقوع حرکت‌های توده‌ای از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه و سپس با استفاده از پیمایش صحرائی، تفسیر عکس‌های هوایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث تفسیر و محل وقوع برخی از پهنه‌های زمین‌لغزشی اصلاح شد. تحلیل آماری پراکنش حرکت‌های توده‌ای استان کردستان نشان می‌دهد از میان انواع مختلف حرکت‌های دامنه‌ای خاک در منطقه مورد مطالعه از جمله لغزشی، ریزشی، جریان‌ی و مرکب (پیچیده) حدود ۶۴/۳ درصد مربوط به پدیده‌های لغزشی شامل خاک و سنگ، ۲۵/۲ درصد از نوع پیچیده، ۹/۸ درصد از نوع ریزشی و تنها ۰/۶ درصد مربوط حرکت‌های توده‌ای از نوع جریان‌ی می‌باشند. همچنین، جهت حرکت این نوع از مخاطرات ژئومرفولوژیک نشان می‌دهد که ۱۴/۸، ۴/۹، ۱۵/۷، ۱۰، ۱۴/۳، ۱۰/۴، ۱/۱۴ و ۱/۴ درصد از حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان به ترتیب دارای جهت حرکت با زوایای ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰، ۲۲۵، ۲۷۰، ۳۱۵ و ۳۶۰ درجه می‌باشند. علاوه بر این حدود ۹۵/۷ درصد از آن‌ها مربوط مصالح خاک و تنها ۴/۳ درصد در ارتباط با سنگ‌ها می‌باشند. از تمام حرکت‌های توده‌ای اشاره شده حدود ۵۹ درصد فعال و ۴۱ درصد از آن‌ها در حال حاضر غیر فعال هستند. طبق مطالعات اولیه و عملیات صحرائی مشخص شد که ۵۴/۷ درصد مربوط به فرسایش آبی (تشکیلات سست و حساس زمین‌شناسی سازندهای دوران چهارم-کواترنر- به فرسایش آبی)، زیر شویی و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها و ۳۶/۳ درصد نیز مربوط به نحوه قرارگیری لایه‌های سست و محکم در تناوب با همدیگر می‌باشند. نقشه پراکنش حرکت‌های توده‌ای زمین در استان کردستان شامل ۸۹۵ نقطه (مرکز پهنه‌ها) به عنوان مناطق مستعد به زمین لغزش بوده که به دو دسته شامل ۷۰ درصد داده‌های آموزشی برای تعلیم و اجرای مدل و ۳۰ درصد داده‌های آزمون جهت صحت‌سنجی طبقه‌بندی شدند (شکل ۱). همچنین، تعداد ۸۹۵ مکان به عنوان مناطقی که زمین لغزش در آنجا اتفاق نیافتاده‌اند به صورت کاملاً تصادفی انتخاب و شبیه به مرحله مدل‌سازی و صحت‌سنجی به دو دسته ۷۰ و ۳۰ درصد طبقه‌بندی شدند.

### ۳) عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای استان کردستان

به منظور شناسایی متغیرهای مؤثر در وقوع حرکات دامنه‌ای، از طریق مرور منابع و استفاده از نظر کارشناسان، ۱۸ متغیر مستقل که بیشترین نقش را در وقوع حرکت‌های دامنه‌ای دارند، انتخاب شدند. بر این اساس، نقشه‌های درجه شیب، جهت

شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحناى عادى شیب، انحناى عرضى شیب و انحناى طولى شیب از نقشه رقومى ارتفاع استان کردستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER با قدرت تفکیک ۲۸/۵ متر در محیط Arc GIS 10.2 تهیه شدند. از آن جا که نوع پوشش گیاهی و کاربری زمین نیز در رخداد زمین لغزش مؤثر است، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجندۀ  $ETM^+$ ) و به روش نظارت شده، نقشه کاربری اراضی استان تهیه گردید. همچنین نقشه‌های لیتولوژی، فاصله از گسل و تراکم گسل از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ استان کردستان استخراج گردیدند. نقشه بارندگی با استفاده از روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله (IDW) بر اساس میانگین بلند مدت سالیانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل استان، نقشه‌های فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه و فاصله از شبکه جاده و تراکم جاده به ترتیب براساس فواصل از اطراف شبکه آبراهه‌ها و شبکه جاده منطقه مورد مطالعه تهیه شدند. شاخص طول و زاویه شیب دامنه (LS) از میانگین مقدار LS سلول‌ها به دست می‌آید. یکی از بهترین رابطه‌هایی که در تلفیق با GIS برای محاسبه عامل LS توسط مور و ویلسون در سال ۱۹۹۲ پیشنهاد شده است، به صورت ذیل است:

$$LS = \left[ \frac{A_s}{22.13} \right]^{0.4} \left[ \frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (1)$$

که در آن  $A_s$  سطح ویژه حوضه است که به عنوان مساحت در واحد عرض متوسط در جهت جریان تعریف شده است (کوتیاری<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲) و  $\beta$  تندى شیب بر حسب درجه می‌باشد. شاخص LS با استفاده از نرم افزار Saga 2.1.1 برای استان کردستان محاسبه شده است. شاخص نمناکی توپوگرافی (TWI) ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه می‌باشد. این شاخص می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد نماید. همچنین با استفاده از این شاخص می‌توان الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییرات ناشی از فرسایش در بافت خاک را ارزیابی نمود (گرایس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). این شاخص به وسیله رابطه زیر قابل محاسبه است (مور و گرایسون<sup>۳</sup>، ۱۹۹۱):

$$TWI = \ln \left( \frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (2)$$

که در آن  $A_s$  سطح ویژه حوضه بر حسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز) و  $\beta$  درجه شیب می‌باشد. این شاخص، تمایل آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (بر حسب  $A_s$ ) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (بر حسب  $\tan \beta$  به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند. شاخص TWI نیز در محیط نرم افزار Saga 2.1.1 برای استان کردستان محاسبه شده است. شاخص توان حمل جریان (SPI) نمایشی از قدرت فرساینده‌گی جریان‌های سطحی است که با استفاده از سطح ویژه حوضه و درجه شیب محاسبه می‌شود. به منظور تعیین نقشه شاخص قدرت جریان (SPI) از رابطه زیر استفاده می‌گردد (مور و همکاران، ۱۹۹۲):

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad (3)$$

که در آن  $A_s$  مساحت حوضه آبریز و  $\beta$  گرادیان شیب بر حسب درجه می‌باشد. در این معادله اندازه قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه آب متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد. به طور کلی این شاخص در نواحی که نیمرخ محدب دارند، فرسایش ویژه و در نواحی که نیمرخ مقعر دارند، رسوب ویژه را پیش‌بینی می‌کند (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۳). شاخص SPI نیز با نرم افزار Saga 2.1.1 برای استان کردستان محاسبه شده است.

۱. Kothyari

۲. Grabs

۳. Moore and Grayson

#### ۴) انتخاب مؤثرترین عوامل در مدل‌سازی حساسیت وقوع حرکت‌های توده‌ای استان کردستان

جهت انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای زمین در استان کردستان با روش رگرسیون لجستیک از ضرایب معنی‌داری آماری استخراج شده (در سطح ۹۵ درصد) توسط روش گام به گام<sup>۱</sup> و در روش بیزین رگرسیون لجستیک از روش IGR<sup>۲</sup> استفاده شد. بر این اساس در روش‌های داده کاوی (از جمله بیزین رگرسیون لجستیک)، تکنیک‌های متعددی برای تشخیص صلاحیت پیش‌بینی متغیرهای اثرگذار بر وقوع یک پدیده وجود دارند؛ از جمله: Fuzzy-Rough Sets (دابویس و پراد<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰)، Relief (کونونینکو<sup>۴</sup>، ۱۹۹۴)، (هانتر<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۶۶) Information Gain (IG) و (کوبین لن<sup>۶</sup>، ۱۹۹۳). پایه و اساس IG، تئوری اطلاعات<sup>۷</sup> است که با کاهش آنتروپی، صلاحیت اهمیت‌دار 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 (وایتین<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال 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 پایین از نتایج مدل‌ها منجر شود (خیال‌ومینگ و بورگلت<sup>۹</sup>، ۲۰۰۴). برای غلبه بر این موضوع کوئینلان (۱۹۹۳)، شاخص IGR را پیشنهاد داد که مقادیر IGR بالاتر نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی بالاتر آن عامل مؤثر برای مدل‌سازی است. بنابراین، جهت شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی، از میان ۱۸ 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  $L_i$  (لغزشی، غیرلغزشی) باشد، در این صورت:

$$\text{Info}(S) = - \sum_{i=1}^2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \log_2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \quad (۴)$$

با توجه به عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، مقدار اطلاعات مورد نیاز برای تقسیم  $S$  به مجموعه  $(S_1, S_2, \dots, S_m)$ ، از رابطه زیر برآورد قابل محاسبه است:

$$\text{Info}(S, A) = \sum_{j=1}^m \frac{|S_j|}{|S|} \text{Info}(S) \quad (۵)$$

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

$$\text{InformationGainRatio}(S, A) = \frac{\text{Info}(S) - \text{Info}(S, A)}{\text{SplitInfo}(S, A)} \quad (۶)$$

که در آن Split Info نشان‌دهنده اطلاعات بالقوه تولید شده توسط تقسیم  $S$  داده‌های آموزشی به  $m$  زیر مجموعه Split Info از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{SplitInfo}(S, A) = - \sum_{j=1}^m \frac{|S_j|}{|S|} \log_2 \frac{|S_j|}{|S|} \quad (۷)$$

۱. Forward Conditional

۲. Information Gain Ratio

۳. Dubois and Prade

۴. Kononenko

۵. Hunter

۶. Quinlan

۷. Information Theory (IT)

۸. Witten

۹. Xiaomeng and Borgelt

### ۵) مدل‌سازی با روش رگرسیون لجستیک

مدل رگرسیون لجستیک تعمیمی از مدل خطی عمومی است و هر مدلی که با مدل خطی عمومی تطبیق کند می‌تواند با روش رگرسیون لجستیک نیز تطبیق نماید (شیرزادی، ۱۳۸۶). این روش یک تکنیک چند متغیره است که چندین متغیر مستقل اثرگذار بر متغیر وابسته (وقوع و عدم وقوع یک پدیده) را مورد توجه قرار می‌دهد. برای متغیرهای وابسته که باینری نیستند، الگوی خطی نرمال مطمئناً مناسب نیست زیرا خطاهای نرمال متناظر با پاسخ صفر و یک نیستند. روش مهمی که در این وضعیت (باینری) می‌توان استفاده نمود، رگرسیون لجستیک است (نیرومند، ۱۳۷۴). رگرسیون لجستیک دارای سه فرض مهم می‌باشد که عبارتند از: ۱) متغیر وابسته دو حالتی است و فقط مقادیر «صفر یا یک» و «بله و خیر» و غیره را اختیار می‌کند ۲) متغیر وابسته به  $K$  متغیر مستقل وابسته است و رابطه بین این دو نوع متغیر غیر خطی است و از منحنی لجستیک تبعیت می‌کند و ۳) خطای هر مشاهده مستقل از خطای سایر مشاهدات (عدم وجود چند همبستگی<sup>۱</sup>) است (ایستمن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲).

بررسی فرض سوم، با انجام رگرسیون خطی میان متغیرهای مستقل و بررسی دو فاکتور VIF و TOL در دو ستون آخر جدول ضرایب<sup>۳</sup> از خروجی نرم افزار SPSS صورت می‌گیرد. زمانی که مقدار VIF از ۱۰ بیشتر و مقدار TOL از ۰/۱ کمتر گردد، آن متغیر به خاطر ایجاد همبستگی شدید از معادله نهایی حذف خواهد شد؛ چرا که در غیر این صورت معادله نهایی به دست آمده با وجود این متغیرها به دلیل دارا بودن ضرایب متغیر ( $\beta$ ) بزرگ و حتی با وجود معنی‌داری آماری به دلیل خطای استاندارد زیاد، غیر منطقی می‌باشند (ایستمن، ۲۰۰۲). مدل عمومی آن به شکل رابطه زیر می‌باشد:

$$P = 1 / (1 + e^{-Z}) \quad (8)$$

که در آن  $P$  احتمال وقوع حادثه (در این تحقیق حرکت‌های توده‌ای) و  $Z$  پارامتر یا فاکتور خطی می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (9)$$

که در آن  $B_0$  ضریب ثابت مدل،  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  متغیرهای مستقل و  $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$  ضرایب متغیرهای مستقل می‌باشد. جهت تفسیر مناسب در معادله فوق از ضرایبی با لگاریتم طبیعی در مبنای عدد نپر (۲/۷۱۸۲) استفاده شد. چنانچه ضریب مثبت باشد، مقدار لگاریتم تغییر یافته بزرگتر از یک خواهد بود که احتمال وقوع حادثه بیشتر می‌شود و چنانچه ضریب منفی باشد این مقدار از یک کمتر خواهد شد و احتمال وقوع حادثه کمتر می‌شود. از آن جا که کاربرد مدل آماری رگرسیون لجستیک ایجاد ارتباط بین عوامل ناپایداری شیب و متغیر وابسته دو حالتی یعنی وقوع و عدم وقوع حرکت توده‌ای است، علاوه بر ۸۹۵ نقطه‌ی وقوع شناسایی شده در منطقه، ۸۹۵ نقطه‌ی وقوع نیافته دیگر به طور تصادفی در سراسر منطقه انتخاب شده و پس از همپوشانی با لایه‌های عوامل مؤثر به کلاس‌ها شامل حضور نقاط وقوع، کد ۱ و به سایر کلاس‌ها کد صفر تعلق گرفت. این امر در مورد نقاط غیر وقوع نیز صادق است، ابتدا تمامی متغیرهای اثرگذار بر وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان جهت پردازش آماری به نرم افزار SPSS 18 انتقال یافت. بر اساس سطح معنی‌داری آماری ( $\alpha = 5\%$ ) و انتخاب روش گام به گام ابتدا متغیری که بیشترین ارتباط آماری را با متغیر مستقل (وقوع و عدم وقوع حرکت توده‌ای) دارند، به معادله وارد و بر اساس مقدار مثبت و یا منفی ضریب بتا ( $\beta$ ) به عنوان عامل مؤثر شناخته شد. سپس متغیر اثرگذار بعدی پردازش آماری شده و در صورت معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد اطمینان

<sup>۱</sup>. Multicollinearity

<sup>۲</sup>. Eastman

<sup>۳</sup>. Coefficients

به معادله نهایی اضافه گردید و در غیر اینصورت از مدل‌سازی کنار گذاشته می‌شوند. در نهایت پردازش آماری در هفت مرحله تا جایی که شاخص  $-2 \text{logarithm Likelihood (-2LL)}$  به کمتر از  $0/01$  برسد، انجام شد.

#### ۶) مدل‌سازی با روش بیزین رگرسیون لجستیک<sup>۱</sup>

در مطالعات زمین لغزش مدل رگرسیون لجستیک به وفور در وقوع زمین لغزش‌ها به صورت یک متغیر وابسته دو حالتی در ارتباط با فاکتورهای مؤثر مورد بررسی قرار گرفته است (داس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). در این روش نخست مدل رگرسیون لجستیک بر اساس روابط میان متغیرهای وابسته و مستقل ساخته می‌شود. سپس تابع بیزین بر اساس رفتار و پاسخ فاکتورهای مؤثر بر وقوع حرکت توده‌ای به کمک تابع احتمال پیشین<sup>۳</sup> اعمال می‌گردد (داس و همکاران، ۲۰۱۲). در حقیقت، ساخت یک تابع بیزین دارای سه مرحله است که عبارتند از: ۱) تعیین احتمال پیشین برای پارامترها (۲) تعیین تابع درست‌نمایی<sup>۴</sup> برای داده‌ها و ۳) ایجاد تابع توزیع پسین<sup>۵</sup> برای پارامترها (آوالی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). اگر یک دسته داده تعلیمی (training)  $X$  باشد و  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  همان فاکتورهای مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای باشند، و نیز  $y = (y_1, y_2)$  نیز متغیر وابسته (وقوع و عدم وقوع حرکت توده‌ای) باشد. تابع احتمال پسین برای نمونه‌های متعلق به یک کلاس مشخص توسط تابع لجستیک زیر به دست می‌آید:

$$P(\text{Class}|x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{(1 + \exp^{(b + w_0 * c + \sum_{i=1}^n w_i * f(x_i))})} \quad (10)$$

که  $X_i$  بیانگر فاکتورهای مؤثر،  $c$  لگاریتم پیشین نسبت شانس<sup>۷</sup>  $(c = \log \frac{P(\text{class}=0)}{P(\text{class}=1)})$ ،  $b$  انحراف داده‌ها (bias)،  $w_0$  و  $w_i$  وزن‌های آموزش دیده توسط داده‌های تعلیمی، و  $i$ th مؤلفه از فاکتور مؤثر  $x_i$  برای محاسبه تابع  $f(x_i)$  با استفاده از  $\log \frac{P(x_i|\text{class} = 0)}{P(x_i|\text{class} = 1)}$  (برای متغیرهایی که دو حالتی یا باینری هستند) به کار گرفته می‌شود. در مدل ترکیبی بیزین رگرسیون لجستیک تابع تک متغیره پیشین گوسین<sup>۸</sup> برای محاسبه وزن‌های معادله فوق استفاده می‌گردد.

$$P(W|\sigma_i) = N(0, \sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \exp^{-\frac{(w^2)}{2\sigma_i}} \quad (11)$$

که "0" و " $\sigma_i$ " به ترتیب میانگین و واریانس داده‌ها می‌باشند (آوالی و همکاران، ۲۰۱۴).

#### ۷) ارزیابی و مقایسه صحت مدل و نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حساسیت حرکت‌های توده‌ای

در این پژوهش برای ارزیابی و مقایسه نتایج مدل‌سازی دو روش رگرسیون لجستیک و بیزین رگرسیون لجستیک از ماتریس  $2 \times 2$  آزمون درصد صحت پیش‌بینی<sup>۹</sup> جهت استخراج معیارهای زیر استفاده شد. اساس این ماتریس بر چهار فاکتور شامل True Positive (TP)، False Positive (FP)، True Negative (TN) و False Negative (FN) استوار است. فاکتور TP نسبت تعداد پیکسل‌هایی است که به درستی به عنوان وقوع حرکت توده‌ای تقسیم‌بندی شده‌اند و

<sup>2</sup>. Bayesian Logistic Regression

<sup>۲</sup>. Das

<sup>۳</sup>. Prior Probability

<sup>۴</sup>. likelihood function

<sup>۵</sup>. Posterior distribution

<sup>۶</sup>. Avali

<sup>۷</sup>. the prior log odds ratio

<sup>۸</sup>. univariate Gaussian prior

<sup>۹</sup>. Predicted Percentage Correct Test

FP بالعکس TP می‌باشد، یعنی نسبت تعداد پیکسل‌هایی است که به اشتباه به عنوان وقوع حرکت توده‌ای تقسیم‌بندی شده‌اند. فاکتور TN تعداد پیکسل‌هایی است که به درستی به عنوان عدم وقوع حرکت توده‌ای کلاس‌بندی شده‌اند، در حالی که FN تعداد پیکسل‌هایی می‌باشد که به اشتباه به عنوان عدم وقوع حرکت توده‌ای تفکیک شده‌اند. بهترین نتایج زمانی به دست می‌آید که FP کمترین مقدار و TP بیشترین مقدار را دارند (آلتیوواینی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). براساس این چهار فاکتور، مهم‌ترین معیارهای ارزیابی یک مدل به صورت زیر قابل ارائه می‌باشند (تین بوئی و همکاران، ۲۰۱۴؛ اونان<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵).

*Sensitivity*: نشان دهنده این است که چند درصد یا چه تعداد از مناطقی که تحت وقوع حرکت‌های توده‌ای قرار گرفته‌اند به درستی به عنوان وقوع حرکت توده‌ای انتخاب شده‌اند. این معیار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

*Specificity*: نشان دهنده این است که چند درصد یا چه تعداد از مناطقی که تحت وقوع حرکت‌های توده‌ای قرار نگرفته‌اند به درستی به عنوان عدم وقوع حرکت توده‌ای انتخاب شده‌اند. این معیار نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (13)$$

*Accuracy*: نسبت تعداد یا درصد وقوع و عدم وقوع حرکت‌های توده‌ای است که در نتیجه مدل‌سازی به درستی به عنوان وقوع و عدم وقوع حرکت‌های توده‌ای طبقه‌بندی شده‌اند. معادله این معیار به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Accuracy(ACC)} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (14)$$

#### ➤ میانگین مجذور ریشه مربعات خطا<sup>۳</sup> RMSE:

علاوه بر معیارهایی که در بالا برای ارزیابی مدل اشاره شدند، خطاهای میان مقادیر برآوردی مدل و مقادیر واقعی (مشاهده-ای) نیز بیانگر دقت نتایج مدل‌سازی توسط مدل به کار گرفته شده می‌باشند. بر این اساس، در این مطالعه از رابطه میانگین مجذور ریشه مربعات خطا، برای تعیین مقدار خطا و دقت مدل‌ها استفاده شد:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - X_{\text{est}})^2} \quad (15)$$

n تعداد کل نمونه‌ها؛  $X_{\text{obs}}$  مقادیر مشاهده‌ای و  $X_{\text{est}}$  مقادیر برآوردی از خروجی مدل‌ها طی فرایند مدل‌سازی می‌باشند.

#### ➤ مقدار سطح زیر منحنی ROC:

در این روش، مساحت زیر منحنی ROC، با مقادیری بین ۰/۵ تا ۱ برای ارزیابی دقت مدل مورد نظر استفاده می‌شود. مقدار AUROC در واقع کیفیت مدل احتمالاتی را برای پیش‌بینی صحیح وقوع یا عدم وقوع یک رویداد (حرکت توده‌ای) تعریف می‌کند. مدل ایده‌آل مقدار AUC نزدیک به ۱ را نشان می‌دهد درحالی که مقدار نزدیک به ۰/۵ عدم دقت مدل را نشان می‌دهد. معادله این شاخص با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$\text{AUC}_{\text{ROC}} = \sum TP + \sum TP / P + N \quad (16)$$

#### ➤ آزمون ناپارامتریک فریدمن<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>. Althuwaynee

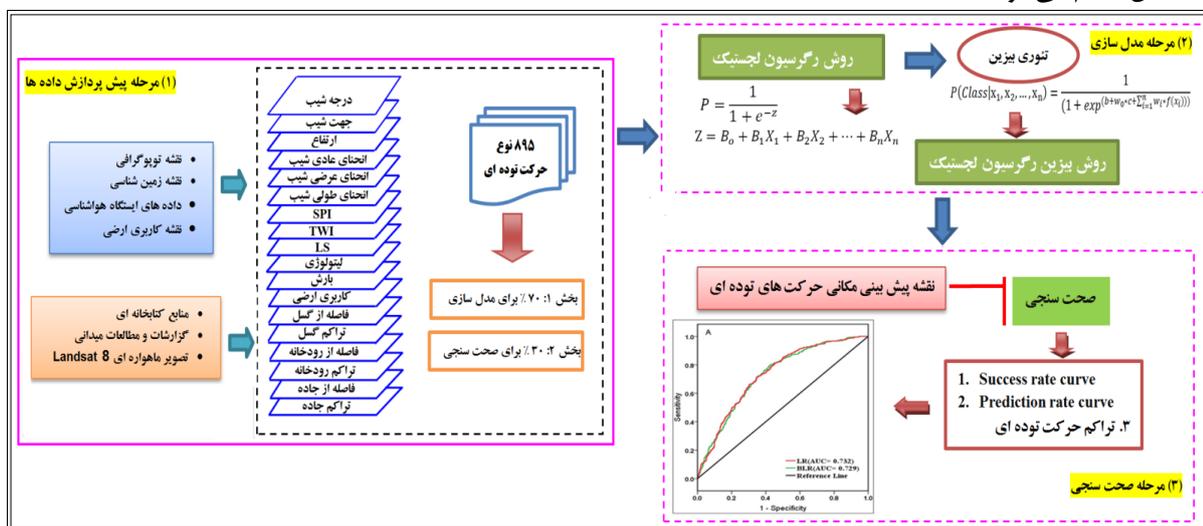
<sup>۲</sup>. Onan

<sup>۳</sup>1. Root Mean Square Error

<sup>۴</sup>2. Receiver Operating Characteristic Curve (ROC)

<sup>۵</sup>3. Friedman's test

برای ارزیابی آماری مقایسه‌ی کارایی روش‌های LR و BLR از آزمون ناپارامتریک فریدمن نیز استفاده شد. روش‌های ناپارامتریک به هیچ‌گونه فرضیات آماری نیاز ندارند (دراک<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). آزمون فریدمن، به عنوان یک آزمون ناپارامتریک حتی اگر داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند، قابل اجراست (مارتینز آلوارز<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). این آزمون یک مدل آماری برای مقایسه‌ی ارزیابی اختلافات معنی‌دار مابین رفتار دو یا چند مدل می‌باشد. در این آزمون ابتدا فرض بر آن است که هیچ‌گونه اختلافی میان عملکرد دو مدل LR و BLR در سطح معنی‌داری  $\alpha=5\%$  (فرضیه صفر) وجود ندارد. بعد از استفاده از شاخص P (احتمال وقوع فرضیه) اگر این شاخص درست باشد ( $5\% <$ )، فرضیه رد و اگر شاخص P درست نباشد ( $5\% >$ ) فرضیه تأیید می‌شود. باید یادآور شد در مقایسه‌ی بین دو یا چند مدل، اگر شاخص P در آزمون فریدمن برای همه‌ی مدل‌ها درست باشد ( $5\% <$ )، نتایج بدست آمده برای مقایسه‌ی مدل‌ها قابل استفاده نخواهد بود (دین بویی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). برای حل این مشکل، آزمون ناپارامتریک ویلکاکسون به منظور بررسی سیستماتیک معنی‌داری آماری میان دو یا چند مدل انجام می‌شود.



شکل ۲: فلوچارت مدل‌سازی رگرسیون لجستیک و بی‌زین رگرسیون لجستیک در استان کردستان

## نتایج و بحث

### ۱. نتایج مدل‌سازی رگرسیون لجستیک

#### الف) آزمون فرضیات رگرسیون لجستیک

همانطور که ذکر شد، یکی از فرض‌های اساسی و مهم رگرسیون لجستیک این است که خطای هر مشاهده مستقل از خطای سایر مشاهدات (عدم وجود چند همبستگی) باشد. بررسی این فرض با انجام آزمون چند همبستگی میان متغیرهای مستقل برای تعیین اینکه کدام عامل بر اساس VIF و TOL از معادله نهایی حذف شوند، انجام گرفت. نتایج جدول (۱) نشان داد که تمامی متغیرها به دلیل VIF کمتر از ۱۰ و TOL بیشتر از ۰/۱ وارد معادله نهایی شدند.

جدول ۱: آزمون فرض چند همبستگی میان متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	VIF	TOL	متغیر مستقل	VIF	TOL
شیب	۲/۹۶۲	۰/۳۳۸	شاخص طول و زاویه شیب (LS)	۴/۰۵۶	۰/۲۴۷

<sup>۱</sup>. Derrac

<sup>۲</sup>. Martinez-Alvarez

<sup>۳</sup>. Dien Bui

جهت شیب	۱/۰۲۷	۰/۹۷۳	لیتولوژی	۱/۱۱۱	۰/۹۰۰
ارتفاع	۱/۱۹۸	۰/۸۳۵	بارش	۲/۰۱۲	۰/۴۹۷
انحنای معمولی شیب	۶/۲۶۶	۰/۱۶۰	کاربری اراضی	۱/۵۳۵	۰/۶۵۱
انحنای طولی شیب	۵/۰۱۲	۰/۲۰۰	فاصله از گسل	۱/۴۵۳	۰/۶۸۸
انحنای عرضی شیب	۱/۵۵۴	۰/۶۴۳	تراکم گسل	۲/۱۴۱	۰/۴۶۷
شاخص قدرت جریان (SPI)	۲/۳۰۷	۰/۴۳۳	فاصله از رودخانه	۱/۴۸۷	۰/۶۷۲
شاخص نمناکی توپوگرافی (TWI)	۲/۲۸۱	۰/۴۳۸	تراکم رودخانه	۱/۶۱۰	۰/۶۲۱
فاصله از جاده	۱/۷۵۰	۰/۵۷۱	تراکم جاده	۱/۸۳۲	۰/۵۴۶

### ب) اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان با روش LR

جدول (۲) یکی از مهم‌ترین خروجی‌های رگرسیون لجستیک می‌باشد چرا که ضرایب معادله Z یا همان معادله احتمال وقوع حرکت توده‌ای را نشان می‌دهد. در اولین ستون جدول، عوامل مؤثر و مقدار عرض از مبدأ (مقدار ثابت) و در ادامه ضرایب نهایی مدل بعد از ۷ مرحله اجرای مدل و ثابت شدن آن نشان داده شده است. ضرایب به دست آمده در جدول (۲) نشان می‌دهد که شاخص تراکم گسل، لیتولوژی، طول و زاویه شیب (LS)، ارتفاع از سطح دریا، کاربری اراضی، شاخص نمناکی توپوگرافی (TWI) و تراکم جاده به ترتیب اثر بیشتری بر وقوع حرکت‌های دامنه‌ای داشته و به عنوان مؤثرترین عوامل بر وقوع حرکت‌های توده‌ای استان کردستان معرفی می‌شوند.

جدول ۲: ضرایب، معنی‌داری آماری، شانس وقوع و آزمون والد از تجزیه و تحلیل آماری با رگرسیون لجستیک در آخرین مرحله (هفتم)

عوامل مؤثر	ضرایب رگرسیون لجستیک ( $\beta$ )	خطای استاندارد تخمین (S.E)	آزمون والد (Wal d)	معنی‌داری آماری (Sig.)	شانس وقوع ( $Expz$ )
ارتفاع از سطح دریا	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۴۵/۵۸۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۸
شاخص نمناکی توپوگرافی (TWI)	-۰/۱۹۵	۰/۰۶۹	۸/۰۶۲	۰/۰۰۵	۰/۸۲۲
شاخص طول و زاویه شیب (LS)	-۰/۰۴۸	۰/۰۱۱	۱۹/۵۰۸	۰/۰۰۰	۱/۰۴۹
لیتولوژی	۰/۱۰۸	۰/۰۱۹	۳۲/۳۹۶	۰/۰۰۰	۱/۱۱۴
کاربری اراضی	-۰/۰۵۷	۰/۰۲۲	۶/۵۴۸	۰/۰۱۱	۰/۹۴۴
تراکم گسل	۰/۸۳۸	۰/۲۵۱	۱۱/۱۹۶	۰/۰۰۱	۲/۳۱۲
تراکم جاده	-۲/۵۳۴	۰/۳۸۷	۴۲/۹۴۱	۰/۰۰۰	۰/۰۷۹
Constant	۳/۶۵۲	۰/۶۶۳	۳۰/۳۸۹	۰/۰۰۰	۳۸/۵۷۱

ضریب مثبت ( $\beta$ )، بیانگر آن است که آن متغیر در احتمال وقوع حرکت‌های توده‌ای نقش بیشتری دارد و بالعکس ضریب منفی ( $\beta$ )، نمایانگر همبستگی ضعیف آن متغیر با احتمال وقوع است. مقدار ضریب منفی رگرسیون گویای مطلبی نیست، زیرا مقدار معنی‌داری آماری آن‌ها که از آزمون والد به دست آمده‌اند، در ستونی به نام sig ارائه شده‌اند و این مقادیر برای تمامی متغیرها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند. این به این معنا است که در سطح ۵ درصد آماری، شواهد کافی برای صفر نبودن متغیرها وجود دارد. این ضرایب فقط نشانگر همبستگی ضعیف متغیرهای مستقل با متغیر وابسته می‌باشد. شانس احتمال وقوع حرکت‌های توده‌ای،  $exp^{\beta}$  برابر افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار ضریب بزرگ و مثبت، وابستگی قوی شانس افتادن

حادثه با متغیرهای مستقل می‌باشد. پس از تعیین وزن عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با روش رگرسیون لجستیک، ضرایب به دست آمده از پردازش آماری به هر کدام از متغیرهای مستقل اعمال شد و در نهایت معادله خطی (Z) به دست آمد. معادله‌های خطی و احتمال وقوع روش رگرسیون لجستیک در پژوهش حاضر به شکل زیر قابل محاسبه است:

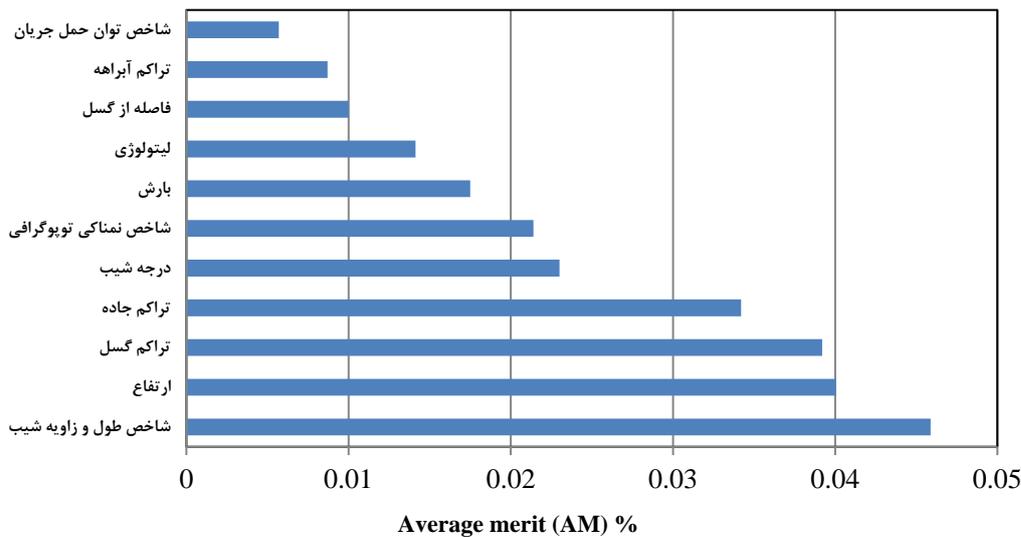
(۱۷)

$$P = \frac{1}{1 + e^{-\left( 3.652 + [(-0.002 \times \text{Elevation})] + [(-0.195 \times \text{TWI})] + [(-0.048 \times \text{LS})] + [(0.108 \times \text{Lithology})] + [(-0.057 \times \text{Landuse})] + [(0.838 \times \text{Fault density})] + [(-2.534 \times \text{Road density})] \right)}}$$

## ۲. نتایج مدل‌سازی بیزین رگرسیون لجستیک

### الف) اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان با روش BLR

تعیین میزان اهمیت نسبی نقش عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای زمین در روش BLR با استفاده شاخص IGR تعیین شد. نتایج این بررسی در شکل شماره ۳ مشهود است. مشاهده این شکل نشان می‌دهد که شاخص طول و زاویه شیب، ارتفاع از سطح دریا، تراکم گسل، تراکم جاده، درجه شیب، شاخص نمناکی توپوگرافی، بارندگی، لیتولوژی، فاصله از جاده، تراکم آبراهه و شاخص حمل جریان به ترتیب بیشترین نقش را در وقوع حرکت‌های توده‌ای استان کردستان با روش رگرسیون لجستیک و بیزین رگرسیون داشته‌اند.



شکل (۳) اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر وقوع حرکات دامنه‌ای استان کردستان با مدل BLR (نویسندگان، ۱۳۹۷).

بر اساس روش IGR از ۱۸ متغیر مطالعه شده هفت متغیر حذف و با ۱۱ متغیر باقیمانده مدل‌سازی با روش BLR صورت گرفت. ضرایب هر کدام از متغیرهای اثر گذار بر وقوع حرکت‌های دامنه‌ای در روش بیزین رگرسیون لجستیک در جدول شماره (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳: ضرایب و شانس وقوع هر کدام از متغیرهای اثر گذار بر وقوع حرکت‌های توده‌ای خاک در روش BLR

عوامل مؤثر	ضرایب (β) BLR	شانس وقوع (exp β)	عوامل مؤثر	ضرایب (β) BLR	شانس وقوع (exp β)
شیب	۰/۰۵	۱/۰۵۱	لیتولوژی	۰/۱۱۳	۱/۱۱۹
ارتفاع از سطح دریا	-۰/۱۹۹	۰/۸۲۰	فاصله از گسل	-۰/۰۰۳	۰/۹۹۷

۱/۰۸۵	۰/۰۸۲	تراکم گسل	۱/۱۵۷	۰/۱۴۶	شاخص قدرت جریان (SPI)
۰/۹۶۶	-۰/۰۳۵	تراکم رودخانه	۱/۰۷۷	۰/۰۷۴	شاخص نمناکی توپوگرافی (TWI)
۰/۶۹۶	-۰/۳۶۴	تراکم جاده	۱/۲۹۶	۰/۲۶۰	شاخص طول و زاویه شیب (LS)
۱/۰۵۱	-۰/۰۴۸	ضریب ثابت مدل	۱/۱۳۶	۰/۱۲۸	بارش

پس از تعیین ضرایب (وزن) عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با روش بیزین رگرسیون لجستیک، ضرایب به دست آمده از پردازش آماری به هر کدام از متغیرهای مستقل اعمال شد و در نهایت معادله خطی (Z) به دست آمد. معادله احتمال وقوع زمین لغزش در پژوهش حاضر به شکل زیر نشان داده شده است:

(۱۹)

$$P = \frac{1}{e^{\left( \begin{aligned} &(-0.048) + [(0.05 \times \text{Slope})] + [(-0.199 \times \text{Elevation})] + [(0.146 \times \text{SPI})] + [(0.074 \times \text{TWI})] + \\ &- [(0.260 \times \text{LS})] + [(0.128 \times \text{Rainfall})] + [(0.113 \times \text{Lithology})] + [(-0.003 \times \text{Distance to fault})] + \\ &[(0.082 \times \text{Fault density})] + [(-0.364 \times \text{Road density})] + [(-0.035 \times \text{River density})] \end{aligned} \right)}}$$

#### مقایسه ارزیابی کارایی مدل‌های LR و BLR با داده‌های تعلیمی (Training dataset)

جدول شماره (۴) نتایج ارزیابی مدل‌سازی با دو روش LR و BLR برای داده‌های تعلیمی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج ارزیابی مدل‌سازی با دو روش LR و BLR برای داده‌های تعلیمی و اعتبارسنجی

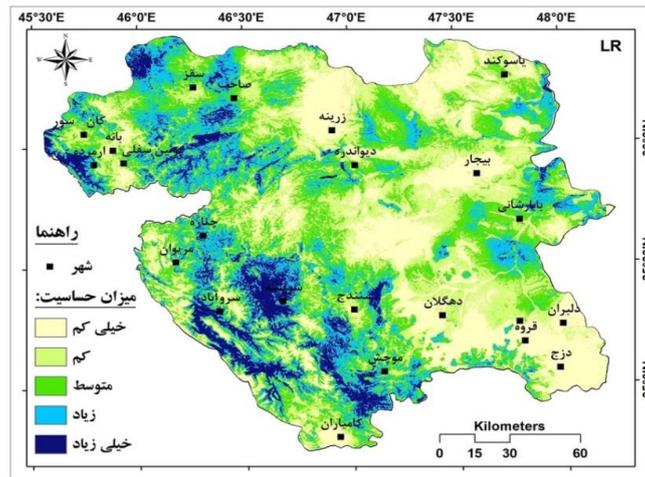
شاخص	داده‌های تعلیمی		داده‌های اعتبارسنجی	
	LR	BLR	LR	BLR
True positive (TP)	۴۲۷	۴۱۴	۱۷۸	۱۷۸
True negative (TN)	۳۹۵	۳۸۰	۱۷۲	۱۶۱
False positive (FP)	۱۷۷	۱۹۲	۸۵	۸۵
False negative (FN)	۲۰۹	۲۲۶	۹۱	۱۰۲
Specificity	۰/۷۰۷	۰/۶۸۳	۰/۶۷۷	۰/۶۷۷
Accuracy	۰/۶۵۴	۰/۶۲۷	۰/۶۵۴	۰/۶۱۲
Sensitivity	۰/۶۹۱	۰/۶۶۴	۰/۶۶۲	۰/۶۳۶
RMSE	۰/۷۰۷	۰/۶۸۳	۰/۶۶۹	۰/۶۵۴
AUROC	۰/۶۷۱	۰/۶۴۷	۰/۶۶۵	۰/۶۴۴

نتایج این جدول نشان می‌دهد که اگرچه مقادیر شاخص‌های Accuracy، Specificity، Sensitivity و RMSE و AUROC در مدل LR نسبت به مدل BLR دارای مقادیر بالاتری می‌باشند. با این حال، تفاوت این دو روش چندان

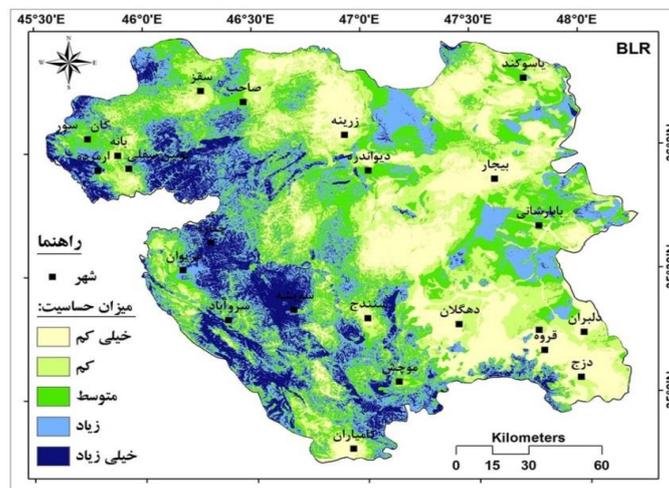
چشمگیر نبوده و مقادیر این شاخص‌ها نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل BLR نیز همانند مدل LR پتانسیل خوبی در شناسایی مناطق حساس به وقوع حرکت‌های توده‌ای زمین در استان کردستان را دارد.

### ۳. تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حساسیت وقوع حرکت‌های توده‌ای منطقه مورد مطالعه

بر اساس توضیحات بخش روش انجام پژوهش، نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای بر اساس مدل‌های LR و BLR با روش Quantile طبقه‌بندی و تهیه شدند.



شکل ۴: نقشه پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای استان کردستان با روش رگرسیون لجستیک



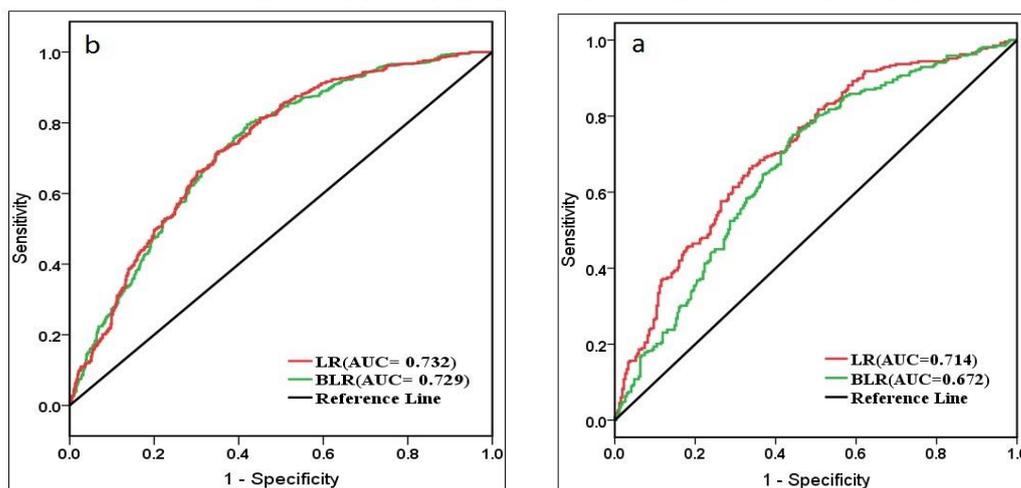
شکل ۵: نقشه پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای استان کردستان با الگوریتم بیزین رگرسیون لجستیک

نتایج حاصل از شکل ۴ و جدول ۵ در مدل LR نشان می‌دهد در حدود ۸/۰۶ درصد از مساحت استان کردستان دارای میزان حساسیت خیلی زیاد به وقوع حرکت‌های توده‌ای خاک می‌باشد. این میزان در روش BLR (شکل ۵ و جدول ۶) ۱۲/۴۶ درصد می‌باشد. مشاهده نقشه‌های حساسیت به حرکت‌های توده‌ای بر اساس روش‌های LR و BLR نشان دادند که بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در نیمه غربی استان کردستان اتفاق می‌افتد. این مناطق منطبق بر نواحی کوهستانی اورامات، دامنه‌های ارتفاعات کوسالان و چهل چشمه، گردنه‌های صلوات آباد (شرق شهر سنندج)، مروارید (مابین سنندج و کامیاران)، خان (مابین سقز و بانه) و گردنه آریز (مابین سنندج و مریوان) می‌باشد. بررسی متغیرهای مؤثر در وقوع حرکت‌های توده‌ای نشان می‌دهد که این بخش از استان به دلیل کوهستانی بودن منطقه دارای دامنه‌های با شیب تند

هستند و با توجه به جهت ارتفاعات (شمالی-جنوبی) دامنه‌های غربی که رو به سمت بادهای باران آور غربی می‌باشند از بارندگی بیشتری برخوردار هستند. از طرف دیگر دائمی بودن رودخانه‌ها و پرآب بودن آنها باعث زیربریدگی دامنه‌ها توسط جریان رود شده و سطح انکای آن‌ها را کاهش می‌دهد. در حالی که مناطق با شیب خیلی کم شرق استان، شامل دشت‌های قروه، دهگلان، بیجار و کامیاران دارای حساسیت خیلی کم و کم هستند.

#### ۴. صحت‌سنجی نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان

به منظور 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<sup>۱</sup> SRC نام دارد و در هنگام استفاده از داده‌های صحت‌سنجی به منحنی ارزیابی صحت نقشه پیش‌بینی مکانی، واژه PRC<sup>۲</sup> اطلاق می‌گردد. بهترین حالت این منحنی‌ها زمانی است که مقدار سطح زیر این منحنی‌ها برابر عدد یک باشد و بالعکس هر چه به سمت صفر نزدیک‌تر باشد، پیش‌بینی ضعیف‌تری حاصل می‌گردد (عمر و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۶: ارزیابی نقشه‌های پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع حرکت‌های دامنه‌ای بر اساس روش LR و الگوریتم BLR با داده‌های تعلیمی (a) و داده‌های صحت‌سنجی (b)

شکل (۶) نشان می‌دهد که در منحنی SRC بر اساس داده‌های تعلیمی، مقدار سطح زیر منحنی با استفاده از روش LR، ۰/۷۱۴ می‌باشد که به این معنی است این روش ۷۱/۴ درصد توانایی پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش را داشته است؛ در حالی که در روش BLR برای همین نوع داده با دارا شدن مقدار ۰/۶۷۲ مساحت زیر این منحنی، ۶۷/۲ 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 روش LR و روش BLR، ۰/۷۳۲ و ۰/۷۲۹ به دست آمد. بنابراین نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های به دست آمده با هر دو روش تأیید شد؛ با این توضیح که روش LR مقدار بیشتر درصد مساحت زیر منحنی را هم برای داده‌های تعلیمی و هم داده‌های آموزشی به خود اختصاص داده است. همچنین به منظور ارزیابی صحت‌سنجی بیشتر نقشه‌های بدست آمده، علاوه بر درصد مساحت زیر منحنی‌های SRC و PRC از شاخص تراکم حرکت‌های توده‌ای استفاده شد. بر این اساس از سمت کلاس با احتمال وقوع خیلی کم به سمت احتمال وقوع خیلی زیاد به مقدار این شاخص

<sup>۱</sup>. Success Rate Curve

<sup>۲</sup>. Prediction Rate Curve

اضافه می‌گردد. این بدان معنی است که مناطقی که احتمال وقوع خیلی زیاد دارند، دارای تعداد وقوع بیشتری از این حرکت‌های توده‌ای می‌باشد. مشاهده جدول شماره ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در هر دو روش با افزایش احتمال وقوع به میزان تراکم حرکت‌های توده‌ای افزوده شده است. بنابراین صحت نقشه‌های پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای مورد تأیید واقع شدند.

جدول ۵: تراکم حرکت‌های توده‌ای زمین در استان کردستان با روش رگرسیون لجستیک

احتمال وقوع	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد زمین لغزش	درصد زمین - لغزش	تراکم زمین لغزش
خیلی کم	۷۳۲۸۷۶۶	۲۲/۸۲	۴۸	۵/۳۶	۰/۲۳
کم	۸۵۳۱۵۹۷	۲۶/۵۶	۱۰۸	۱۲/۰۷	۰/۴۵
متوسط	۸۰۲۷۲۵۷	۲۴/۹۹	۲۵۲	۲۸/۱۶	۱/۱۳
زیاد	۵۶۴۶۸۴۹	۱۷/۵۸	۲۹۸	۳۳/۳۰	۱/۸۹
خیلی زیاد	۲۵۸۷۸۵۴	۸/۰۶	۱۸۹	۲۱/۱۲	۲/۶۲

جدول ۶: تراکم حرکت‌های توده‌ای زمین در استان کردستان با روش بیزین رگرسیون لجستیک

احتمال وقوع	تعداد پیکسل	درصد پیکسل	تعداد زمین لغزش	درصد زمین - لغزش	تراکم زمین لغزش
خیلی کم	۶۰۶۸۹۳۶	۱۹/۰۲	۳۲	۳/۵۷	۰/۱۹
کم	۷۴۷۵۵۲۸	۲۳/۴۳	۹۷	۱۰/۸۴	۰/۴۶
متوسط	۷۷۲۲۸۴۵	۲۴/۲۱	۱۹۳	۲۱/۵۶	۰/۸۹
زیاد	۶۶۵۵۴۶۶	۲۰/۸۶	۳۳۲	۳۷/۰۹	۱/۷۸
خیلی زیاد	۳۹۷۶۲۱۲	۱۲/۴۶	۲۴۱	۲۶/۹۲	۲/۱۶

به منظور تجزیه و تحلیل آماری احتمال وقوع حرکت‌های توده‌ای، کارکرد مدل‌های LR و BLR با استفاده از آزمون فریدمن (فریدمن<sup>۱</sup>، ۱۹۳۷)، در سطح معنی‌داری ۵٪ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون فریدمن در جدول (۷) نشان داده شده است. در این جدول میانگین رتبه، کای سکوئر و سطح معنی‌داری آماری گزارش شده است.

جدول ۷: ارزیابی آماری مقایسه کارایی روش‌های LR و BLR با استفاده از آزمون فریدمن

مدل	میانگین رتبه	کای سکوئر	معنی داری آماری
LR	۱/۱۷	۵۴۵/۷۷۹	۰/۰۶۱
BLR	۱/۸۳		

با توجه به جدول (۷) در مقایسه بین دو مدل در آزمون فریدمن، شاخص معنی‌داری آماری نادرست می‌باشد (۵٪ >). بدین ترتیب فرضیه صفر رد شده و بر اساس معنی‌داری آماری (در سطح ۹۵ درصد) بین روش‌های LR و BLR اختلاف

<sup>۱</sup>. Friedman

معنی‌داری ( $0/05 > 0/061$ ) مشاهده نشد و عملکرد دو مدل LR و BLR در پیش‌بینی مکانی حرکت‌های توده‌ای به هم نزدیک است.

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حساسیت وقوع حرکت‌های توده‌ای استان کردستان به منظور مدیریت نواحی حساس و استفاده در طرح‌های آمایش سرزمین و توسعه مناطق روستایی و شهری می‌باشد. همچنین ارائه روش ترکیبی بی‌زین رگرسیون لجستیک و مقایسه کارایی آن با روش رگرسیون لجستیک و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان از اهداف دیگر این پژوهش است. برای رسیدن به این اهداف بر اساس مرور منابع از ۱۸ عامل تأثیرگذار بر وقوع حرکت‌های توده‌ای استفاده گردید که عبارتند از: درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای معمولی شیب، انحنای عرضی شیب، انحنای طولی شیب، شاخص توان حمل جریان، شاخص نمناکی توپوگرافی، فاصله از جاده، شاخص طول و زاویه شیب، لیتولوژی، بارش، کاربری ارضی، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه و تراکم جاده. روش‌های به کار گرفته شده در این پژوهش بر مبنای مقایسه روش رگرسیون لجستیک و روش بی‌زین رگرسیون لجستیک می‌باشد. بر این اساس، مهم‌ترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر عبارتند از:

❖ ارزیابی مدل‌های ارائه شده توسط شاخص‌های *Specificity*، *Sensitivity*، *Accuracy*، *RMSE* و *AUROC* نشان داد که در داده‌های تعلیمی و اعتبارسنجی، مدل LR نسبت به مدل BLR دارای مقادیر بیشتر و مقدار معیار *FP* کمتر می‌باشند. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل LR نسبتاً عملکرد بهتری نسبت به مدل BLR دارد.

❖ درصد مساحت زیر منحنی نقشه پهنه‌بندی حرکت‌های توده‌ای به دست آمده در مدل BLR در مقایسه با مدل LR به ترتیب در داده‌های تعلیمی  $67/2$  و  $71/4$  برای داده‌های صحت سنجی مقدار  $72/9$  و  $73/2$  به دست آمد. بر اساس آزمون ناپارامتری فریدمن، اختلاف معنی‌داری (در سطح ۹۵ درصد) بین روش‌های BLR و LR در پیش‌بینی مکانی مناطق حساس به وقوع حرکت‌های توده‌ای زمین مشاهده نشد. بنابراین می‌توان از مدل BLR نیز به مانند مدل LR به عنوان یک مدل معیار جهت مقایسه کارایی مدل‌های جدید استفاده نمود.

❖ جدول شماره ۵ و ۶ نشان می‌دهند که از سمت کلاس حساسیت خیلی کم به سمت حساسیت خیلی زیاد بر مقدار ترکم زمین لغزش‌ها افزوده شده است. این نتیجه بیانگر این موضوع است که نقشه‌های به دست آمده به خوبی با مناطقی که حرکت‌های توده‌ای در آنجا اتفاق افتاده اند مطابقت دارند. همچنین عملکرد این دو مدل بر اساس آزمون فریدمن نیز بررسی و مشخص گردید که اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد بین نتیجه این دو مدل مشاهده نگردید و می‌توان گفت از این دو مدل می‌توان برای شناسایی مناطق مستعد به وقوع حرکت‌های توده‌ای در استان کردستان اعتماد کرد.

❖ با نگاهی به خصوصیات زمین‌شناسی و ساختار تکتونیکی استان کردستان می‌توان گفت که بیشتر زمین لغزش‌های کردستان شرقی تحت تأثیر رسوبات جوان، سست (منفصل)، ریزدانه با قابلیت نفوذپذیری و اشباع زیاد دوران کواترنر می‌باشد در حالیکه بیشتر زمین لغزش‌های کردستان غربی ناشی از ساختار تکتونیکی و جود گسل‌های فراوان با تراکم بالا به دلیل برخورد صفحه آسیا و عربستان می‌باشد که چنین ساختارهای با درز، شکاف و چین‌های شکننده و جوانی را بوجود آورده‌اند. به طوری که این ساختارها در اثر هوازدگی و انبساط و انقباض درز و شکاف‌ها در امتداد گسل‌ها حرکت‌های توده‌ای را بوجود آورده‌اند.

❖ مدل ترکیبی بی‌زین رگرسیون لجستیک توانایی خوبی در شناسایی مناطق حساس به وقوع حرکت‌های توده‌ای دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد با سایر روش‌های داده‌کاوی از جمله شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، الگوریتم‌های درخت تصمیم (*Random Forest*, *Naïve Baes Tree*, ...) نیز برای ارزیابی توانایی بیشتر این مدل مقایسه شود.

❖ نقشه پیش‌بینی مکانی دقیق‌تر توسط روش‌ها و تکنیک‌های جدید الگوریتم مبنای برای شناسایی مناطق حساس به حرکت‌های توده‌ای می‌تواند به مدیران، برنامه‌ریزان در طرح‌های آمایش سرزمین و توسعه اراضی شهری و روستایی به خصوص در مناطق کوهستانی جهت اجرای پروژه‌های توسعه‌ای، انتقال خطوط لوله، احداث جاده و... کمک شایانی بنماید.

### منابع

- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ بهشتی جاوید، ابراهیم؛ فتحی، محمدحسین، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیاهرود)، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۲، صص. ۱۸-۱.
- شیرزادی، عطالله، ۱۳۸۶، پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از مدل منطقه‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران.
- کرم، عبدالامیر؛ محمودی، فرج اله، ۱۳۸۴، مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در زاگرس چین خورده (حوزه آبریز سرخون در استان چهارمحال و بختیاری). مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱، صص. ۱۴-۱.
- متولی، صدرالدین؛ اسماعیلی، رضا؛ حسین‌زاده محمد مهدی، ۱۳۸۸، تعیین حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز واز (استان مازندران). فصلنامه جغرافیای طبیعی، شماره ۵، صص. ۸۴-۷۳.
- میرصانعی، روح الله؛ مهدویفر، محمدرضا، ۱۳۸۵، روش‌ها و معیارهای بهینه جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، پژوهش‌سکده سوانح طبیعی، صص. ۲۷۷.
- نیرومند، حمیدرضا، ۱۳۷۴، ترجمه رگرسیون خطی کاربردی، مشهد، انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ اول، صص. ۴۱۹.
- Akgun, A., Turk, N., 2011, mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: a case study from the Ayvalik Region, NW Turkey. *Computer Geosciences*, Vol. 37, Pp. 1515–1524.
- Althuwaynee, O.F., Biswajeet, P., Park, H-J., Lee, J.H., 2014, novel ensemble decision tree-based CHi-squared automatic interaction detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, Vol. 11(6), Pp. 1063–1078.
- Arnone E., Francipane A., Scarbaci A., Puglisi C. and Noto L.V., 2016, Effect of raster resolution and polygon-conversion algorithm on landslide susceptibility mapping. *Environmental Modelling and Software*, 84: 467-481.
- Avali Viji R, F. Cooper Gregory, MD and Vanathi Gopalakrishnan, 2014, Application of Bayesian Logistic Regression to Mining Biomedical Data, *AMIA Annual Symposium Proceedings*, Pp. 266–273.
- Brabb E.E., 1984, Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *Proc. of the IV International Symposium on Landslides, Toronto*, 1: 307-323.
- Dahal R.K., Hasegawa S., Nonomura A., Yamanaka M., Masuda T. and Nishino, K., 2008, GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping, *Environmental Geology*, 54(2):311-324.
- 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*, Vol. 135, Pp. 122-148.
- Derrac, J., García, S., Molina, D., Herrera, F., 2011, A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evol Comput* 1:3–18.

- 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, Vol. 78, Pp. 1749–1776.*
- Dubois, D., Prade, H., 1990, *Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets. International Journal of General Systems, Vol. 17, Pp.191–209.*
- Friedman, M., 1937, *the use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. J Am Stat Assoc. Vol. 32, Pp. 675–701.*
- Gokhan, D., Mustafa, A and Aykut, A., 2014, *Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey), Arabian Journal of Geosciences, 15 pp.*
- Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., and Laudon, H., 2009, “*Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model*”. *Journal of Hydrology. Vol. 373, Pp. 15-23.*
- Guha S., Below R P.h. and Hoyois P.h., (2015, *EM-DAT: International Disaster Database - www.emdat.be – Université Catholique de Louvain.*
- Haque U., Blum P., da Silva P.F., Andersen P., Pilz J., Chalov S.R., Malet J.P., Auflič M.J., Andres N., Poyiadji E. and Lamas P.C., 2016, *Fatal landslides in Europe. Landslides, 13(6):1545-1554.*
- Hunter, E., Matin, J., Stone, P., 1966, *Experiments in induction. Academic, New York.*
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., Bui, D.T., 2015, *Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. Catena, 133, 266-281.*
- Jaedicke C., Van Den Eeckhaut M., Nadim F., Hervas J., Kalsnes B., Vangelsten BV., Smith JT., Tofani V., Ciurean R., Winter MG., Sverdrup-Thygeson K., Syre E., Smebye H., 2014, *Identification of landslide hazard and risk ‘hotspots’ in Europe. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73:325-339.*
- Kononenko, I., 1994, *estimating attributes: analysis and extensions of relief. In: Bergadano, F., Raedt, L. (Eds.) Machine learning: ECML-94. Springer, Berlin, Pp. 171–182.*
- Keesstra S.D., Quinton J.N., van der Putten W.H., Bardgett R.D. and Fresco L.O., 2016, *The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. Soil, 2: 111-128.*
- Kothyari, U., Jain, M., and Raju, K.G.R., 2002, “*Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS*”. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques. Vol. 47, Pp. 693-706.*
- Martínez-Álvarez F, Reyes J, Morales-Esteban A, Rubio-Escudero C., 2013, *determining the best set of seismicity indicators to predict earthquakes. Two case studies: Chile and the Iberian Peninsula. Knowl-Based Syst. Vol. 50, Pp.198–210.*
- Moore, I.D. and Grayson, R.B., 1991, “*Landson. Digital terrain modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application*”. *Hydrol. Process. Vol. 5, pp. 3-30.*
- Moore, I.D. and Wilson, J. P., 1992, “*Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation*”. *Journal of Soil and Water Conserve. 47, pp. 423-428.*
- Nandi, A., Shakoor, A., 2010, *A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. Engineering Geology. Vol. 110, Pp.11–20.*
- Lan H.X, Zhou C. H, Wang L.J. Zhang, H.Y. and Li, R.H, 2004, *Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China. Engineering Geology, 76: 109-128.*
- Quinlan, J.R., 1993, *C4.5: programs for machine learning. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.*

- Stocking M. and Murnaghan N., 2001, *Handbook for the field assessment of land degradation*. Earth scan.
- 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*, Vol. 40(4), Pp. 669-678.
- 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*, Vol. 64, Pp. 1639-1656.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B., 2012, *Landslide susceptibility mapping at HoaBinh province (Vietnam) using an adaptive neuro fuzzy inference system and GIS*. *Computers & Geosciences*, Vol. 45, Pp. 199–211.
- Tsai, F., Lai, J-S., Chen, W.W., Lin, T-H., 2013, *Analysis of topographic and vegetative factors with data mining for landslide verification*. *Ecological Engineering*, Vol. 61, Pp. 669-677.
- 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>.
- 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*, Vol. 512, Pp. 332-343.
- Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Neamah Jebur, M., Shafapour Tehrany, M., 2014, *Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia*. *Catena*, Vol. 118, Pp. 124–135.
- Vandromme R., Thiéry Y., Sedan O. and Bernardie S., 2016, *An integrated approach coupling physically based models and probabilistic method to assess quantitatively landslide susceptibility at different scale: application to different geomorphological environments*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 18: p. 13282.
- Witten, I.H., Frank, E., Mark, A.H., 2011, *Data mining: practical machine learning tools and techniques (third edition)*. Morgan Kaufmann, Burlington.
- Wang, L-J., Sawada K., Moriguchi S., 2013, *Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy*. *Computers and Geosciences*, Vol. 57, Pp. 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*, Vol. 23, Pp. 97–120.
- Xiaomeng, W., Borgelt, C., 2004, *Information measures in fuzzy decision trees*. *Fuzzy Systems, 2004 Proceedings 2004 I.E. International Conference on*. Vol. 81, Pp. 85–90.
- 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*, Vol. 6, Pp. 2873–2888.