

بررسی نقش عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی و روش‌های انتخاب ویژگی مبتنی بر یادگیری ماشین

سارا بهشتی فر^{۱*}، پویا نوروزی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

Sara_Beheshtifar@yahoo.com

^۲ دانشجوی کارشناسی‌ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

noruzipooya@yahoo.com

(دریافت: تیر ۱۴۰۳، تصویب: مرداد ۱۴۰۳)

چکیده

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی است که می‌تواند خسارات جانی و مالی فراوان به دنبال داشته باشد. شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش برای کاهش خسارات ناشی از وقوع آن، امری ضروری است. یکی از روش‌های کارآمد برای تعیین مناطق پرخطر، تهیه نقشه حساسیت در برابر وقوع این پدیده می‌باشد. تولید یک نقشه حساسیت زمین‌لغزش دقیق، مستلزم انتخاب صحیح عوامل مؤثر و تعیین وزن مناسب برای آن‌ها می‌باشد. هم انتخاب عوامل و هم تعیین وزن آنها می‌توانند بر اساس روش‌های مبتنی بر دانش کارشناسی و یا روش‌های یادگیری ماشین و مبتنی بر داده‌ها صورت گیرند. در این پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی هفده عامل مرتبط با وقوع زمین‌لغزش شامل زمین‌شناسی، کاربری زمین، پوشش زمین، نوع خاک، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، انحنای پلان، انحنای پروفیل، میزان بارش، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص حمل رسوب (STI)، شاخص قدرت آبراهه (SPI) و شاخص ناهمواری زمین (TRI) برای استان آذربایجان غربی، در محیط سیستم اطلاعات مکانی، تهیه و آماده‌سازی شدند. این عوامل به عنوان ویژگی‌ها و یا متغیرهای وابسته مد نظر قرار گرفتند. علاوه بر آن‌ها، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های قبلی براساس داده‌های تاریخی منطقه مورد مطالعه نیز تولید و به عنوان متغیر مستقل تعریف شد. سپس شش روش مختلف انتخاب ویژگی در حوزه یادگیری ماشین شامل روش همبستگی، بهره اطلاعات، نسبت بهره، زیرمجموعه ویژگی‌ها بر اساس همبستگی (CFS)، Relief F و عدم قطعیت متقارن، برای تعیین میزان همبستگی عوامل مختلف با یکدیگر، نقش و میزان تأثیر هر عامل در وقوع زمین‌لغزش و در نهایت انتخاب یا عدم آن به عنوان عامل تأثیرگذار براساس داده‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج پژوهش نشان داد که روش‌های مختلف انتخاب ویژگی ممکن است خروجی‌های متفاوتی در خصوص عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش داشته باشند. با این حال، زمین‌شناسی، کاربری زمین و TWI در تمامی روش‌های مورد بررسی، انتخاب شدند. به این ترتیب عوامل مذکور را می‌توان با اطمینان بیشتری به عنوان عوامل مؤثر معرفی نمود. از سوی دیگر، انحنای پلان، انحنای پروفیل و جهت شیب، بر اساس داده‌های موجود، در هیچ‌یک از روش‌های مورد بررسی جزو عوامل انتخابی نبوده‌اند و می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. سه روش عدم قطعیت متقارن، بهره اطلاعات و نسبت بهره، از لحاظ عوامل انتخابی نتایج مشابهی داشته‌اند ولی وزن به‌دست آمده برای عوامل و اولویت آنها در برخی از موارد با یکدیگر متفاوت بوده‌است. نتایج روش Relief F به دلیل ماهیت آن و نحوه تعریف همسایه‌ها، تفاوت بیشتری با سایر روش‌ها داشته است؛ به گونه‌ای که فاصله از رودخانه که در سایر روش‌ها جزو عوامل مؤثر بوده، در این روش انتخاب نشده‌است. در مقابل، نوع خاک و فاصله از جاده فقط در این روش به عنوان عوامل تأثیرگذار انتخاب گردیده‌اند. به این ترتیب، با به کارگیری روش‌های مختلف، امکان انتخاب عوامل متنوعی فراهم می‌شود. در نهایت، بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و انتخاب برخی از آنها بر اساس روش‌های انتخاب ویژگی و داده‌های منطقه مورد مطالعه، منجر به کاهش پیچیدگی مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین و جلوگیری از خطای بیش‌برازش و در نتیجه تعمیم مدل و قابلیت بالای آن در مواجهه با داده‌های جدید می‌گردد. نتایج پژوهش می‌تواند در بالا رفتن دقت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و پیش‌گیری از خسارات ناشی از آن مؤثر باشد و تصمیم‌گیران را در مدیریت بلایا و برنامه‌ریزی و توسعه یاری نماید.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، روش‌های انتخاب ویژگی، سیستم اطلاعات مکانی، استان آذربایجان غربی.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

زمین لغزش یکی از مخاطرات طبیعی مربوط به زمین است که می‌تواند آسیب‌های جدی به انسان‌ها و محیط‌زیست وارد نماید [۱،۲]. این پدیده تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی همچون شرایط توپوگرافی، فعالیت زمین‌ساختی، شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و ساخت و سازها رخ می‌دهد. زمین لغزش‌ها، پیامدهای منفی نظیر تخریب پوشش گیاهی، جاده‌ها و منازل مسکونی، فرسایش خاک، افزایش بار رسوبی و از همه مهم‌تر تلفات جانی را به دنبال دارند [۳]. کشور ایران نیز با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد و شرایط متنوع اقلیمی و زمین‌شناسی، عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از زمین لغزش‌ها دارا می‌باشد.

برنامه‌ریزی برای پیش‌گیری از خسارت‌های ناشی از زمین لغزش و یا حداقل کاهش آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و موجب جلوگیری از هدر رفتن بسیاری از سرمایه‌های ملی می‌شود. یکی از راه‌های کاهش اثرات منفی زمین لغزش، شناسایی مناطق پرخطر و در نهایت برنامه‌ریزی بر اساس آن می‌باشد [۴]. با مشخص شدن محدوده‌های پرخطر یا با احتمال زیاد وقوع زمین لغزش در یک منطقه، می‌توان در پروژه‌های عمرانی، شهرسازی و سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت، تصمیمات صحیح و معقولی را اتخاذ کرد. نقشه حساسیت زمین لغزش، ابزار سودمندی در حوزه مدیریت خطرات زمین لغزش است که در آن میزان احتمال وقوع زمین لغزش در قسمت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، مشخص می‌گردد [۵]. ماهیت مکانی اغلب عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش از یک سو و قابلیت سیستم اطلاعات مکانی (GIS) در جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، مدیریت، تجزیه و تحلیل و نمایش داده‌های مکانی از سوی دیگر، این سیستم را به ابزاری کارآمد برای تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش تبدیل نموده است [۶،۷].

تاکنون روش‌های کمی متعددی برای ارزیابی امکان رخداد زمین لغزش و تهیه نقشه حساسیت با استفاده از GIS به کار گرفته شده‌اند. از جمله آن‌ها می‌توان انواع مدل‌های دو متغیره و چندمتغیره آماری، رگرسیون لجستیک، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، فرایند تحلیل شبکه، شبکه عصبی مصنوعی و مدل منطق فازی را ذکر کرد [۸-۱۲]. این روش‌ها در حالت کلی، مبتنی بر دانش کارشناسی و یا داده‌مبنا

هستند. در روش اول (دانش-مبنا)، عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از دانش و تجربه افراد متخصص تعیین می‌گردند. سپس با استفاده از نظرات کارشناسی، اهمیت نسبی هر عامل با روشی نظیر فرایند تحلیل سلسله مراتبی تعیین می‌گردد. در روش دوم (داده-مبنا)، براساس داده‌های تاریخی پدیده زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، عوامل مؤثر و وزن آنها مشخص می‌شوند. با مدل‌هایی همچون مدل‌های آماری دو متغیره و چندمتغیره و نسبت فراوانی، بر اساس اطلاعات زمین لغزش‌های قبلی، می‌توان رابطه بین زمین لغزش و عوامل مؤثر بر وقوع آن را مورد بررسی قرار داد [۱۳-۱۶].

تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه تولید نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده و یادگیری ماشین در کشورمان صورت گرفته؛ با اینحال تعداد مطالعات مربوط به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف انتخاب ویژگی جهت تعیین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، بخصوص روش‌های به کار رفته در مطالعه حاضر، بسیار اندک بوده‌است. در این پژوهش، ابتدا نحوه انتخاب ویژگی‌ها در شش روش مختلف مربوط به یادگیری ماشین بیان شده و سپس نتیجه اجرای آن‌ها برای انتخاب عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، در استان آذربایجان غربی، به دست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

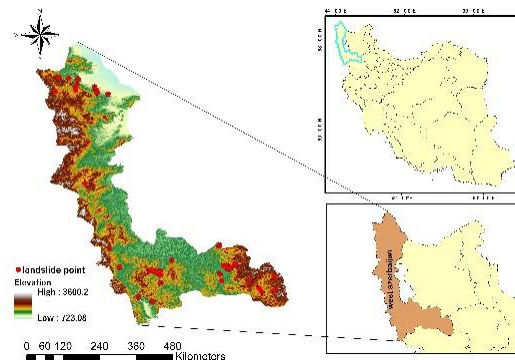
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، استان آذربایجان غربی، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده که در شمال غربی ایران قرار دارد. این استان، با مساحت حدود ۳۷،۴۰۰ کیلومتر مربع (بدون احتساب مساحت دریاچه ارومیه)، حدود ۲.۵۶ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده و از شمال به کشورهای جمهوری آذربایجان و ترکیه، از غرب به کشورهای ترکیه و عراق، از جنوب به استان کردستان و از شرق به استان‌های آذربایجان شرقی و استان زنجان محدود می‌شود. استان آذربایجان غربی به ۱۷ شهرستان (۹ شهرستان مرزی) تقسیم شده و محدوده جغرافیایی آن ۳۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۴۸ درجه شرقی می‌باشد (شکل ۱). کمینه و بیشینه ارتفاع منطقه مورد مطالعه، به ترتیب ۶۰۵ و ۳۶۰۰ متر از سطح دریا می‌باشند. به طور کلی متوسط بارندگی سالیانه ۴۵۰ - ۳۰۰ میلی‌متر است که در سطح استان متغیر

می باشد. حداکثر، حداقل و میانگین دما به ترتیب ۳۱.۷، ۶.۹- و ۱۰.۹ درجه سانتی گراد هستند [۱۷-۱۹].

این منطقه در بین دو گسل اصلی تبریز در شرق و ارومیه یا زرينه رود در غرب واقع شده؛ از نظر زمین شناسی دارای سازندهای متنوعی می باشد و شامل اراضی کوهستانی، دشتی و ساحلی است. اقلیم این استان به دو بخش اقلیم نیمه مدیترانه ای و اقلیم نیمه خشک تقسیم می شود. آذربایجان غربی، یکی از استان های پرباران ایران بوده و دارای شرایط آب و هوایی متنوعی است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه: استان آذربایجان غربی

۲-۲- عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش

از میان عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، در این پژوهش ۱۷ عامل مورد بررسی قرار گرفتند و داده ها و لایه های اطلاعاتی مربوط به آن ها با استفاده از قابلیت های سیستم اطلاعات مکانی آماده سازی و تهیه شدند.

شیب: یکی از عواملی که در اکثر زمین لغزش های به وقوع پیوسته در مناطق مختلف نقش داشته، شیب می باشد؛ به همین دلیل، این عامل در اغلب مطالعات مربوط به پهنه بندی خطر زمین لغزش مد نظر قرار گرفته است [۲۰]. بررسی زمین لغزش های رخ داده در سوئد، کانادا و نروژ نشان داده که هیچ زمین لغزشی در اولین ناپایداری در کمتر از شیب ۸ درجه (حدود ۱۰ درصد) اتفاق نیفتاده است [۲۱]. حداکثر شیب در استان آذربایجان غربی ۴۲ درجه می باشد [۱۷].

زمین شناسی: عامل زمین شناسی در مطالعات مربوط به زمین لغزش، برای تعیین میزان مقاومت زمین در برابر لغزش مورد بررسی قرار می گیرد [۲۲]. در نقشه این عامل، اطلاعاتی در مورد خصوصیات سنگ ها ارائه می شود که می تواند در مدل سازی و ارزیابی خطر ریزش زمین مورد استفاده قرار گیرد [۲۳]. نتایج مطالعه ای که در منطقه یونگکسین چین

انجام شده، نشان می دهد که اطلاعات زمین شناسی به طور مستقیم و غیرمستقیم تأثیر بسزایی در پیش بینی خطر لغزش زمین دارند [۲۴].

کاربری و پوشش زمین: فعالیت های انسانی در دهه های اخیر منجر به تغییر پوشش گیاهی و کاربری زمین در برخی مناطق شده است. این تغییرات محیطی، ممکن است زمینه را برای وقوع مخاطراتی همچون زمین لغزش فراهم کنند. در حالیکه در مناطقی که دارای پوشش گیاهی مناسب هستند و کاربری اراضی متناسب با پتانسیل آن ها است، احتمال ناپایداری دامنه ها کاهش می یابد [۲۵].

فاصله از گسل: به طور کلی وجود گسل ها باعث افزایش نفوذپذیری رطوبت توده خاک می شود و احتمال وقوع زمین لغزش را افزایش می دهد. با افزایش عمق کانونی و فاصله از سطح گسل، فراوانی زمین لغزش ها کاهش می یابد [۲۶، ۲۷].

فاصله از رودخانه: وجود رودخانه در یک محل، تأثیر مستقیم بر میزان رطوبت خاک زمین های همجوار دارد. آب رودخانه ها می تواند خاک را شستشو دهد و تحلیل خاک را تسریع کند؛ به این ترتیب، فاصله از رودخانه نیز از جمله عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش ها به شمار می آید و مناطق نزدیکتر به رودخانه در معرض خطر بیشتری هستند [۲۸، ۲۹].

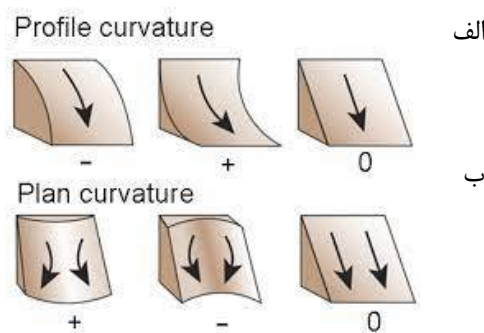
فاصله از جاده: ساخت جاده در کنار دامنه، موجب کاهش بار بر روی توپوگرافی و پای شیب می شود؛ در نتیجه، تنش برشی در پشت شیب افزایش می یابد و زمینه وقوع زمین لغزش در نزدیکی جاده فراهم می شود [۲۸، ۳۰]. به این ترتیب، فاصله از جاده نیز از جمله عواملی است که برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش باید به آن توجه نمود.

نوع خاک: زمانی که خاک با آب تماس یابد یا رطوبت زیاد دریافت کند، دچار کرنش شده و فشار آب در آن افزایش می یابد. این امر می تواند باعث کاهش مقاومت خاک در برابر لغزش شود. همچنین، وجود ذرات کوچک در خاک، می تواند منجر به ایجاد لغزش و حرکت ناخواسته زمین شود. خاک با توجه به تأثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن، می تواند از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش ها باشد. با بررسی تأثیر خاک بر ایجاد زمین لغزش در یک منطقه، می توان نقشه حساسیت دقیق تری تهیه کرد [۳۱، ۳۲].

میزان بارش: بارش های زیاد ممکن است باعث نرم شدن خاک و افزایش احتمال آب گیری و در نتیجه ایجاد لغزش و

حمل زمین در مناطق آسیب پذیر شوند. بنابراین، میزان بارش در منطقه مورد مطالعه، می تواند یکی از عوامل مهم در افزایش خطر وقوع زمین لغزش های سطحی باشد که بررسی آن در مدیریت خطرات مربوط به رخداد این پدیده ضروری است [۳۳، ۳۴].

انحنای پروفیل^۱: در برخی از مطالعات مربوط به پهنه بندی خطر زمین لغزش، انحنای طولی شیب، عامل تأثیر گذاری بوده است. این عامل، در واگرایی و همگرایی جریان آب در سراسیابی نقش مهمی دارد (شکل ۲ - الف) که برای تولید آن از مدل رقومی ارتفاع استفاده می شود [۳۵]. انحنای سطح (انحنای پلان^۲)، نشان دهنده انحنای خط منحنی میزان است که از تقاطع سطح زمین با یک سطح افقی تشکیل شده است [۳۵]. حالت هایی که در آن ها مقدار انحنای پلان، مثبت، منفی و صفر است در شکل ۲ - ب نشان داده شده است.



شکل ۲ - الف - انحنای پروفیل - ب - انحنای پلان

انحنا: انحنا به عنوان یکی از شاخص های ژئومورفومتریک مرتبط با احتمال وقوع زمین لغزش می باشد که از ترکیب انحنای پلان و انحنای پروفایل به دست می آید. شاخص ناهمواری زمین^۳ (TRI): شاخص TRI، یک معیار کمی برای بیان ویژگی های توپوگرافی مناطق مستعد به زمین لغزش می باشد. نقشه مربوط به این عامل نیز بر اساس مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از رابطه (۱) تولید می شود که در آن β زاویه شیب بر حسب درجه است [۳۶].

$$TRI = 1/\cos(\tan\beta * \pi/180) \quad (۱)$$

شاخص رطوبت توپوگرافی^۴ (TWI): یکی از عوامل مهم در ایجاد اکثر زمین لغزش ها، رطوبت توپوگرافی می باشد. افزایش TWI به معنی افزایش حجم آب در دسترس برای

نفوذ می باشد. این شاخص تابعی از شیب و مساحت بالادست است که برای مناطق تپه ای طراحی شده و از رابطه (۲) به دست می آید. در این رابطه، AS مساحت حوضه آبخیز و β زاویه شیب بر حسب رادیان است [۳۷-۴۰].

$$TWI = \ln\left(\frac{AS}{\tan\beta}\right) \quad (۲)$$

لازم به ذکر است که این شاخص با برخی های از ویژگی های خاک مانند عمق افق و محتوای مواد آلی و فسفر در ارتباط است که برای در نظر گرفتن آن ها باید از روابط دیگری استفاده کرد.

جهت شیب: جهت شیب که با میزان رطوبت خاک در ارتباط است، به نوبه خود می تواند در مقاومت و حساسیت به لغزش مؤثر باشد [۴۱]. در مناطقی که در طی ماه های مختلف سال، اختلاف فاحشی در دمای دامنه های رو به آفتاب وجود دارد و این نوسان دما، در محدوده بالاتر و پایین تر از نقطه انجماد آب (خصوصاً در دامنه های برف گیر) صورت می گیرد، ارتباط معنی داری بین توزیع فراوانی ناپایداری های دامنه ای و جهت شیب دامنه، برقرار می گردد؛ به نحوی که تراکم ناپایداری های دامنه ای در دامنه های شمالی، افزایش و در دامنه های جنوبی، کاهش می یابد [۴۲]. شاخص حمل رسوب^۵ (STI): معیاری است که در مطالعات زمین شناسی و محیط زیست برای اندازه گیری ارزیابی میزان حمل و حرکت رسوب ها استفاده می شود. این شاخص می تواند بر اساس پارامترهای مختلفی نظیر سرعت جریان آب و تراکم رسوب ها اندازه گیری شود [۴۳، ۴۴]. مقدار این شاخص را می توان از رابطه (۳) به دست آورد که در آن نیز AS مساحت حوضه آبخیز و β زاویه شیب می باشد [۴۵، ۴۶].

$$STI = \left(\frac{AS}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (۳)$$

شاخص قدرت آبراهه^۶ (SPI): این شاخص به مقاومت زمین در برابر آب رسانی و جریان های سطحی مربوط می شود. SPI می تواند نشان دهنده توانایی زمین در حفظ ساختار و پایداری آن در مقابل فرسایش و زمین لغزش باشد که در مطالعات مربوط به شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش مورد

۴ Topographic Wetness Index
۵ Sediment Transport Index
۶ Stream Power Index

۱ Profile curvature
۲ Plan curvature
۳ Terrain Ruggedness Index

استفاده قرار می‌گیرد. مقدار این شاخص از رابطه (۴) به دست می‌آید که در آن AS مساحت حوضه آبخیز و $\tan\beta$ بیانگر شیب منطقه است [۳۷، ۳۸، ۴۳].

$$SPI=AS \times \tan\beta \quad (۴)$$

۲-۳- روش‌های انتخاب ویژگی

انتخاب ویژگی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل داده‌است. انتخاب ویژگی‌های مؤثر در یک مجموعه داده و حذف موارد نامناسب، موجب بهبود عملکرد مدل و افزایش سرعت محاسبات می‌شود. برخی از روش‌های رایج و محبوب در این حوزه، در پژوهش حاضر، برای انتخاب عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۱- روش انتخاب زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها بر اساس همبستگی^۱ (CFS)

روش CFS از طریق یک رویکرد مبتنی بر همبستگی، به انتخاب زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها می‌پردازد. فرض اصلی این روش آن است که یک زیرمجموعه خوب، شامل ویژگی‌هایی می‌باشد که آن ویژگی‌ها با کلاس‌های طبقه‌بندی مورد نظر (در این پژوهش، کلاس‌های وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش) بیشترین همبستگی و بین خودشان کمترین همبستگی را دارند. در این روش، توانایی انفرادی هر ویژگی در پیش‌بینی و همچنین درجه افزونگی بین آن‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. رابطه ۵ کیفیت زیرمجموعه S شامل k ویژگی را نشان می‌دهد [۴۷]:

$$MeritS_k = \frac{k\overline{r_{cf}}}{\sqrt{k + k(k-1)\overline{r_{ff}}}} \quad (۵)$$

در رابطه فوق، $\overline{r_{cf}}$ نشان‌دهنده میانگین تمامی همبستگی‌های ویژگی‌ها با کلاس مورد نظر و $\overline{r_{ff}}$ بیانگر میانگین همه همبستگی‌ها بین خود ویژگی‌ها می‌باشد. معیار CFS با رابطه (۶) بیان می‌شود که در آن، r_{cfk} و r_{fifj} مشابه همان همبستگی‌های مذکور در رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

$$CFS = \max_{S_k} \left[\frac{r_{cf_1} + r_{cf_2} + \dots + r_{cf_k}}{k+2(r_{f_1f_2} + r_{f_1f_3} + \dots + r_{f_{k-1}f_k})} \right] \quad (۶)$$

۲-۳-۲- همبستگی^۲

همبستگی، رابطه خطی بین یک ویژگی و متغیر کلاس را اندازه‌گیری می‌کند. در پژوهش حاضر، ویژگی همان عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش بوده و متغیر کلاس، شامل دو مقدار یک و صفر معادل وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. برای ارزیابی مقدار و جهت رابطه خطی، اغلب از ضریب همبستگی پیرسون استفاده می‌شود که بر اساس آن، مقدار همبستگی بالاتر، نشان‌دهنده رابطه قوی‌تر بین ویژگی و متغیر کلاس می‌باشد. این معیار می‌تواند به شناسایی ویژگی‌هایی که رابطه معناداری با متغیر هدف دارند، کمک کند. ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر x و y از رابطه (۷) به دست می‌آید که در آن $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب میانگین متغیرهای مذکور می‌باشد [۴۸].

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (۷)$$

۲-۳-۳- بهره اطلاعات (IG)

IG معیاری است که در روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم برای ارزیابی اهمیت یک ویژگی در فرایند طبقه‌بندی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این معیار، میزان اطلاعاتی که از یک ویژگی خاص در مورد متغیر هدف در فرایند تصمیم‌گیری به دست می‌آید، کمی‌سازی می‌شود. مقدار IG با استفاده از مفهوم آنتروپی محاسبه می‌شود. آنتروپی، نشان‌دهنده بی‌نظمی مجموعه‌ای از نمونه‌ها، در مجموعه داده می‌باشد. آنتروپی E(C) و IG با روابط (۸)، (۹) و (۱۰) تعریف می‌شوند. در رابطه (۸)، P_i نسبت کلاس i ام در کل مجموعه داده را نشان می‌دهد. در روابط (۹) و (۱۰)، X شامل ویژگی‌ها (عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش) و Y شامل کلاس‌ها (وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش) می‌باشد [۴۸-۵۰].

$$E(C) = - \sum_{i=1}^j P_i \log_2 P_i \quad (۸)$$

$$IG(Y, X) = E(Y) - \sum_{v \in \{F | 1, \dots, m\}} \frac{|Y_v|}{Y} E(Y_v) \quad (۹)$$

$$IG(Y, X) = E(Y) - E(Y | X) \quad (۱۰)$$

^۳ Information Gain

^۱ Correlation-based Feature Subset Selection

^۲ Correlation

$$\text{Relief}_x = \frac{P(\text{different value of } X | \text{different class}) - P(\text{different value of } X | \text{same class})}{1} \quad (12)$$

$$\text{Relief}_x = \frac{\text{Gini} \times \sum_{x \in X} p(x)}{(1 - \sum_{c \in C} p(c)) \sum_{c \in C} p(c)}^2 \quad (13)$$

$$\text{Gini} = \left[\sum_{c \in C} p(c) (1 - p(c)) \right] \sum_{x \in X} \frac{p(x)^2}{\sum_{x \in X} p(x)} \sum_{c \in C} p(c|x) (1 - p(c|x)) \quad (14)$$

۲-۳-۶- روش عدم قطعیت متقارن (SU)

عدم قطعیت متقارن، یک معیار همبستگی بر اساس آنتروپی است که اطلاعات مشترک بین یک ویژگی و متغیر کلاس را به صورت کمی بیان می‌کند. در این روش، با اندازه‌گیری عدم قطعیت متقارن مربوط به کلاس، ارزش یک ویژگی تعیین می‌گردد. این معیار هم قابلیت پیش‌بینی ویژگی از روی کلاس و هم قابلیت پیش‌بینی کلاس از روی ویژگی را در نظر می‌گیرد. عدم قطعیت متقارن برای ویژگی X و کلاس Y از رابطه (۱۵) به دست می‌آید که در آن، $H(X)$ و $H(Y)$ به ترتیب بیانگر آنتروپی X و Y و $I(X;Y)$ نشان‌دهنده اطلاعات متقابل X و Y است [۵۶].

$$\text{SU}(X, Y) = 2 \frac{I(X; Y)}{H(X) + H(Y)} \quad (15)$$

$$I(X; Y) = (H(Y) - H(Y | X)) \quad (16)$$

مقدار SU در بازه $[0, 1]$ قرار می‌گیرد که ۰ به معنای عدم وجود هیچ‌گونه اطلاعات مشترکی بین X و Y و ۱ نشان‌دهنده وجود اطلاعات مشترک کامل بین آن‌ها می‌باشد.

۲- نتایج

برای اجرای روش‌های مختلف انتخاب ویژگی، نقاطی که قبلاً در آن‌ها زمین لغزش اتفاق افتاده بود، در محیط سیستم اطلاعات مکانی به صورت یک لایه نقطه‌ای آماده شدند. سپس به همان تعداد، نقطه تصادفی در سایر مناطق در نظر گرفته شدند (شکل ۳). نقشه‌های آماده‌سازی شده در محیط سیستم اطلاعات مکانی برای عوامل مؤثر، در شکل ۴ ارائه شده‌اند. ابتدا ماتریس همبستگی عوامل مؤثر با یکدیگر به دست آمد (پیوست ۱) و سپس میزان همبستگی عوامل با داده‌های وقوع

مقدار IG از ۰ تا ۱ متغیر است؛ بالا بودن مقدار IG برای یک ویژگی، نشان‌دهنده ارائه اطلاعات ارزشمندتر توسط آن ویژگی برای طبقه‌بندی است؛ به عبارتی نشان می‌دهد که ویژگی مورد نظر به کاهش بی‌نظمی در مجموعه داده کمک می‌کند.

۲-۳-۴- روش نسبت بهره (GR)

روش GR در واقع بهبود یافته روش IG می‌باشد که بایاس آن را کاهش داده‌است و می‌توان آن را با رابطه (۱۱) بیان نمود [۵۱، ۵۲] که در آن، $H(X)$ و $H(Y)$ به ترتیب بیانگر آنتروپی X و Y می‌باشند.

$$\text{GainR}(Y, X) = (H(Y) - H(Y | X)) / H(X) \quad (11)$$

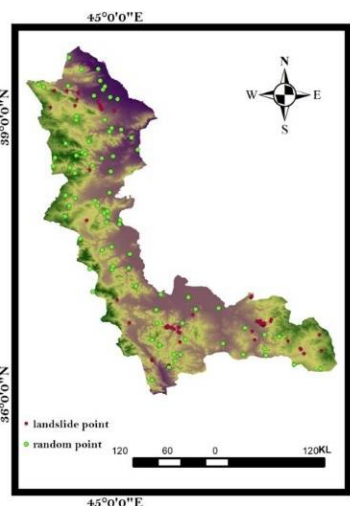
۲-۳-۵- روش Relief F

روش Relief F نیز یک روش محاسباتی برای انتخاب ویژگی‌های مهم از میان انواع ویژگی‌ها می‌باشد. در این روش، برای هر ویژگی، یک ارزش Relief محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده توانایی آن ویژگی برای دسته‌بندی نمونه‌ها در کلاس‌های مربوط است. ابتدا یک نمونه تصادفی از مجموعه داده‌ها انتخاب می‌شود. سپس برای آن نمونه، دو همسایه نزدیک از بین نمونه‌ها تعیین می‌شوند؛ به طوری که کلاس نمونه همسایه اول، مشابه کلاس نمونه انتخابی (مثلاً نمونه انتخابی و همسایه اول هر دو متعلق به کلاس وقوع زمین لغزش هستند) و کلاس نمونه دوم، مخالف کلاس نمونه انتخابی باشد. اگر مقدار یکی ویژگی بخصوص، در نمونه انتخاب شده، با مقدار همان ویژگی در نمونه همسایه از کلاس مشابه (همسایه اول)، اختلاف داشته باشد، امتیاز آن ویژگی کاهش می‌یابد. اما اگر مقدار همان ویژگی در نمونه همسایه از کلاس مخالف (همسایه دوم)، اختلاف داشته باشد، امتیاز این ویژگی افزایش می‌یابد. میزان Relief برای تمام ویژگی‌ها محاسبه می‌شود. مقدار این شاخص با رابطه (۱۲) تعیین می‌شود که می‌توان آن را به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) بازنویسی کرد. در روابط مذکور، c نشان‌دهنده کلاس، $p(c)$ احتمال مربوط به آن کلاس و x بیانگر ویژگی می‌باشد. در نهایت، ویژگی‌هایی که Relief بیشتری دارند، به عنوان ویژگی‌های مهم انتخاب می‌گردند [۵۳-۵۵].

زمین لغزش تعیین گردید که در جدول ۱ و شکل ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- همبستگی عوامل مؤثر با داده‌های زمین لغزش

عامل مؤثر	مقدار	عامل مؤثر	مقدار
زمین شناسی	۰.۵۲۱۵	فاصله از جاده	۰.۱۲۴۲
کاربری زمین	۰.۴۷۸۰	انحنای پروفیل	۰.۱۱۳۰
فاصله از رودخانه	۰.۳۱۰۱	جهت شیب	۰.۰۹۹۲
فاصله از گسل	۰.۲۴۵۳	انحنا	۰.۰۶۷۹
پوشش زمین	۰.۲۱۰۵	نوع خاک	۰.۰۵۰۶
TRI	۰.۱۹۷۴	SPI	۰.۰۳۳۷
STI	۰.۱۹۱۴۱	میزان بارش	۰.۰۳۲۳
TWI	۰.۱۶۵۵	انحنای پلان	۰.۰۰۲۶
شیب	۰.۱۲۸۲		



شکل ۳- نقاط وقوع و عدم وقوع زمین لغزش مورد استفاده

بررسی ماتریس همبستگی بین عوامل نشان می‌دهد که براساس داده‌های این پژوهش، انحنا و انحنای پلان بیشترین همبستگی را با یکدیگر دارند. بالاترین همبستگی منفی نیز مربوط به انحنا و انحنای پروفیل می‌باشد. همچنین بر اساس این ماتریس، مجموع همبستگی هر عامل با سایر عوامل محاسبه شد و نتیجه نشان داد که در مجموع، TWI و انحنا به ترتیب بیشترین همبستگی و SPI و TRI، کمترین همبستگی را با سایر عوامل دارند. چنانکه در جدول ۱ نیز نشان داده شده، زمین‌شناسی، کاربری زمین و فاصله از رودخانه، به ترتیب بیشترین همبستگی را با وقوع زمین لغزش براساس داده‌های موجود از منطقه مورد مطالعه دارند.

با اجرای روش IG، ۹ عامل به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی، شناسایی شدند

که نام هر عامل و میزان نقش آن در جدول ۲ و شکل ۶ ارائه گردیده‌است. چنانکه ملاحظه می‌گردد، زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را بر اساس روش IG و داده‌های جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه، در وقوع زمین لغزش داشته‌است.

چنانکه پیش‌تر ذکر شد، روش CFS زیرمجموعه‌ای از عوامل را با توجه به مفهوم همبستگی انتخاب می‌کند. عواملی که با این روش، به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش، در پژوهش حاضر، انتخاب شدند شامل SPI، TWI، زمین‌شناسی، کاربری زمین و فاصله از رودخانه می‌باشند. بهترین مقدار برای merit (رابطه ۱) با زیرمجموعه فوق حاصل شد که برابر ۰/۳۶۳ می‌باشد. تمامی این عوامل، در روش IG نیز انتخاب شده بودند.

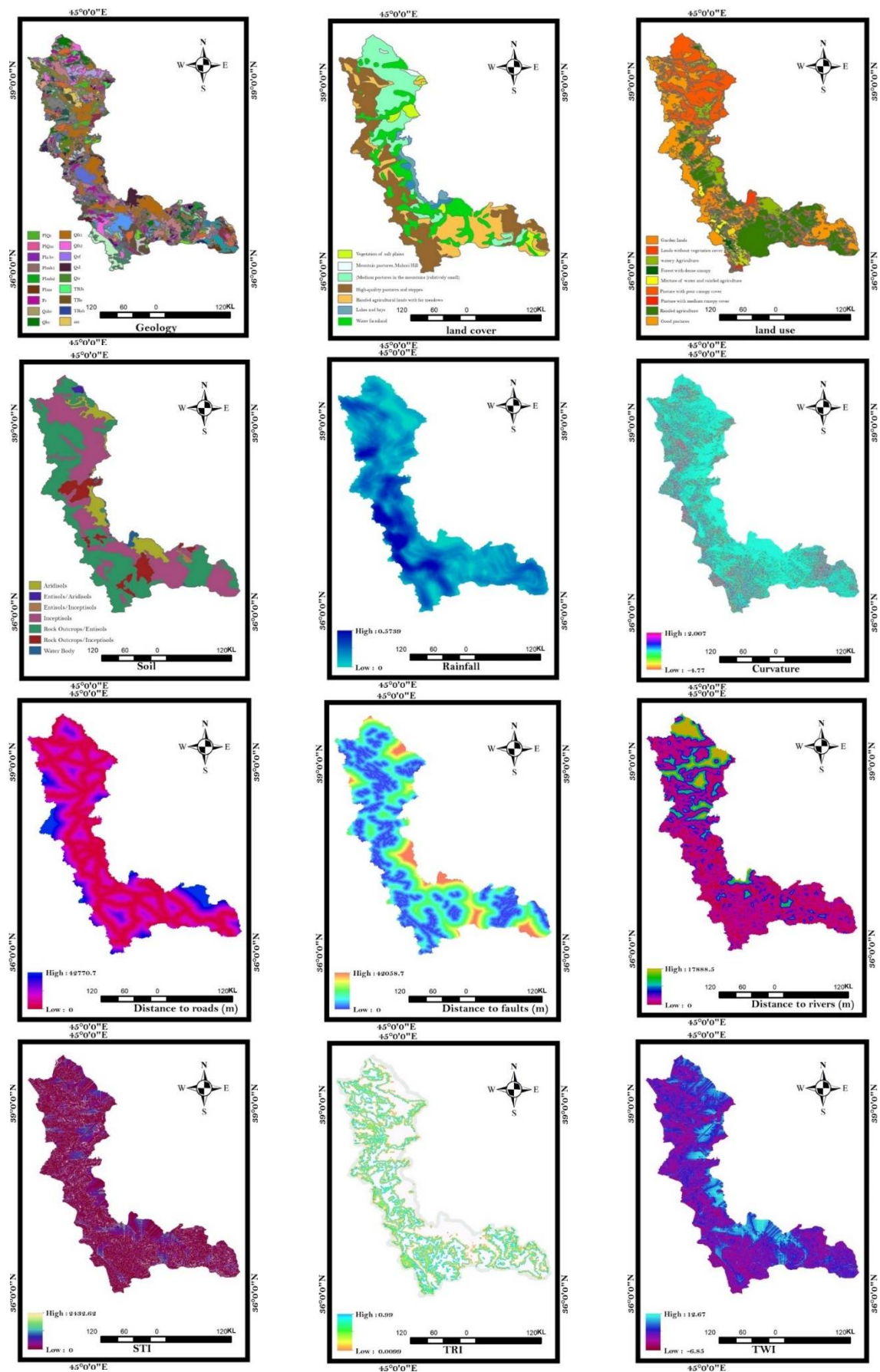
جدول ۲- نتایج روش انتخاب عوامل با روش IG

عامل مؤثر	مقدار	عامل مؤثر	مقدار
زمین شناسی	۰.۳۶۹۷	شیب	۰.۰۹۸۴
کاربری زمین	۰.۱۷۸۷	SPI	۰.۰۷۷۹
فاصله از رودخانه	۰.۱۵۱۹	میزان بارش	۰.۰۷۵۲
پوشش زمین	۰.۱۴۱۷	STI	۰.۰۲۴۷
TWI	۰.۱۱۸۲		

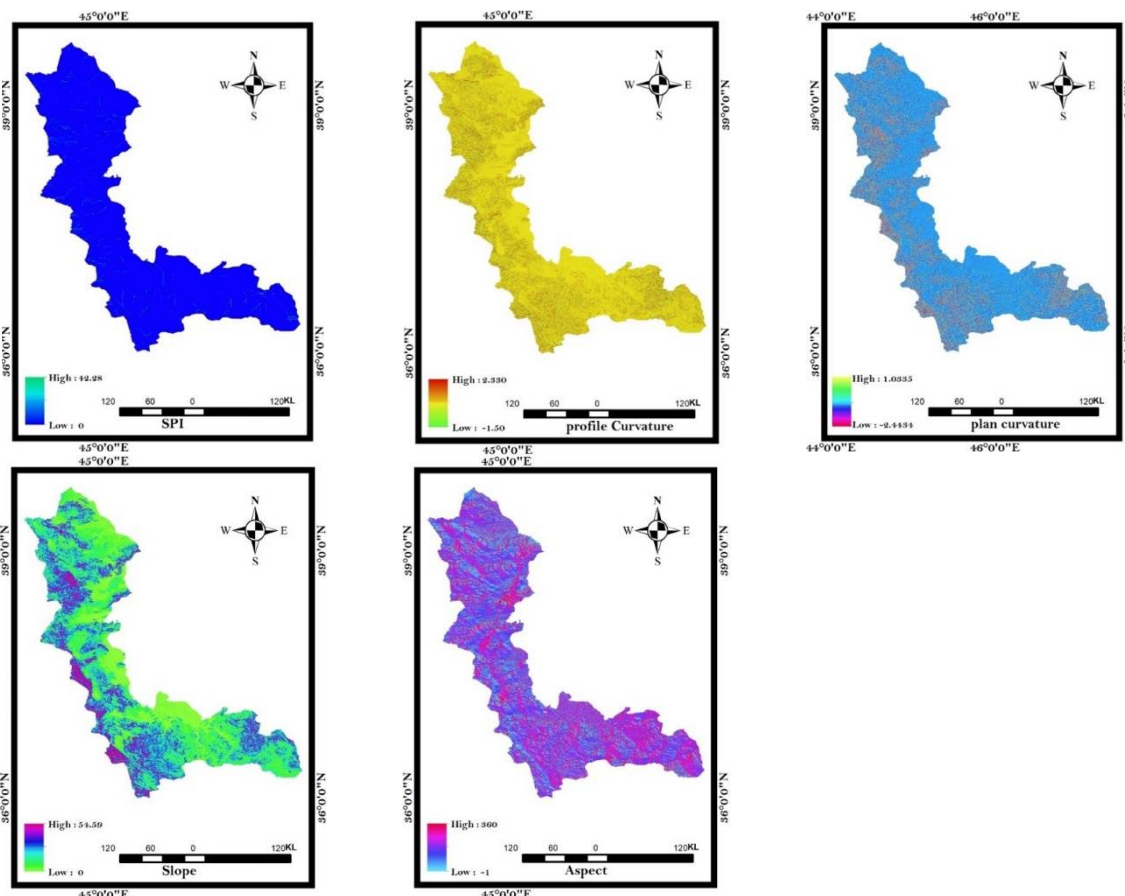
جدول ۳- عوامل انتخابی و مقادیر آن‌ها با روش GR

عامل	مقدار	عامل	مقدار
زمین‌شناسی	۰.۳۰۹۳	میزان بارش	۰.۱۵۸۳
TWI	۰.۲۰۲۱	SPI	۰.۱۴۱۶
فاصله از رودخانه	۰.۱۸۶۶	پوشش زمین	۰.۱۲۱۳
کاربری زمین	۰.۱۷۹۲	STI	۰.۰۴۷۹
شیب	۰.۱۶۳۷		

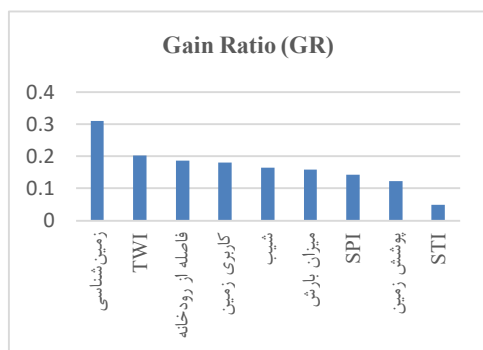
نتایج اجرای روش GR در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده‌اند. در این روش نیز که در واقع توسعه‌یافته روش IG می‌باشد، همان ۹ عامل انتخابی در روش مذکور (IG)، از بین ۱۷ عامل، به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر وقوع زمین لغزش تعیین گردیده‌اند. لیکن میزان اهمیت و ترتیب عوامل در برخی موارد، متفاوت هستند. به عنوان نمونه، TWI در روش IG، به‌عنوان پنجمین عامل ولی در روش GR دومین به‌عنوان عامل مؤثر شناسایی شده‌است. در روش GR ویژگی‌هایی که توزیع کلاس نامتعادل دارند، در اولویت قرار نمی‌گیرند.



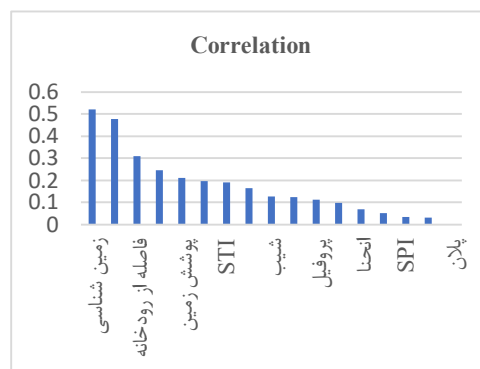
شکل ۴- نقشه‌های عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش



ادامه شکل ۴- نقشه‌های عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش



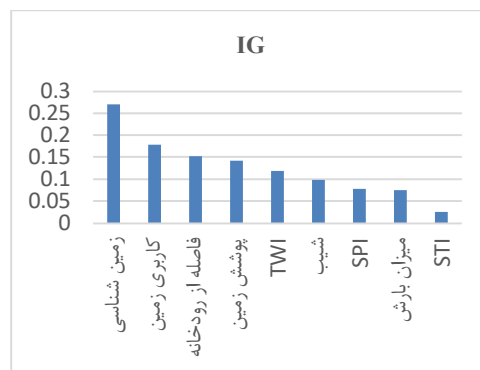
شکل ۷- نمودار نقش عوامل انتخابی با روش GR



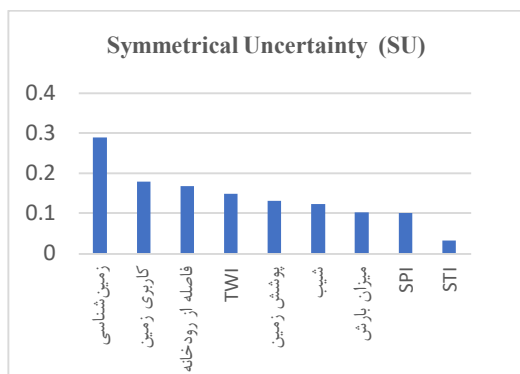
شکل ۵- میزان همبستگی عوامل مؤثر با داده‌های وقوع زمین‌لغزش

با اجرای روش Relief F، که نتایج آن در جدول ۴ و نمودار شکل ۸ ارائه شده، دو عامل نوع خاک و فاصله از جاده نیز به عنوان عوامل مؤثر انتخاب شده‌اند که در سایر روش‌ها انتخاب نشده بودند. در مقابل، فاصله از رودخانه که در سایر روش‌ها به عنوان عامل تأثیرگذار شناخته شده بود، در این روش اهمیت بسیار اندکی داشته‌است.

چنانکه پیش‌تر ذکر شد، در این روش، با بررسی تفاوت مقدار یک ویژگی بین یک نمونه انتخابی با نزدیکترین همسایه مثبت (کلاس مشابه) و منفی‌اش، (کلاس متفاوت)



شکل ۶- نمودار نقش عوامل انتخابی با روش IG



شکل ۹- نمودار نقش عوامل انتخابی با روش SU

در نهایت، جهت سهولت مقایسه نتایج، تعداد دفعاتی که هر عامل، در روش‌های مختلف، به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش، بر اساس داده‌های موجود، انتخاب شده، در جدول ۶ ارائه گردیده‌است. چنانکه ملاحظه می‌شود عوامل انحنا، انحنای پلان، انحنای پروفیل و جهت شیب در هیچ‌یک از روش‌های مورد بررسی، بر اساس داده‌های موجود، به‌عنوان عامل مؤثر در منطقه مورد مطالعه، شناسایی نشده‌اند. بنابراین در صورت ضرورت کاهش محاسبات، می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. در مقابل زمین‌شناسی، کاربری زمین و TWI در تمامی روش‌ها به‌عنوان عامل مؤثر معرفی گردیده‌اند و با اطمینان بالایی می‌توان آن‌ها را به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفت. زمین‌شناسی در کلیه روش‌ها، به‌جز روش CFS، مهم‌ترین عامل وقوع زمین‌لغزش بوده هر چند که وزن‌های متفاوتی

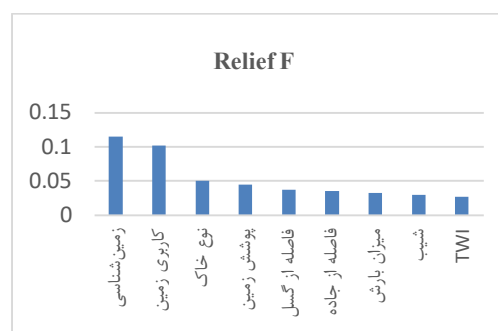
جدول ۶- انتخاب یا عدم انتخاب عوامل در روش‌های مختلف

عامل روش	IG	CFS	Corr.	GR	RF	SU	تعداد
کاربری	*	*	*	*	*	*	۶
TWI	*	*	*	*	*	*	۶
زمین شناسی	*	*	*	*	*	*	۶
پوشش	*	*	*	*	*	*	۵
رودخانه	*	*	*	*	*	*	۵
شیب	*	*	*	*	*	*	۵
بارش	*	*	*	*	*	*	۴
STI	*	*	*	*	*	*	۴
SPI	*	*	*	*	*	*	۴
گسل	*	*	*	*	*	*	۲
TRI	*	*	*	*	*	*	۱
خاک	*	*	*	*	*	*	۱
جاده	*	*	*	*	*	*	۱

ارزش آن ویژگی تعیین می‌گردد. بنابراین، یک ویژگی ممکن است با این روش، به دلیل وزن بالای آن در تفکیک داده‌ها انتخاب شود، اما در روش دیگری مثل CFS به دلیل همبستگی‌اش با یک ویژگی دیگر حذف گردد.

جدول ۴- میزان اهمیت عوامل با روش Relief F

عامل مؤثر	مقدار	عامل مؤثر	مقدار
زمین‌شناسی	0.1145	فاصله از جاده	0.0358
کاربری زمین	0.1019	میزان بارش	0.0330
نوع خاک	0.0502	شیب	0.0298
پوشش زمین	0.0448	TWI	0.0270
فاصله از گسل	0.0376		



شکل ۸- نمودار نقش عوامل انتخابی با روش Relief F

نتایج اجرای روش SU در جدول ۵ و شکل ۵ ارائه شده‌اند. در این روش، میزان عدم قطعیت یک ویژگی که با معلوم بودن مقدار یک ویژگی دیگر کم می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد و برای مواردی که تعدادی از ویژگی‌ها به هم وابسته هستند، مناسب است. به‌عنوان نمونه، چنانکه ملاحظه می‌شود، با وجودیکه STI و SPI با هم ارتباط دارند، هر دو در این روش انتخاب شده‌اند؛ همچنین شیب و TWI علیرغم همبستگی با یکدیگر، هر دو جزو عوامل انتخابی هستند. عدم‌قطعیت متقارن یک روش ساده و کارآمد برای انتخاب ویژگی است که تعامل آن‌ها را نیز در نظر می‌گیرد.

جدول ۵- عوامل انتخابی و مقادیر آن‌ها با روش SU

عامل مؤثر	مقدار	عامل مؤثر	مقدار
زمین‌شناسی	0.2881	شیب	0.1229
کاربری زمین	0.1789	میزان بارش	0.1019
فاصله از رودخانه	0.1675	SPI	0.1005
TWI	0.1491	STI	0.0326
پوشش زمین	0.1307		

برای آن در روش‌های مختلف به دست آمده است. عامل شیب نیز در تمامی روش‌ها به جز CFS جزو عوامل انتخابی بوده ولی در روش‌های مختلف، اولویت متفاوتی داشته است. دلیل حذف این عامل در روش CFS، می‌تواند میزان همبستگی نسبتاً بالای شیب به TWI باشد که وجود TWI، منجر به حذف عامل شیب گردیده است. با توجه به اینکه فرایند انتخاب ویژگی، در روش‌های مختلف، متفاوت است، می‌توان با به کارگیری همزمان روش‌های مختلف از مزایای آن‌ها در کنار یکدیگر بهره برد. به عنوان نمونه، روش Relief F بر قدرت یک ویژگی در تفکیک نمونه‌ها تمرکز دارد و ارتباط ویژگی‌ها با یکدیگر در آن بررسی نمی‌شود. به این ترتیب به حذف ویژگی‌های نامناسب برای تفکیک کمک می‌کند. در حالیکه روش‌های مبتنی بر همبستگی همچون CFS رابطه ویژگی‌ها با همدیگر را مورد توجه قرار می‌دهند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، روش‌های مختلف انتخاب ویژگی که اغلب در روش‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای تعیین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در استان آذربایجان غربی، به کار گرفته شدند. برای این منظور از داده‌های تاریخی مربوط به رخداد زمین‌لغزش استفاده شد. در مجموع، برای هفده عامل تأثیرگذار بر وقوع پدیده مذکور، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط سیستم اطلاعات مکانی تهیه و آماده‌سازی شدند. برای اجرای روش‌های انتخاب ویژگی، یک لایه نقطه‌ای متشکل از نقاط وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش تولید گردید. سپس مقدار مربوط به هر عامل (ویژگی)، در این نقاط، اعم از اینکه در آن‌ها زمین‌لغزش افتاده باشد یا خیر، مشخص شدند. در ادامه، با روش‌های همبستگی، بهره اطلاعات، نسبت بهره، زیرمجموعه ویژگی‌ها بر اساس همبستگی (CFS)، Relief F و عدم قطعیت متقارن، عوامل مؤثر توسط هر روش تعیین شدند و میزان اهمیت هر عامل

مراجع

در هر روش نیز مشخص گردید. نتایج پژوهش نشان داد که روش‌های مختلف انتخاب ویژگی ممکن است در برخی از موارد، نتایج متفاوتی در خصوص انتخاب عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش داشته باشند؛ یا ممکن است عوامل یکسانی انتخاب شوند ولی وزن عوامل یکسان نباشند. لذا بهتر است در انتخاب این عوامل براساس داده‌های موجود، تنها به یک روش اکتفا نمود. در حالت کلی، نتایج روش‌های انتخاب ویژگی، تحت تأثیر نوع مسأله و وضعیت داده‌ها قرار می‌گیرند. زمانی که یک عامل (مانند زمین‌شناسی در پژوهش حاضر)، در تمامی روش‌های انتخاب ویژگی، به عنوان عامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شود، می‌توان آن را با اطمینان بیشتری انتخاب کرد. از سوی دیگر، می‌توان جهت کاهش حجم محاسبات، از عواملی که در هیچ روشی انتخاب نشده‌اند (مانند انحنا یا پروفیل در این پژوهش)، با اطمینان بالایی صرف نظر کرد. با توجه به اینکه فرایند انتخاب در روش‌های مختلف متفاوت است، می‌توان با به کارگیری همزمان روش‌های مختلف از مزایای آن‌ها در کنار یکدیگر بهره برد و ترکیبی از عوامل را در نظر گرفت. به عنوان نمونه، در روش CFS که مبتنی بر میزان همبستگی بین عوامل است، ممکن است یک ویژگی حذف شود در حالیکه وجود همان ویژگی می‌تواند عدم قطعیت یک ویژگی دیگر را تا حدی کاهش دهد و یا آن ویژگی توانایی بالایی در تفکیک کلاس داده‌ها و در نتیجه افزایش دقت طبقه‌بندی داشته باشد و به این ترتیب به کارگیری روش‌های دیگر منجر به انتخاب آن می‌گردد. روش‌های انتخاب ویژگی، می‌توانند برای تعیین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، جهت ورود به مدل‌های یادگیری ماشین و یا مدل‌های مبتنی بر نظر کارشناسی، جهت تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرند. برخی از روش‌های انتخاب ویژگی همچون تحلیل مؤلفه اساسی در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار نگرفتند که در ادامه می‌توان آن‌ها را نیز جهت تعیین عوامل مؤثر پیاده‌سازی نمود و نتیجه را با نتایج روش‌های به کاررفته مقایسه کرد.

- [1] Wubalem, A. (2021). "Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping." Landslides, pp.164-181.
- [2] Leal Sousa, R., Vargas Jr, E., Chaminé, H. I., Ribeiro e Sousa, L., and Karam, K. (2021). "Risk assessment on landslides focused on the role of the water: examples from model regions (Rio de Janeiro State and Hong Kong)." SN Applied Sciences, 3, 1-23.
- [3] Behniafar, A., Mansouri daneshvar, M.R., and Kahrobaeian, P. (2010). "Application of AHP modeh and fuzzy logic in landslide hazards zonation case study: frizi basin, norter slope of binalud mountions." jornal of physical geography, 3(9), 89-100,(in Persian).

- [4] Hejazi, SA., and Ranjbarian shadbad, M. (2018). "Identification of effective factors and zoning of landslide risk in the western part of Sarandchai watershed." *Quantitative Geomorphology Research*, 3(3), 114-129, (in persian)
- [5] Wu, Y., Li, W., Liu, P., Bai, H., Wang, Q., He, J., Liu, Y., and Sun, S. (2016). "Application of analytic hierarchy process model for landslide susceptibility mapping in the Gangu County, Gansu Province, China." *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-11.
- [6] Dastranj, A., Vakili tajareh, F., and Noor, H. (2021). "Evaluation of Hazard Landslide Zonation Using Fuzzy Logic Method in Binalood Mountain [Research]." *Iranian Joral of Watershed Management Science&Engineering*, 15(53), 12-22, (in Persian).
- [7] Oyda, Y., Jothimani, M., and Regasa, H. (2024). "Assessing landslide susceptibility in Lake Abya catchment, Rift Valley, Ethiopia: a GIS-based frequency ratio analysis." *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(3), 5885-5895.
- [8] madadi, A., beheshti javid, E., and aghazadeh, N. (2021). "Zoning and assessing the potential for landslide in the Shidri Chach basin using the ANP model." *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 21(62), 243-260, (in Persian).
- [9] Lee, S., and Min, K. (2001). "Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea." *Environmental geology*, 40(9), 1095-1113.
- [10] Mulugeta, T., Shano, L., and Jothimani, M. (2024). "Landslide susceptibility modeling in the Kulfo river catchment, rift valley, Ethiopia: An integrated geospatial and statistical analysis." *Quaternary Science Advances*, 14, 100191.
- [11] Nwazelibe, V. E., Unigwe, C. O., and Egbueri, J. C. (2023). "Testing the performances of different fuzzy overlay methods in GIS-based landslide susceptibility mapping of Udi Province, SE Nigeria." *Catena*, 220, 106654.
- [12] Asmare, D. (2023). "Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern ethiopia." *Scientific African*, 19, e01470.
- [13] Pourghasemi, H. R., and Kerle, N. (2016). "Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran." *Environmental earth sciences*, 75(3), 185.
- [14] Aditian, A., Kubota, T., and Shinohara, Y. (2018). "Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia." *Geomorphology*, 318, 101-111.
- [15] Zhang, Z., Yang, F., Chen, H., Wu, Y., Li, T., Li, W., and Liu, P. (2016). "GIS-based landslide susceptibility analysis using frequency ratio and evidential belief function models." *Environmental Earth Sciences*, 75(11), 948.
- [16] Ding, Q., Chen, W., and Hong, H. (2017). "Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping" *Geocarto International*, 32(6), 619-639.
- [17] Aram, A., Dalalian, M. R., Saedi, S., Rafieian, O., and Darbandi, S. (1401). "Evaluation of the efficiency of artificial intelligence and bivariate statistical models in determining landslide prone areas in West Azerbaijan." *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 4(11), 63-74, (in persian)
- [18] Esfandiari-Darabad, F., Mostafazadeh, R., and Feghazadeh, P. (2018). "Comparison of Temporal Changes in Monthly Discharge and Sediment Load in Some Rivers of West Azerbaijan Province." *Quantitative Geomorphology Research*, 5(2), 53-65, (in persian)
- [19] Saberi, A., Soltani-gerdefaramarzi, S., and Mir yaghoubzadeh, MH. (2018). "Study of drought using meteorological and remote sensing data (Azarbaijan province)." *Journal of the earth and space physics*, 44(2), 439-461, (in persian).
- [20] Memarian, H., and Sayarpour, M. (2006). "Errors intererrors introduced by slope gradient in landslide hazard zonation mapping." *journal of faculty of engineering (university of tehran)*, 40(1 (95)), 105-113, (in persian).
- [21] Berggren, W. A., Hilgen, F. J., Langereis, C. G., Kent, D. V., Obradovich, J. D., Raffi, I., Raymo, M. E., and Shackleton, N. J. (1995). "Late Neogene chronology: new perspectives in high-resolution stratigraphy." *Geological Society of America Bulletin*, 107(11), 1272-1287.
- [22] Gemitzi, A., Falalakis, G., Eskioglou, P., and Petalas, C. (2011). "Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and GIS." *Global NEST Journal*, 13(1), 28-40.
- [23] Segoni, S., Pappafico, G., Luti, T., and Catani, F. (2020). "Landslide susceptibility assessment in complex geological settings: Sensitivity to geological information and insights on its parameterization." *Landslides*, 17, 2443-2453.
- [24] Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., and Hong, H. (2020). "Integration of convolutional neural network and conventional machine learning classifiers for landslide susceptibility mapping." *Computers and Geosciences*, 139, 104470.
- [25] Srivastava, V., Srivastava, H. B., and Lakhera, R. (2010). "Fuzzy gamma based geomatic modelling for landslide hazard susceptibility in a part of tonsriver valley, northwest himalaya, india." *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(3), 225-242.

- [26] Das, S., Sarkar, S., and Kanungo, D. P. (2022). "GIS-based landslide susceptibility zonation mapping using the analytic hierarchy process (AHP) method in parts of Kalimpong Region of Darjeeling Himalaya." *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(4), 234.
- [27] Saadat Nia, A., Rahimi Chakdel, A., Raqimi, M., Rezaei, H., and Radfar, A. (2014). "Investigating the relationship between landslides and earthquakes (Minodasht case study)." *International Specialized Congress of Science and Earth. SID*, (in persian).
- [28] Mohamadnia, M., Amirahmadi, A., akbari, E., and bahrami, S. (2016). "Landslide hazard zonation in Binalud mountains by Bayesian method (Torghabeh- Darrod new Transit Road)" *Geographical Space*, 16(55), 217-238, (in persian).
- [29] Zarei, M., Moradi, H., Alavinia, S.H., and Aliabad, K. (2023). "Landslide risk assessment and zoning in Bionij watershed, Kermanshah province." *Quarterly Journal of Geographical Studies of Mountainous Regions*, 4(1), 169-188, (in persian).
- [30] Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B. (2013). "Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya." *Natural hazards*, 65, 135-165.
- [31] Misaghi, S. P., Naghdi, R., Salehi, A., and Pourbabaei, H. (2022). "Effects of landslides causing by executive activities on some physical and chemical soil properties (Case study: tonekabon and ramsar forests)." *Iranian Journal of Forest*, 14(3), 341-354, (in persian).
- [32] Hamidi, H., and Akhtarpour, A. (2021). "Numerical modeling of the effect of rainfall on the stress-strain behavior of nailing system in swelling." *The 12th International Congress of Civil Engineerin*, (in persian).
- [33] Sadeghi, A., Talebi, A., and zarei, P. (2022). "Determining the threshold of critical rainfall in the occurrence of surface landslides using physically based models (case study: javanrood basin, kermanshah province, iran)." *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 156-177, (in persian).
- [34] SafayiPour, S., Shojaian, A., and atash Afrooz, N. (2016). "Landslide zoning using AHP model in the GIS environment of the study area of Dere Gaz village, Qalandran, Dehdz city." *Natural Geography*, 9(31), 105-118.
- [35] Darehshuri, M. A., and Yazdi, M. (2022). "Landslide Susceptibility Areas Detection Using GIS Information and Combination of Machine Learning Models and Meta Heuristic Algorithms." *Journal of Geomatics Science and Technology*, 12(1), 111-125, (in persian).
- [36] Baboli Moakher, H., Taghian, A., and Shirani, K. (2018). "Application of Morphometric Indices in Optimization of Landslide Susceptibility Zonation Using Probabilistic Methods." *Physical Geography Research*, 50(4), 747-773, (in persian).
- [37] Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991). "Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications." *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- [38] Sk Ajim, A., Farhana, P., Vojteková, J., Costache, R., Thi Thuy Linh, N., Bao Pham, Q., Vojtek, M., Gigović, L., Ateeque, A., and Ghorbani, M. A. (2021). "GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms." *Geoscience Frontiers*, 12(2), 857-876.
- [39] Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020). "Susceptibility Zoning and Prioritization of the Factors Affecting Landslide Using MaxEnt, Geographic Information System and Remote Sensing Models (Case study: Lorestan Province)." *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179, (in persian).
- [40] Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., and Jasiński, M. (2022). "Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey." *Remote Sensing*, 14(13), 3029.
- [41] Dai, F., and Lee, C. (2002). "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong." *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- [42] Emadodin, S., Taheri, V., mohammad ghasemi, M., and Nazari, Z. (2021). "Landslide Susceptibility Zonation applying frequency ratio models and statistical index in in Oghan watershed." *Quantitative Geomorphological Research*, 9(4), 75-95, (in persian).
- [43] Mind je, R., Li, L., Nsengiyumva, J. B., Mupenzi, C., Nyesheja, E. M., Kayumba, P. M., Gasirabo, A., and Hakorimana, E. (2020). "Landslide susceptibility and influencing factors analysis in Rwanda." *Environment, Development and Sustainability*, 22, 7985-8012.
- [44] Wang, G., Lei, X., Chen, W., Shahabi, H., and Shirzadi, A. (2020). "Hybrid computational intelligence methods for landslide susceptibility mapping." *Symmetry*, 12(3), 325.
- [45] Poddar, I., and Roy, R. (2024). "Application of GIS-based data-driven bivariate statistical models for landslide prediction: a case study of highly affected landslide prone areas of Teesta River basin." *Quaternary Science Advances*, 13, 100150.

- [46] Hong, H., Pradhan, B., Sameen, M. I., Chen, W., and Xu, C. (2017). "Spatial prediction of rotational landslide using geographically weighted regression, logistic regression, and support vector machine models in Xing Guo area (China)." *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1997-2022.
- [47] Hall, M. A. (1999). "Correlation-based feature selection for machine learning The University of Waikato"
- [48] Abbas, F., Zhang, F., Abbas, F., Ismail, M., Iqbal, J., Hussain, D., Khan, G., Alrefaei, A. F., and Albeshr, M. F. (2023). "Landslide susceptibility mapping: analysis of different feature selection techniques with artificial neural network tuned by bayesian and metaheuristic algorithms." *Remote Sensing*, 15(17), 4330.
- [49] Omuya, E. O., Okeyo, G. O., and Kimwele, M. W. (2021). "Feature selection for classification using principal component analysis and information gain." *Expert Systems with Applications*, 174, 114765.
- [50] Shaheen, M., Zafar, T., and Khan, S. (2020). "Decision tree classification: Ranking journals using IGIDI." *Journal of Information Science*, 46, 325 - 339.
- [51] Tamilmani, A., and Sughasiny, M. (2021). "Gain Ratio with Optimization Based Feature Selection Method." *Webology (ISSN: 1735-188X)*, 18(6).
- [52] Karegowda, A. G., Manjunath, A. S., and Jayaram, M. A. (2010). "Comparative study of attribute selection using gain ratio and correlationbased feature selection." *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2(2), 271-277.
- [53] Kononenko, I. (1994). "Estimating attributes: Analysis and extensions of RELIEF." *European conference on machine learning*,
- [54] Robnik-Šikonja, M., & Kononenko, I. (1997). "An adaptation of Relief for attribute estimation in regression." *Machine learning: Proceedings of the fourteenth international conference (ICML'97)*
- [55] Spolaôr, N., and Monard, M. C. (2014). "Evaluating ReliefF-based multi-label feature selection algorithm." *Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA 2014: 14th Ibero-American Conference on AI, Santiago de Chile, Chile, November 24-27, 2014, Proceedings 14*
- [56] Ali, A., Shamsuddin, S., and Hassan, S. (2020). "Feature selection for malicious android applications using Symmetrical Uncert Attribute Eval method." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

پیوست ۱

	STI	TRI	TWI	SPI	Geo	Fault	LU	Soil	Rain	Slope	LC	Plan	Prof	Aspect	River	Road	Curv.
STI	1	-0.07	0.54	0.18	-0.15	0.31	-0.15	-0.15	-0.08	-0.2	0.03	-0.02	0.01	-0.03	-0.02	-0.19	-0.02
TRI	-0.07	1	-0.12	-0.13	0.23	-0.1	0.17	-0.02	0.11	0.09	0.04	0	-0.09	-0.11	-0.03	0.08	0.05
TWI	0.54	-0.12	1	0.25	-0.23	0.29	-0.12	-0.27	-0.38	-0.63	0.06	-0.01	0.02	0.04	0.08	-0.21	-0.02
SPI	0.18	-0.13	0.25	1	-0.08	0.02	-0.09	0.01	0.01	0.13	-0.15	0.01	-0.02	0.09	-0.02	-0.09	0.02
Geo	-0.15	0.23	-0.23	-0.08	1	-0.17	0.37	0.08	0.2	0.2	0.25	0.02	0	0.07	-0.17	0.08	0.01
Fault	0.31	-0.1	0.29	0.02	-0.17	1	-0.09	-0.14	0.01	-0.21	-0.02	-0.09	0.07	-0.14	0.08	-0.31	-0.09
LU	-0.15	0.17	-0.12	-0.09	0.37	-0.09	1	0.01	-0.02	0.02	0.48	-0.12	0.21	0.2	-0.21	0.07	-0.2
Soil	-0.15	-0.02	-0.27	0.01	0.08	-0.14	0.01	1	0.21	0.35	-0.11	-0.09	0	-0.14	-0.05	0.01	-0.06
Rain	-0.08	0.11	-0.38	0.01	0.2	0.01	-0.02	0.21	1	0.32	0	-0.19	0.04	-0.23	-0.12	-0.19	-0.14
Slope	-0.2	0.09	-0.63	0.13	0.2	-0.21	0.02	0.35	0.32	1	-0.1	-0.03	0.03	0	-0.17	0.06	-0.04
LC	0.03	0.04	0.06	-0.15	0.25	-0.02	0.48	-0.11	0	-0.1	1	-0.09	0.11	0.19	-0.29	-0.01	-0.12
Plan	-0.02	0	-0.01	0.01	0.02	-0.09	-0.12	-0.09	-0.19	-0.03	-0.09	1	-0.41	0.05	0.04	0.15	0.84
Prof	0.01	-0.09	0.02	-0.02	0	0.07	0.21	0	0.04	0.03	0.11	-0.41	1	0.11	-0.2	-0.22	-0.83
Aspect	-0.03	-0.11	0.04	0.09	0.07	-0.14	0.2	-0.14	-0.23	0	0.19	0.05	0.11	1	-0.11	0.13	-0.04
River	-0.02	-0.03	0.08	-0.02	-0.17	0.08	-0.21	-0.05	-0.12	-0.17	-0.29	0.04	-0.2	-0.11	1	0.05	0.14
Road	-0.19	0.08	-0.21	-0.09	0.08	-0.31	0.07	0.01	-0.19	0.06	-0.01	0.15	-0.22	0.13	0.05	1	0.22
Curv.	-0.02	0.05	-0.02	0.02	0.01	-0.09	-0.2	-0.06	-0.14	-0.04	-0.12	0.84	-0.83	-0.04	0.14	0.22	1

میزان همبستگی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با یکدیگر