



دوره ۳۴، شماره ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۳۰، بهار ۱۴۰۰، صفحه‌های ۹۲-۷۴
شناسه‌ی دیجیتال: 22092/wmej.2020.341619.1311

پژوهش‌های آبخیزداری

ارزیابی روش جنگل تصادفی در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به زمین لغزش در آبخیز سادات محله، ساری

عطالاه کاویان

(نویسنده‌ی مسئول)* استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

محمد رضائی

دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

کاکا شاهدی

دانشیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

محمدعلی هادیان‌امری

استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: A.kavian@sanru.ac.ir

تاریخ ارسال: ۳۰ دی ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۳۰ شهریور ۱۳۹۹

چکیده

زمین لغزش یکی از ناپایداری‌های دامنه‌ی است که هر ساله زیان‌های مالی و تلفات جانی فراوانی را بر زندگی انسان‌ها وارد می‌کند. هدف از این پژوهش ارزیابی کردن حساسیت به زمین لغزش با روش جنگل تصادفی در آبخیز سادات محله‌ی ساری است. عامل‌هایی مانند ارتفاع از تراز دریا، زمین‌شناسی، کاربری زمین، شیب (شامل درجه، جهت، طول و شکل)، فاصله از عنصرهای خطی چون گسل، آبراه، و جاده، و شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجارشده ویژگی‌های مؤثر در وقوع زمین لغزش گرفته شد. پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در نرم‌افزار R و آرک‌جی‌آی‌اس ۱۰٫۳ انجام شد. برای تعیین کردن وزن هریک از عامل‌ها و طبقات تأثیر گزار در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی توان زمین لغزش به ترتیب روش نسبت فراوانی و شاخص ویژگی‌های عامل نسبی ROC به کار گرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد که پوشش گیاهی و کاربری زمین به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش در منطقه داشت. نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش به پنج طبقه‌ی حساسیت خیلی کم (۳۱/۸۵٪)، کم (۵/۳۸٪)، متوسط (۲۳/۰۸٪)، زیاد (۵۰٪) و خیلی زیاد (۷/۶۹٪) تقسیم شد. نتیجه‌های اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش نشان داد که سطح زیر منحنی برای روش جنگل تصادفی ۰/۷۰۹ و خطای معیاری آن ۰/۱۰ است. می‌توان نتیجه گرفت که دقت روش جنگل تصادفی در تهیه‌کردن نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش پذیرفتنی است. نقشه‌ی تعیین حساسیت زمین لغزش اطلاعات کامل و جامعی را برای مدیران منابع طبیعی در مدیریت کردن منطقه‌های حساس به زمین لغزش فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: اعتبارسنجی، پهنه‌بندی حساسیت، روش نسبت فراوانی، شاخص پوشش گیاهی

مقدمه

آلبیوایی و همکاران ۲۰۱۴؛ موسوی خطیر و همکاران، ۲۰۰۹)، منطق فازی (عابدینی و همکاران ۲۰۱۵)، شاخص زمین لغزش (محمدی و همکاران ۲۰۰۷)، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (امینی و همکاران ۲۰۰۵؛ کانیا و همکاران ۲۰۰۸) مدل کاناکاوا (ارومیه‌ای و صفایی ۱۹۹۶؛ ثمره و همکاران ۲۰۱۲)، تحلیل سلسه‌مراتبی (بالسین ۲۰۰۸)، روش ممدانی فازی حساسیت (آکاگان و همکاران ۲۰۱۲)، روش جنگل تصادفی (اسیومف و کرل و همکاران ۲۰۱۱؛ تری جیلا و همکاران ۲۰۱۲؛ کاتانی و همکاران ۲۰۱۳؛ چین و همکاران ۲۰۱۵؛ یوسف و همکاران ۲۰۱۵) انجام شده است.

نتیجه‌های کاربرد مدل آنتروپی در پهنه‌بندی منطقه‌ی زمین لغزش در گورجس چین (زونجی و همکاران ۲۰۱۰) نشان داد که این مدل همچون روشی جدید برای ارزیابی کردن خطر زمین لغزش کاربردهای فراوانی در مقیاس منطقه‌ی دارد. نقشه‌های به‌دست آمده از الگوریتم ممدانی فازی حساسیت به وقوع زمین لغزش در شهر سینوپ در بخش شمالی دریای سیاه در ترکیه (آکاگان و همکاران ۲۰۱۲) نشان داد که ارزیابی مساحت زیر منحنی ۰/۱۵۵ است، که نشان می‌دهد که نقشه با داده‌ی مستقل موفقیت‌آمیز تهیه کرده شده بود. کاتانی و همکاران (۲۰۱۳) در پیش‌بینی و ارزیابی کردن زمین لغزش‌ها به روش جنگل تصادفی نشان دادند که این روش کارآمدتر از سایر روش‌های سنتی است و نتیجه‌هایی پذیرفتنی داده است. چین و همکاران (۲۰۱۵) در تشخیص دادن زمین لغزش‌های جنگلی با داده‌های LIDAR و روش جنگل تصادفی در منطقه‌ی تری جورج چین نشان دادند که روش پیشنهادشده که ترکیبی از داده‌های LIDAR و الگوریتم جنگل تصادفی است می‌تواند به‌طور مؤثر زمین لغزش‌های جنگلی را شناسایی کند. نتیجه‌ی به‌کارگیری دو روش جنگل تصادفی و بیشینه‌ی آنتروپی در آبخیز مهران استان ایلام برای توان‌یابی آب زیرزمینی (رحمتی و همکاران ۲۰۱۶) نشان داد که نتیجه‌های اعتبارسنجی مساحت زیر منحنی برای میزان موفقیت روش جنگل تصادفی و بیشینه‌ی آنتروپی به‌ترتیب ۸۶/۵ و ۹۱٪ بود. در مقابل، مساحت زیر منحنی برای پیش‌بینی کردن روش جنگل تصادفی و بیشینه‌ی آنتروپی به‌ترتیب ۸۲/۱ و ۸۷/۷٪ بود. بنابراین می‌توان روش جنگل تصادفی و بیشینه‌ی آنتروپی را برای تهیه‌کردن نقشه‌ی توان آب زیرزمینی به‌کاربرد. ارزیابی حساسیت زمین لغزش‌ها با جنگل‌های تصادفی در غرب استان مازندران (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۶) نشان داد که رویکرد ترکیبی روش جنگل تصادفی و تابع تشخیص هدف^۱ در جایگاه هدف و برآوردکننده کاربردی است، و بنابراین برای تهیه‌کردن نقشه‌ی حساسیت به لغزش در مقیاس‌های منطقه‌ی مناسب است.

نتیجه‌های پهنه‌بندی رقومی واحدهای خاک با مدل درختان

زمین لغزش شامل همه‌ی جابه‌جایی و جداسازی خاک و مواد سنگی در امتداد سطح گسیختگی و به‌سمت پایین دامنه است (رجبی و فیض‌الله‌پور ۲۰۱۴). زمین لغزش عمدتاً بر اساس تلفیقی از فرآیندهای مختلف در منطقه‌هایی که پستی‌بلندی کوهستانی و سنگ‌شناسی رسوبی دارند، رخ می‌دهد (جعفری ۲۰۱۴). این حرکت‌ها ممکن است به‌شکل آرام و کند (چند میلی‌متر در سال) یا ناگهانی و سریع (۱۶۰ کیلومتر در ساعت) باشد (لی ۲۰۰۴). زمین لغزش موجب زیان‌هایی به سازه‌های مهندسی، منطقه‌های مسکونی، زمین‌های کشاورزی و در پی آن ایجادشدن رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود، و درنهایت پرشدن مخزن سدها می‌شود، و افزون بر آن اثرهای اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از آن، مانند مهاجرت و بیکاری را نباید نادیده گرفت (شیرانی و همکاران ۲۰۰۶؛ عبادی نژاد و همکاران ۲۰۰۷؛ گلادا ۱۹۹۷؛ لین و همکاران ۲۰۰۸). زمین لغزش‌ها به‌تنهایی ۱۷٪ از بلاهای طبیعی جهان را شامل می‌شود (کوئورست و همکاران ۲۰۰۵). در ایران نیز طبق گزارش جمع‌بندی اطلاعات و زیان‌های ۴۹۰۰ زمین لغزش در بانک اطلاعاتی، تا پایان شهریور ۱۳۸۶، زیان‌های ناشی از زمین لغزش ۱۲۶۸۳۹ میلیارد ریال برآورد شد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۴). امروزه زمین لغزش‌ها بیش‌تر بر اثر عامل‌های انسانی است تا این‌که جنبه طبیعی داشته باشد. از عامل‌های طبیعی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها می‌توان به بارندگی، سنگ‌شناسی، و شیب اشاره کرد (احمدی ۲۰۰۷). به‌دلیل اهمیت زیاد زمین لغزش پژوهش‌های علمی فراوانی در این زمینه انجام شده است. محققان رشته‌های مختلف علوم زمین مانند زمین‌شناسی مهندسی، زمین ریخت‌شناسی، آبخیزداری، و فن‌آوری زمین (ژئوتکنیک) بر پایه‌ی ماهیت و تنوع، و ایجاد رخداد و آثار زیان‌باری که برای جان و مال انسان‌ها دارند همواره به زمین لغزش‌ها توجه کرده‌اند (صفاری و همکاران ۲۰۱۱). در دنیا روش‌های پرشماری برای پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها به‌کار برده می‌شود، و تاریخچه‌ی کاربرد نقشه‌های پهنه‌بندی از دهه‌ی ۱۹۷۰ است (پرادهان و همکاران ۲۰۱۰).

مفهوم پهنه‌بندی زمین لغزشی تقسیم‌بندی زمین است به بخش‌های مجزا و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس درجه‌ی واقعی یا توان خطر ناشی از بروز زمین لغزش یا سایر حرکت‌های توده‌ی (وارنس ۱۹۸۴). فرآیند ایجاد نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش شامل روش‌های کمی و کیفی است (طالبی و همکاران ۲۰۱۸). بر پایه‌ی اهمیت موضوع زمین لغزش و حرکت‌های توده‌ی پژوهش‌های فراوانی در سراسر دنیا با روش‌های بیزن (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲؛ جیبور و همکاران، ۲۰۱۵)، وایازی چندمتغیره و پشتیان (مصفا‌ی و همکاران ۲۰۰۹؛ مصفا‌ی و اونق ۲۰۱۱؛ آکاگان و همکاران ۲۰۱۲؛

شناسایی مکان‌های امن برای توسعه‌ی زیستگاه‌های جدید یا سایر کاربری‌های انسانی مانند راه‌ها، مسیر انتقال نیرو و انرژی، و نیروگاه‌ها در مقیاس‌های مختلف به آن توجه می‌کنند (ناندی و شکور ۲۰۱۰). با این حال، از بین آسیب‌های طبیعی، زمین‌لغزش مدیریت‌پذیر است و برای کاربرد بهینه از محیط طبیعی و منابع موجود، و ایجاد ساختارهای اقتصادی و زیربنایی می‌توان با شناخت کامل از محیط و اعمال مدیریت صحیح در آن، اثرهای مخرب آن بر محیط را کاهش داد (امیراحمدی و همکاران ۲۰۱۱). شمار بسیار زیادی از زمین‌لغزش‌ها در کشور ایران به‌خصوص در استان مازندران به‌دلیل تغییر دادن کاربری زمین‌های زراعی، باغ و جاده‌سازی رخ داده است، و هر ساله زیان‌های مالی را به شکل تخریب مرکزهای فعالیت اقتصادی، فرسایش خاک، و تخریب راه‌های ارتباطی در این استان به‌بار می‌آورد (کلارستانی و همکاران ۲۰۰۷). از این رو مهم‌ترین هدف‌های پژوهش پیش‌رو بررسی، شناسایی و تاثیرگذاری عامل‌های مختلف بر زمین‌لغزش‌های موجود در آبخیز سادات ساری است. در ارزیابی این مدل برای دادن راه‌کارهای مقابله‌ی و اجرایی برای صرفه‌جویی در زمان و سرمایه‌های مادی و انسانی در آینده، روش جنگل تصادفی و نرم‌افزار R به‌کار گرفته شد. نقشه‌ی تعیین حساسیت زمین‌لغزش‌ها تهیه کرده شد که اطلاعات جامعی را برای مدیران منابع طبیعی در مدیریت کردن منطقه‌های حساس به زمین‌لغزش فراهم می‌کند.

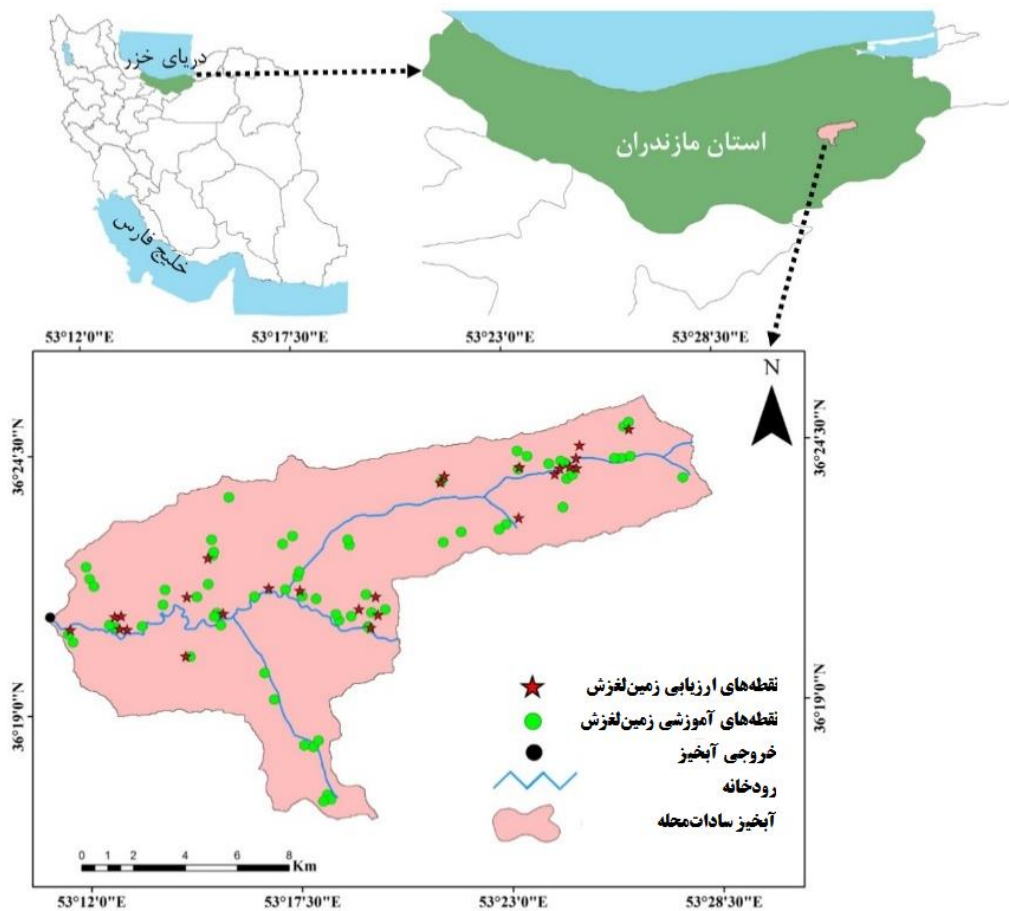
مواد و روش‌ها

منطقه‌ی بررسی شده

آبخیز سادات محله‌ی ساری در بخش چهاردانگه، شهرستان ساری، در استان مازندران در طول جغرافیایی $36^{\circ} 17'$ تا $36^{\circ} 26'$ و عرض جغرافیایی $53^{\circ} 12'$ تا $53^{\circ} 28'$ با مساحتی در حدود 18000 هکتار است. ارتفاع کمینه و بیشینه‌ی منطقه $237/5$ و 1443 متر است. آبخیز سادات محله به‌دلیل داشتن ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی و تنوع زیاد زمین‌شناختی و موقعیت جغرافیایی، مستعد بروز یافتن حرکت‌های توده‌ی به‌ویژه زمین‌لغزش است. اقلیم و خاک مناسب این منطقه شرایط ویژه‌ی را برای کشاورزی در زمین شیب‌دار و جذب گردشگر و مردم نا بومی به منطقه فراهم کرده است، که سبب تغییر یافتن شدید کاربری زمین جنگل و مرتع به زمین کشاورزی و مسکونی شده است، که نقش مؤثری در وقوع حرکت‌های توده‌ی دارد. شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی بررسی‌شده و پراکنش نقطه‌های زمین‌لغزش را نشان می‌دهد.

تصمیم‌گیری تصادفی در استان گلستان (پهلوان‌راد و همکاران ۱۳۹۳) نشان داد که روش جنگل تصادفی می‌تواند روشی اعتماد‌کردنی و با دقت مناسب باشد که با تعداد نمونه‌ی کم تخمینی پذیرفتنی داده است. نقشه‌ی توان آب زیرزمینی با مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد (ذبیحی و همکاران ۲۰۱۰) نشان داد که نتیجه‌ی های ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی توان آب زیرزمینی با منحنی تشخیص عمل کرد نسبی، بیانگر دقت خیلی خوب مدل آنتروپی شانون در مقایسه با مدل جنگل تصادفی بوده است. تعیین کردن واحدهای جریان آبی با روش جنگل تصادفی برای یکی از مخزن‌های نفتی ایران (رستگاریا و صنعتی ۲۰۱۶) نشان داد که روش جنگل تصادفی می‌تواند روشی کم‌هزینه و مؤثر در مقابل تحلیل آزمایشگاهی و پرهزینه مغزه در صنعت باشد. بر اساس اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌ی حساسیت آن با روش نوین جنگل تصادفی در بخشی از استان گلستان (محمدی و پورقاسمی ۲۰۱۷) نشان داد که ۱۱ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، کاربری زمین، شاخص طول شیب، شکل شیب، بارش و درجه‌ی شیب مؤثر بوده است. اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر نشان داد که فاصله از جاده، فاصله از گسل و ارتفاع به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را داشت. نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش تهیه‌شده با روش جنگل تصادفی به چهار طبقه‌ی حساسیت کم ($29/18\%$)، متوسط ($33/44\%$)، زیاد ($24/82\%$) و خیلی زیاد ($12/55\%$) تقسیم شد. برای ارزیابی کردن نقشه‌ی تهیه‌شده از منحنی ROC و تخمین‌زدن سطح زیر منحنی، از 30% از زمین‌لغزش‌های به‌کاربرده‌نشده در شبیه‌سازی بهره گرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد که روش جنگل تصادفی با سطح زیر منحنی $0/706$ دقتی پذیرفتنی در تهیه نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش داده است. نتیجه‌های ارزیابی دقت روش پهنه‌بندی با منحنی تشخیص عمل کرد نسبی و 30% نقطه‌های لغزشی به‌کاررفته در فرآیند شبیه‌سازی، بیانگر دقت عالی مدل جنگل تصادفی تهیه‌ی نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش در آبخیز سردارآباد استان لرستان با روش جنگل تصادفی با سطح زیر منحنی $98/8\%$ است (طالبی و همکاران ۲۰۱۸). بر اساس روش جنگل تصادفی، عامل‌های سنگ‌شناسی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش در آبخیز سردارآباد داشت.

بررسی زمین‌لغزش برای شناسایی منطقه‌های مستعد به آن در محدوده‌ی فعالیت‌های بشر مهم است، و برنامه‌ریزان در



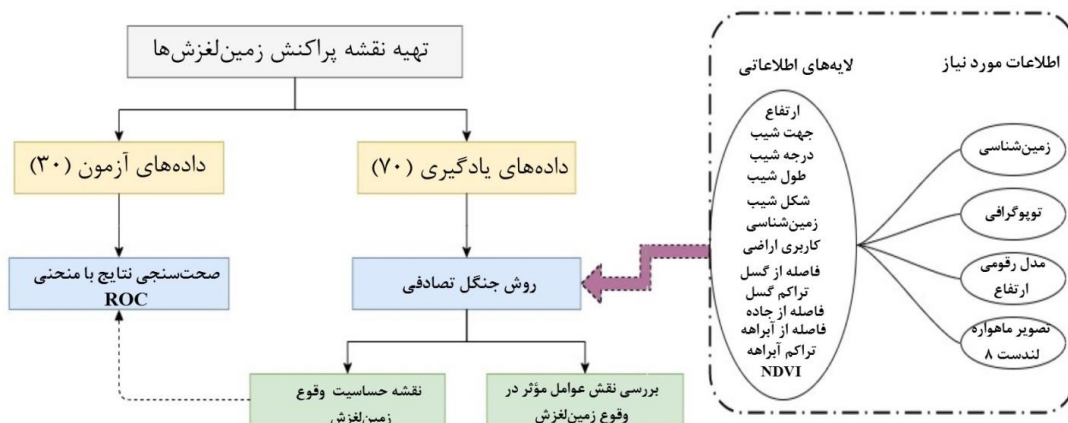
شکل ۱- نقشه‌ی موقعیت و پراکنش زمین لغزش‌های آبخیز سادات محله، ساری، استان مازندران.

روش تحقیق

تهیه‌ی نقشه‌های پایه و لایه‌های اطلاعاتی

برای تهیه‌ی نقشه‌های پایه و لایه‌های اطلاعاتی نقشه‌های پایه‌ی پستی بلندی (۱:۲۵۰۰۰) رقمی شده (سازمان جغرافیایی ارتش، ۱۳۸۵) و زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰) آبخیز سادات محله‌ی ساری (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۲۷) به کار برده شد. با نقشه‌ی مدل رقمی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، عامل‌های شیب (درجه، جهت، شکل و طول) و طبقه‌ی ارتفاعی تهیه کرده شد. تصویر ماهواره‌ی لندست (جدول ۱) از سنجنده‌ی OLI سال ۲۰۱۶ تهیه کرده شد (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۱۹). یکی از مهم‌ترین روش‌های استخراج اطلاعات از تصویرهای سنجش از دور، طبقه‌بندی است که به کاربران امکان تولید اطلاعات مختلف مانند نقشه‌های پوششی، نقشه‌ی کاربری و نقشه‌ی تغییر را می‌دهد (اصغری و همکاران ۱۳۹۸). پیش‌پردازش و تصحیح اتمسفری به روش چاوز اعمال شد، تصحیح پرتوسنجی شد و با نقطه‌های مهار زمینی و روش طبقه‌بندی شی‌گرا نقشه‌ی کاربری زمین در پنج طبقه در نرم‌افزار ENVI ۵.۳ تهیه کرده شد (مختاری و همکاران ۲۰۱۹). نقشه‌ی سنگ‌شناسی، گسل و

فاصله از این عارضه‌ها از نقشه‌ی زمین‌شناسی تهیه کرده شد. نقشه‌ی آبراه‌ها و فاصله از جاده از نقشه‌ی پستی بلندی بیرون آورده شد. همه‌ی لایه‌های اطلاعاتی در آرک جی‌آی‌اس تهیه و طبقه‌بندی شد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی پراکنش زمین لغزش، پس از تهیه‌ی اطلاعات زمین لغزش‌ها از پرسش‌نامه‌های مربوط در اداره‌ی کل منابع طبیعی استان مازندران، صحت نقطه‌های لغزشی با تصویرهای گوگل ارث و بازدیدهای صحرائی از منطقه بررسی شد. در مجموع ۹۲ نقطه‌ی لغزشی در این بررسی ثبت و به کار گرفته شد. این مجموعه نقطه‌ها، تصادفی به گروهی از ۶۶ نقطه (۷۰٪) برای واسنجی، و گروهی از ۲۶ نقطه (۳۰٪) برای اعتبارسنجی تقسیم کرده شد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۶). برای تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش لایه‌های رقمی تهیه‌شده و نقشه‌ی زمین لغزش به کار برده شد. پس از تعیین کردن عامل‌های مؤثر و نقشه‌های لازم، نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش با الگوریتم جنگل تصادفی در آرک جی‌آی‌اس و بسته‌ی الحاقی Random Forest در نرم‌افزار R ساخته شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار جریان تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با روش جنگل تصادفی.

جدول ۱- تصویر ماهواره‌ی به کاررفته برای تهیه شاخص NDVI.

ماهواره	سنجنده	تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	قدرت تفکیک مکانی (متر)	شماره‌ی گذر و ردیف
لندست ۸	OLI	۱۳۹۵/۰۴/۲۰	۲۰۱۶/۰۷/۰۹	۳۰	۱۶۳/۳۵

روش نسبت فراوانی

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100$$

۲

برای بررسی کردن ارتباط کمی میان وقوع لغزش‌ها و ویژگی‌های مختلف تأثیرگذار بر آن روش نسبت فراوانی به کار گرفته شد (جعفری و همکاران ۲۰۱۴). در تعیین کردن نسبت فراوانی، نسبت وقوع زمین لغزش‌ها در هر طبقه از عامل‌های تأثیرگذار نسبت به کل لغزش‌ها به دست آمد، و نسبت سطح هر طبقه به کل مساحت منطقه محاسبه شد.

$$P_i = \frac{a}{A} \times 10$$

۳

n تعداد نقطه‌های زمین لغزش در طبقه‌ی i ، N تعداد کل نقطه‌های زمین لغزش، a تعداد نقطه‌های تصویر طبقه‌ی i و A تعداد کل نقطه‌های تصویر آبخیز سادات محله است. مقدار به دست آمده برای هر طبقه در لایه‌های مربوط اعمال شد و نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش به دست آمد (رابطه‌ی ۴).

مجموعه نقطه‌های زمین لغزش در گروه واسنجی متغیر وابسته، و ویژگی‌های انتخاب شده (طبقه‌های ارتفاعی، جهت شیب، مقدار شیب، کاربری زمین، شاخص NDVI، زمین شناسی، فاصله از جاده، تراکم جاده، فاصله از رودخانه‌ی اصلی، تراکم آبراه، فاصله از گسل، تراکم گسل و شکل انحنا زمین) متغیرهای مستقل به روش نسبت فراوانی معرفی شد. با روش جنگل تصادفی، احتمال رخداد زمین لغزش در هر طبقه برای همه‌ی ویژگی‌ها محاسبه کرده شد. روش نسبت فراوانی نشان دهنده‌ی احتمال حضور پدیده با مشخصه‌هایی ویژه است. برای تعیین میزان تأثیر هر طبقه از هر متغیر مستقل، رابطه‌ی ۱ به کار گرفته شد.

$$LSI = \sum (FR) (i=1,2,\dots,n)$$

۴

LSI شاخص خطر وقوع لغزش، FR نسبت فراوانی عامل، و n مجموع عامل‌های ورودی است (جعفری و مافی غلامی ۲۰۱۷).

$$W_i = \frac{F_i}{P_i}$$

۱

W_i میزان تأثیر هر طبقه از هر ویژگی، F_i درصد نقطه‌های طبقه‌ی i ، و P_i درصد نقطه‌های تصویر (پیکسل) طبقه‌ی i در کل آبخیز است و از رابطه‌های ۲ و ۳ به دست آمد.

روش جنگل تصادفی

درخت پایه از روش‌های آماری ناسنجه‌ی برای اجرا کردن تحلیل طبقه‌بندی و تحلیل وایازی با الگوریتم افزارهای بازگشتی است (هستی ۲۰۰۱). جنگل‌های تصادفی نوع جدیدی از درخت پایه شامل انبوهی از درخت‌های طبقه‌بندی و وایازی است (بریمن ۲۰۰۱). مهم‌ترین ویژگی جنگل‌های تصادفی عمل کرد زیاد آن‌ها در اندازه‌گیری اهمیت متغیرها برای مشخص کردن این است که هر متغیر چه نقشی در پیش‌بینی پاسخ دارد (طالبی و

کرده شد (نیفیسلی گلو و همکاران ۲۰۰۸ و پره‌ادان ۲۰۱۳). در این روش، اندازه‌ی مساحت زیر منحنی ROC بین ۰/۵ تا ۱ است و برای ارزیابی کردن دقت مدل به کار گرفته می‌شود (ناندی و شکور ۲۰۱۰). هر قدر مقدار مساحت زیر منحنی به ۱ نزدیک‌تر شود، دقت مدل بیش‌تر است (یس‌ایلنس کار ۲۰۰۵). تحلیل منحنی ROC برای تعیین کردن دقت و کارایی مدل به کار گرفته می‌شود (اگان ۱۹۷۵). این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در دادن خصوصیت‌های تشخیصی، شناختن احتمال‌ها و پیش‌بینی کردن سامانه‌ها است که دقت مدل را به روش کمی برآورد می‌کند (کوماک ۲۰۰۶). سطح زیر منحنی ROC بیانگر مقدار پیش‌بینی سامانه با توصیف توانایی آن در تخمین زدن درست رخ دادن (زمین لغزش) و رخ ندادن آن است. بنابراین مساحت زیر منحنی معیار دقت و صحت مدل به کاررفته است (مادیو و همکاران ۲۰۰۷).

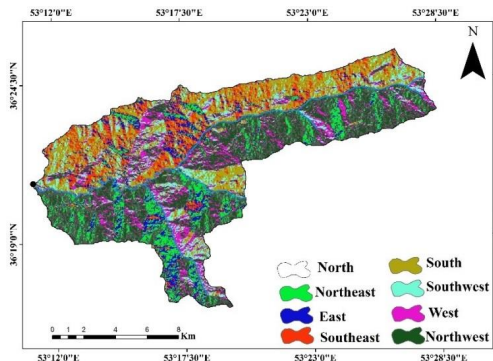
نتایج

شکل ۳ نتیجه‌های لایه‌های اطلاعاتی تهیه‌شده و جدول ۲ نتیجه‌های ۱۳ عامل تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش در منطقه را نشان می‌دهد. هر عامل بر پایه‌ی اندازه‌ها و عارضه‌های آن طبقه‌بندی شده است. نتیجه‌های روش جنگل تصادفی نشان‌دهنده‌ی آن است که به ترتیب عامل‌های پوشش گیاهی، کاربری زمین، جهت شیب، ارتفاع از تراز دریا و فاصله از رودخانه بیش‌ترین، و فاصله از جاده و گسل کم‌ترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش‌های این منطقه داشته است (جدول ۳). درصد مساحت هر یک از طبقه‌های تأثیر در جدول ۴ نشان داده شده است.

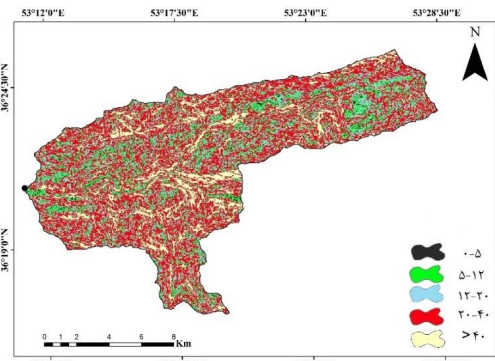
همکاران (۲۰۱۸). جنگل تصادفی روش یادگیری نظارت‌شده‌ی است که درخت‌های چندگانه را در طبقه بندی به کار می‌برد (بری من ۱۹۸۴). این روش با جایگزین کردن و تغییر دادن مداوم عامل‌های مؤثر و مرتبط با هدف، منجر به ایجاد شدن تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری می‌شود، و در مجموع همه‌ی درختان را برای پیش‌بینی ترکیب می‌کند (ورپال و همکاران ۲۰۱۲). جنگل تصادفی سه ویژگی تعریف‌شونده با کاربر دارد: تعداد متغیرهای به کاررفته در ساخت هر درخت که قدرت هر درخت مستقل را بیان می‌کند، تعداد درختان در جنگل تصادفی، و کمینه‌ی تعداد گره‌های انتهایی (پیترز و همکاران ۲۰۰۸). قدرت پیش‌بینی روش جنگل تصادفی با افزایش قدرت درختان مستقل و کاهش همبستگی بین آن‌ها افزایش می‌یابد (لیب و همکاران ۲۰۱۲). بر اساس رابطه‌های روش جنگل تصادفی میزان تأثیر هر یک از عامل‌های مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها با شاخص نسبت فراوانی وزن دهی کرده شد. دو عامل میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی برای تعیین کردن اولویت تأثیر هر یک از عامل‌های مؤثر به کار گرفته شد (کوثر و همکاران ۲۰۰۷) (جدول ۳). تجزیه و تحلیل و استخراج وزن طبقه‌های عامل‌های مؤثر در نرم‌افزار R انجام شد. با انتقال دادن نتیجه‌های نرم‌افزار R به آرک جی‌آی‌اس و تعمیم دادن نتیجه‌ها، نقشه‌های طبقه‌های حساسیت به وقوع زمین لغزش تهیه، و نقشه‌ی حساسیت به وقوع زمین لغزش ارزیابی کرده شد.

اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی توان زمین لغزش

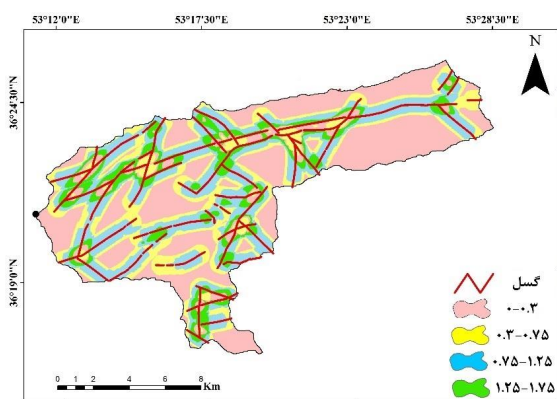
پس از تهیه کردن نقشه‌ی حساسیت به زمین لغزش، نقشه‌های پیش‌بینی توان زمین لغزش با محاسبه کردن شاخص ویژگی‌های عامل نسبی^۲ (ROC) در نرم‌افزار SPSS23 اعتبارسنجی



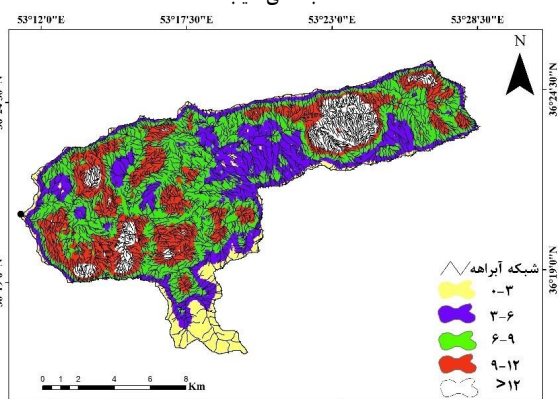
جهت شیب



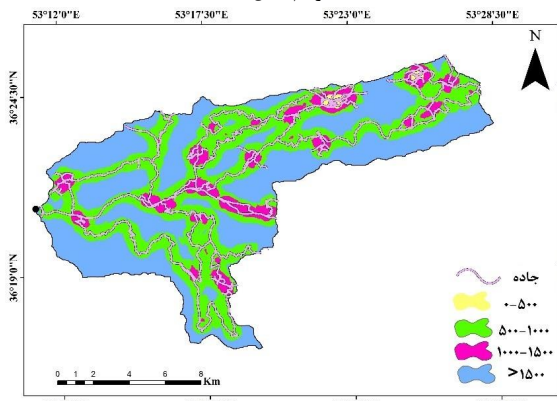
طبقه‌های شیب



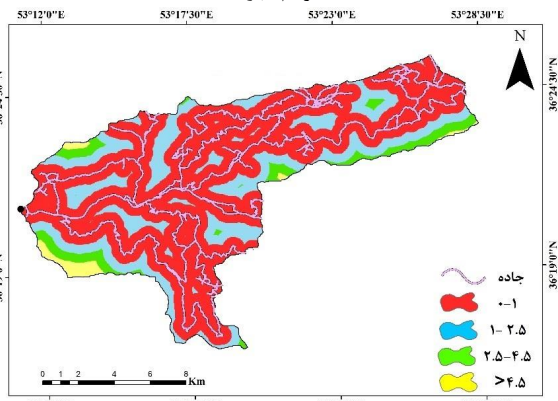
تراکم گسل



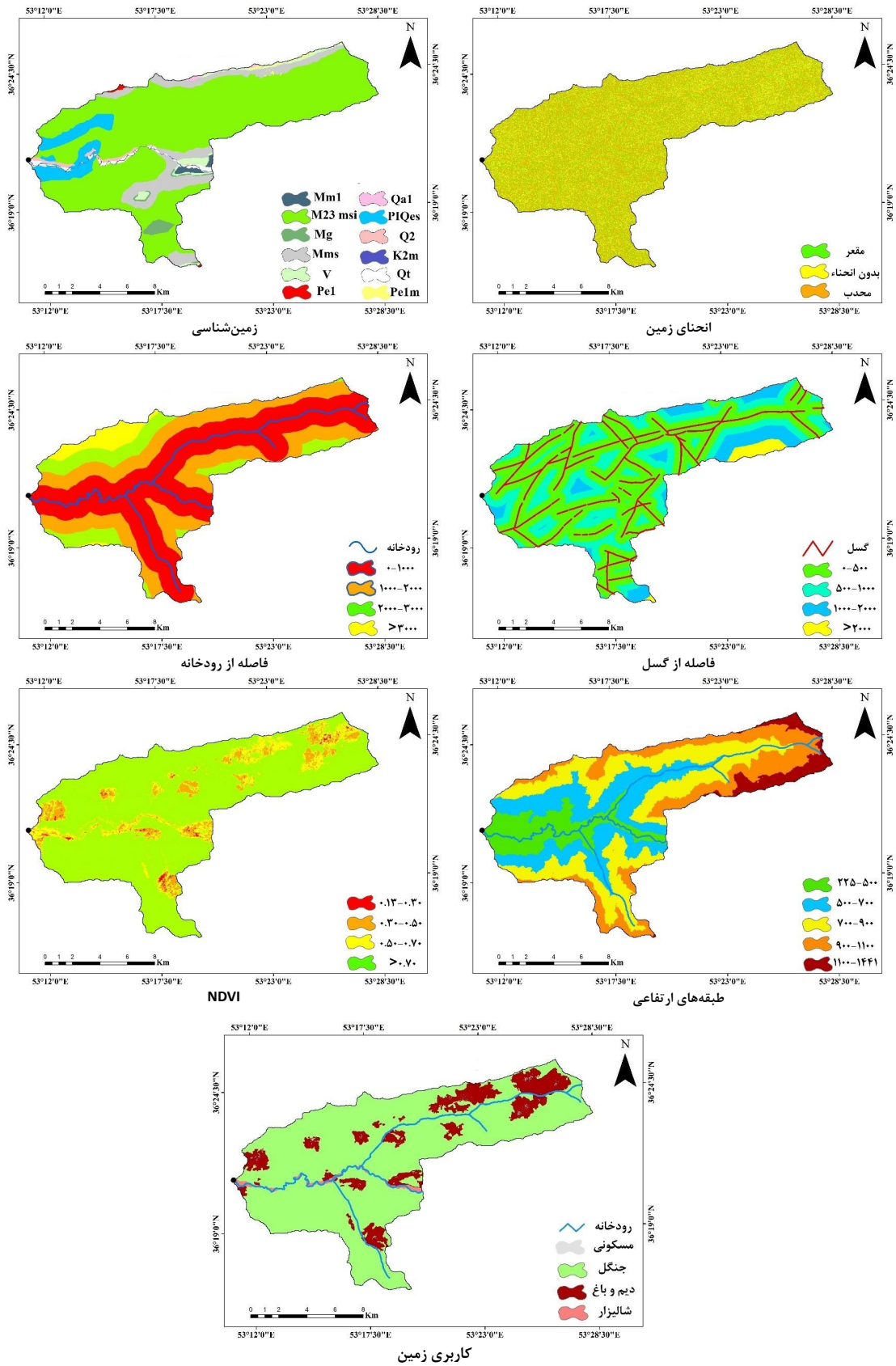
تراکم آبراه



فاصله از جاده



تراکم جاده



شکل ۳- نقشه‌ی لایه‌های کاربری تهیه‌شده از آبخیز سادات محله، ساری، استان مازندران.

جدول ۲- ارتباط بین عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین لغزش و لغزش‌های گذشته منطقه.

وزن تأثیر (W_i)	تعداد وقوع زمین- لغزش (n)	طبقه (i)	عامل	وزن تأثیر (W_i)	تعداد وقوع زمین- لغزش (n)	طبقه (i)	عامل
۲/۳۰	۲۲	۲۲۵-۵۰۰	طبقه‌های ارتفاعی ارتفاع دریا (m)	۰/۰۰	۰	۰-۵	مقدار شیب (%)
۰/۹۵	۱۶	۵۰۰-۷۰۰		۱/۴۹	۱۲	۵-۱۲	
۰/۸۳	۱۸	۷۰۰-۹۰۰		۰/۸۷	۱۳	۱۲-۲۰	
۰/۶۵	۹	۱۱۰۰-۹۰۰		۱/۰۱	۳۱	۲۰-۴۰	
۰/۲۵	۱	۱۴۴۱-۱۱۰۰		۰/۹۴	۱۰	>۴۰	
۱/۰۱	۴۲	۰-۵۰۰	فاصله از گسل (m)	۰/۰۰	۰	زمین مسکونی	کاربری زمین
۱/۱۳	۱۹	۵۰۰-۱۰۰۰		۰/۶۴	۳۵	زمین جنگلی	
۰/۸۱	۵	۲۰۰۰-۱۰۰۰		۳/۰۴	۳۰	زمین دیم و باغی	
۰/۰۰	۰	>۲۰۰۰		۰/۹۳	۱	زمین شالیزار	
۱/۴۳	۴۷	۰-۱۰۰۰	فاصله از رودخانه (m)	۱/۲۸	۵۹	۰-۵۰۰	فاصله از جاده (m)
۰/۶۵	۱۴	۲۰۰۰-۱۰۰۰		۰/۳۴	۵	۵۰۰-۱۰۰۰	
۰/۴۸	۴	۳۰۰۰-۲۰۰۰		۰/۵۵	۲	۱۰۰۰-۱۵۰۰	
۰/۳۱	۱	>۳۰۰۰		۰/۰۰	۰	>۱۵۰۰	
۷/۸۴	۳	۰/۱۳-۰/۳	شاخص NDVI	۰/۸۳	۲۲	۰-۰/۳	تراکم گسل (km ² /km)
۲/۱۴	۱۰	۰/۳-۰/۵		۱/۳۸	۱۹	۰/۳-۰/۷۵	
۳/۰۵	۲۱	۰/۵-۰/۷		۱/۰۶	۱۹	۰/۷۵-۱/۲۵	
۰/۵۹	۳۲	۰/۷-۰/۸۶		۰/۷۵	۶	۱/۲۵-۱/۷۵	
۰/۷۸	۸	شمال	جهت شیب	۰/۸۴	۴	۰-۳	تراکم آب‌راه (km ² /km)
۰/۹۰	۶	شمال شرقی		۰/۶۵	۱۰	۳-۶	
۰/۸۲	۴	شرق		۰/۹۸	۲۴	۶-۹	
۱/۷۱	۱۲	جنوب شرقی		۱/۳۱	۲۱	۹-۱۲	
۱/۷۴	۲۰	جنوب		۱/۲۹	۷	>۱۲	
۱/۲۷	۹	جنوب غربی		۱/۰۵	۳۰	مقعر	
۰/۲۶	۲	غرب	۰/۹۳	۱۴	بدون انحنا		
۰/۴۵	۵	شمال غربی	۰/۹۸	۲۲	محدب		
۲/۴۷	۱۶	۲/۵-۴/۵	۰/۶۲	۱۹	۰-۱	تراکم جاده	
۰/۰۰	۰	>۴/۵	۱/۰۹	۳۱	۱-۲/۵		
۰/۰۰	۰	Pe1,m	زمین شناسی	۰/۰۰	۰	K2m	زمین شناسی
۱/۶۵	۷	PIQc,s		۰/۷۵	۳۷	M2,3 m,s,l	
۸/۱۵	۵	Q2		۳/۴۶	۳	Mg	
۰/۰۰	۱	Qal		۱/۲۹	۱۰	Mm,s	
۱/۱۸	۱	Qt		۲/۲۵	۳	Mm1	
۰/۰۰	۰	V		۰/۰۰	۰	Pe1	

جدول ۳- اطلاعات خروجی از جنگل تصادفی.

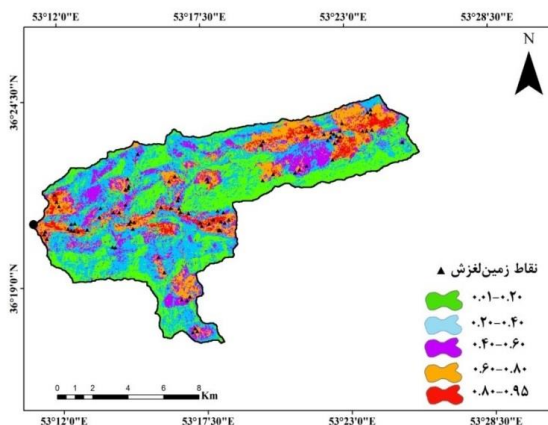
عامل	شاخص پوشش گیاهی	کاربری زمین	جهت شیب	طبقه-های ارتفاعی از دریا	تراکم آبراه	تراکم زمین-شناسی	درجه-ی شیب رودخانه	فاصله از جاده	تراکم جاده	تراکم انحنای زمین	فاصله از جاده	فاصله از گسل	
اهمیت	۵۰۷۹	۴/۹۱۵	۴/۹۰۵	۳/۱۰۲	۳/۰۸۹	۲/۸۹۹	۲/۳۵۹	۱/۶۷۸	۱/۶۱۴	۱/۵۲۶	۱/۲۰۵	۱/۰۰۷	۰/۹۱۷

جدول ۴- درصد مساحت هریک از طبقه‌های تأثیر در منطقه.

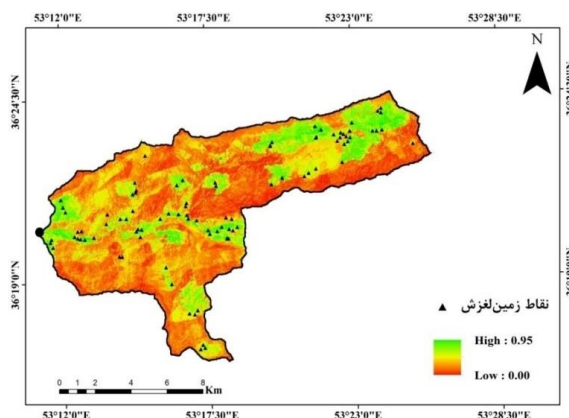
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵
طبقه	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مساحت	۶۱/۰۷	۵۶/۶۴	۲۵/۰۱	۲۴/۹۰	۵/۲۶
درصد	۳۵/۳۳	۳۲/۷۶	۱۴/۴۷	۱۴/۴۰	۳/۰۴

وقوع زمین لغزش است، احتمال حضور این نقطه‌ها در طبقه‌های با حساسیت بیش‌تر (یعنی طبقه‌های خیلی زیاد و زیاد) و حتا در طبقه‌ی متوسط نیز هست. بنابراین احتمال حضور نقطه‌های زمین لغزش گروه اعتبارسنجی داده‌ها در طبقه‌ی خیلی زیاد و زیاد به ترتیب ۷/۶۹ و ۵۰/۰۰٪، اما برای طبقه‌ی خیلی کم این عدد خیلی کم (۳/۸۵٪) است (شکل ۵)، درحالی که درصد مساحت هریک از طبقه‌های خیلی زیاد، زیاد و خیلی کم به ترتیب ۱۵، ۱۳/۴۲ و ۳۵/۴۳٪ از مساحت کل است. بنابراین نمودار ستونی مربوط تأییدکننده‌ی آن است که روش جنگل تصادفی توانمندی عالی در تعیین کردن نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش در این منطقه دارد (چن و همکاران ۲۰۱۴؛ تری‌گیلا و همکاران ۲۰۱۵).

بر اساس نقشه‌ی تهیه‌شده، حساسیت به وقوع زمین لغزش با روش جنگل تصادفی با تابع شکست در منطقه‌ی سادات محله‌ی ساری (شکل ۴الف) به پنج طبقه‌ی حساسیت خیلی کم (۳/۸۵٪)، کم (۵/۳۸٪)، متوسط (۲۳/۰۸٪)، زیاد (۵۰٪) و خیلی زیاد (۷/۶۹٪) تقسیم کرده شد (شکل ۴ب). برای ارزیابی کردن دقت نقشه‌ی پیش‌بینی حساسیت زمین لغزش، مجموع نقطه‌های گروه اعتبارسنجی به کار گرفته شد (شکل ۵). در محور افقی طبقه‌های نقشه‌ی حساسیت است، و در محور عمودی درصد مساحت هریک از طبقه‌ها و درصد وقوع زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در هر طبقه است. بر پایه‌ی این که ۲۶ نقطه‌ی انتخاب شده برای صحت‌سنجی در واقع نشان‌دهنده‌ی شرایط

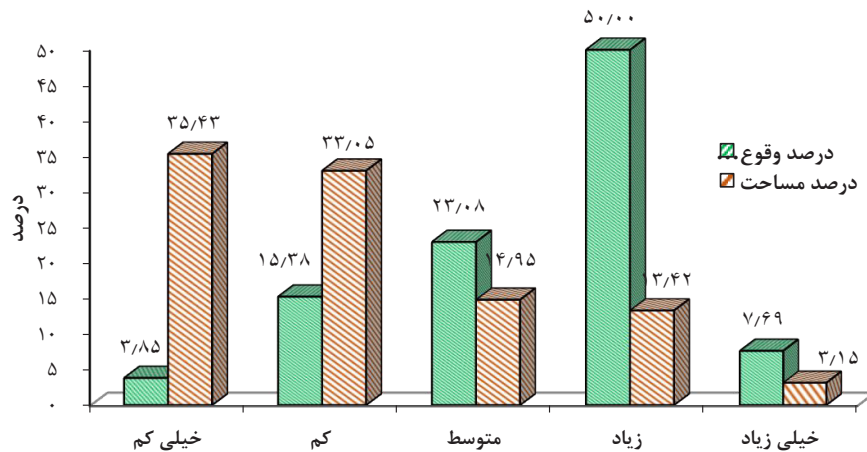


(ب)



(الف)

شکل ۴- نقشه‌ی حساسیت (الف) و طبقه‌های حساسیت (ب) به وقوع زمین لغزش با روش جنگل تصادفی در سادات محله، ساری.



شکل ۵- نمودار ستونی ارزیابی صحت نقشه حساسیت زمین لغزش در آبخیز سادات محله، ساری.

همراه با مجموع نقطه‌های طبقه‌ی سه با احتمال وقوع کم‌تر از ۰/۵ به معنی «نبود» با شناسه‌ی صفر، و بقیه‌ی نقطه‌های گروه آزمون مدل به معنی «بود» با مقدار ۱ گرفته شد. برای ارزیابی کردن مدل جنگل تصادفی ۳۰٪ از داده‌های زمین لغزش که از ابتدا برای آزمون مدل انتخاب شده بود به کار گرفته شد.

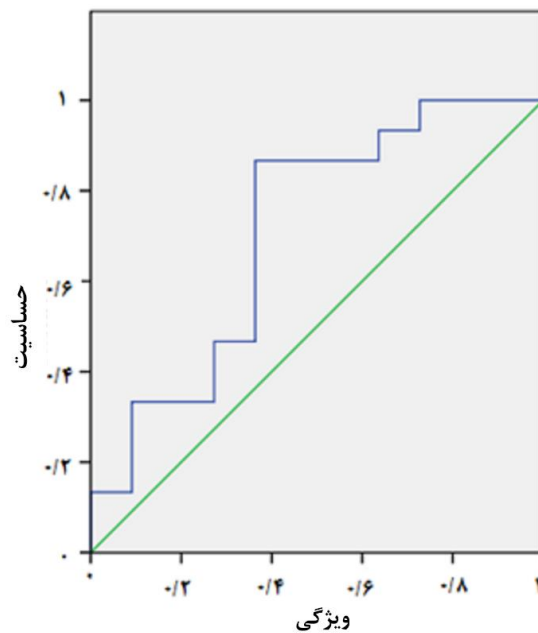
همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین در جدول ۵ آورده شده است (اوه و پرهادان ۲۰۱۱). برای این روش در مدل جنگل تصادفی اطلاعات زمین لغزش‌های بررسی شده به کار گرفته شد، به این شیوه که مجموع نقطه‌های گروه آزمون مدل در طبقه‌ی یک و دوی نقشه‌ی طبقه‌بندی شده زمین لغزش،

جدول ۵- همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی در روش ROC (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳).

کیفی	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف
کمی	۱ تا ۰/۹	۰/۹ تا ۰/۸	۰/۸ تا ۰/۷	۰/۷ تا ۰/۶	۰/۶ تا ۰/۵

۶). می‌توان نتیجه گرفت که دقت این مدل ۷۰۹٪ است که در محدوده‌ی کیفی خوب (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳).

سطح زیر منحنی در روش ROC برای مدل جنگل تصادفی ۰/۷۰۹ و میزان خطای معیاری آن ۰/۱۰ به دست آمد (شکل



شکل ۶- ارزیابی دقت مدل جنگل تصادفی با روش ROC.

چوب‌کشی و ماندن رد چرخ)، تغییردادن کاربری از جنگل به باغ و دیس می‌تواند بر کوبیدگی و تخریب خاک جنگل و به دنبال آن وقوع زمین‌لغزش تأثیر بسزایی داشته باشد (کاویان و همکاران ۲۰۱۶). این بخش با نتیجه‌های جیرارد و گاردنر (۲۰۰۲)، گونز و وانگر (۲۰۱۴) و موسوی خطیر و همکاران (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد.

بر اساس نتیجه‌ها، شیب‌های جنوبی (با درصد آفتاب‌گیری بیش‌تر) و جنوب‌شرقی بیش‌ترین درصد تاثیر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها را نشان داد. جهت شیب با تأثیرگذاری بر تبخیر و تعرق می‌تواند بر روند فرآیندهای آب‌شناسی منطقه اثر کند (طالبی و همکاران ۲۰۱۸) بر پایه‌ی ارزیابی‌های مدل جنگل تصادفی این عامل یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در وقوع زمین‌لغزش در منطقه است.

بررسی ارتفاع از تراز دریا بیان‌گر این است که طبقه‌ی ارتفاعی ۲۲۵-۵۰۰ متر بیش‌ترین وزن را در زمین‌لغزش داشت (جدول ۲). با افزایش ارتفاع حساسیت به وقوع زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. اگرچه پاچری و پانت (۱۹۹۲) نشان دادند که حساسیت به وقوع زمین‌لغزش با افزایش ارتفاع رابطه‌ی مستقیمی دارد. علت آن ممکن است تغییرکردن بارش از باران به برف، و ماندگارشدن آن، و تسریع‌شدن یخ‌بندان و ذوب در ارتفاع‌های سراب باشد (ایلانو و همکاران، ۱۳۸۹) اما اگر در ارتفاع‌های سراب فراوانی لغزش کم‌تر شود، نشان‌دهنده‌ی آن است که در منطقه عامل‌های دیگری مانند سنگ‌شناسی مقاوم به لغزش هست (مرادی و همکاران ۱۳۸۹). از عامل‌های مؤثر دیگر در وقوع زمین‌لغزش‌ها درجه‌ی شیب

بحث و نتیجه‌گیری

عامل‌های پرشماری مانند پستی‌بلندی، زمین‌شناسی، عنصرهای ساختاری، درجه‌ی هوازدگی، توسعه‌یافتن درز و شکاف، نفوذپذیری، درجه‌ی شیب، الگوی زه‌کشی، کاربری زمین و اقلیم موجب وقوع زمین‌لغزش می‌شود (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳؛ محمدی‌نیا و همکاران ۲۰۱۶؛ طالبی و همکاران ۲۰۱۸). ارتباط بین عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها با روش جنگل تصادفی نشان داد که پوشش گیاهی و کاربری زمین در اولویت و تأثیر بیش‌تری در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در آبخیز سادات‌محله است، و جهت شیب، ارتفاع از تراز دریا، تراکم آبراه، زمین‌شناسی، درجه‌ی شیب، فاصله از آبراه، تراکم جاده، تراکم گسل، انحنای زمین، فاصله از جاده و فاصله از گسل به ترتیب در درجه‌های کم‌تر اهمیت بود.

بر پایه‌ی خصوصیت‌های گیاه در خاک، از دید نظری ارتباط نامستقیمی بین بودن پوشش گیاهی و وقوع زمین‌لغزش هست. در باره‌ی ارزیابی تأثیر شاخص پوشش گیاهی، زمین‌لغزش‌های منطقه در محدوده‌ی طبقه‌های با ارزش ۰/۳ - ۰/۱۳ است، که نشان‌دهنده‌ی پوشش درختچه‌یی و مرتعی است. بررسی کاربری زمین نشان می‌دهد که بیش‌ترین درصد لغزش‌ها در زمین‌جنگلی است، و با این حال بیش‌ترین وزن در محاسبه‌ها به باغ و دیس داده شد، که نشان می‌دهد در مدیریت‌کردن این بخش باید بیش‌تر توجه کرد. در این منطقه‌ها فعالیت‌های انسانی نظیر جاده‌سازی و بهره‌برداری از جنگل (رفت‌وآمد دستگاه‌ها و خودروهای

است که از عامل‌های محرک حرکت‌های توده‌ی است، افزایش شیب، بالا رفتن تنش برشی و گسیختگی دامنه را به همراه دارد (احمدی ۲۰۰۷)، بررسی شیب نشان می‌دهد که با این که بیش‌ترین درصد زمین‌لغزش‌ها در طبقه‌ی ۲۰-۴۰ درجه است، بیش‌ترین وزن در طبقه‌ی ۱۲-۵ درجه بود. بنابراین با افزایش درجه‌ی شیب و ارتفاع از تراز دریا، فراوانی زمین‌لغزش‌ها افزایش پیدا کرده است. در شیب‌های کم نیروی مقاوم بیش‌تر از نیروی محرکه است (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۳) که شرایط لازم برای زمین‌لغزش را مساعد نمی‌کند، ولی با افزایش یافتن شیب، نیروی مقاوم در برابر نیروی محرکه کم می‌شود و بستر مناسبی را برای زمین‌لغزش فراهم می‌کند. این بخش از تحقیق با یافته‌های محمدی‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) هم‌خوانی دارد.

بررسی عنصر خطی فاصله از آبراه نشان داد که بیش‌ترین وزن لغزش‌ها در طبقه‌ی ۱۰۰۰-۰ است و با افزایش فاصله از آبراه لغزش‌ها کاهش می‌یابد. ارتباط مستقیمی بین زمین‌لغزش‌ها و تراکم آبراه دیده می‌شود. با افزایش تراکم آبراه‌ها، به تدریج بر فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه افزوده شده است. طالبی و همکاران (۲۰۱۸) شاخص قدرت رودخانه را مطرح کردند. در منطقه‌هایی که قدرت رودخانه بیش‌تر می‌شود تأثیر آن بر وقوع زمین‌لغزش زیاد می‌شود، زیرا آبراه‌ها با کاهش دادن مقاومت دامنه‌ی بستر زیرشویی کناره‌ها را فراهم می‌کند و شرایط برای رخداد زمین‌لغزش مساعد می‌شود.

نتیجه‌ی بررسی شکل شیب دامنه‌ها در منطقه بیانگر ناپایداری بیش‌تر شیب‌های مقعر در مقایسه با شیب‌های محدب و مستقیم است. در باره‌ی علت حساسیت شیب‌های مقعر می‌توان گفت که جمع‌شدن آب و نگاه‌داشت آن برای دوره‌ی طولانی در این نوع دامنه‌ها، با توجه به اقلیم منطقه، می‌تواند منجر به شکستن شیب و وقوع زمین‌لغزش شود (پره‌ادان و لی ۲۰۰۹). این بخش از نتیجه‌ها با پژوهش محمدی‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) هم‌خوانی دارد، مبنی بر وقوع زمین‌لغزش‌ها در شیب مقعر به دلیل این که در دامنه‌های مقعر جریان آب همگرا است، و انرژی بیش‌تری به

روان‌آب می‌دهد و تأثیر بیش‌تری بر زمین‌لغزش دارد. بررسی فاصله از جاده نشان داد که بیش‌ترین درصد لغزش‌ها در فاصله‌ی ۵۰۰-۰ متر رخ داده است، و با افزایش یافتن فاصله از جاده میزان لغزش‌ها کاهش می‌یابد. به‌طور کلی جاده‌ها وضعیت طبیعی دامنه را به هم می‌زند، و موجب به‌وجود آمدن بریدگی‌های عمودی در دامنه می‌شود. این باعث افزایش فشار بر بخش پایینی جاده، و افزایش زمین‌لغزش در اطراف جاده‌ها می‌شود. به این دلیل است که در بسیاری از پژوهش‌های زمین‌لغزش، جاده عامل تأثیرگذار دانسته می‌شود (بای و همکاران ۲۰۱۰؛ دیوکتوتا و همکاران ۲۰۱۳؛ دمیر و همکاران ۲۰۱۳). نتیجه‌های این بخش با نتیجه‌های کلارستاقی و همکاران (۲۰۰۷)، و سا و مازاری (۱۹۹۶) که کاهش تعداد زمین‌لغزش را با فاصله‌گرفتن از جاده، و اثر جاده‌سازی را بر وقوع زمین‌لغزش‌ها نشان دادند مطابقت دارد. بررسی فاصله از گسل نشان داد که بیش‌ترین درصد لغزش‌ها در فاصله‌ی ۵۰۰-۰ متر است. با این حال، بیش‌ترین وزن در محاسبه‌ها به طبقه‌ی ۱۰۰۰-۵۰۰ متر داده شد. با افزایش تراکم گسل‌ها، تراکم زمین‌لغزش‌ها در منطقه نیز تقریباً افزایش پیدا کرد. گسل مهم‌ترین عامل زمین‌ساختی است که موجب حساسیت دامنه‌ها می‌شود. به همین دلیل در پژوهش‌های زیادی نقش آن به اثبات رسیده است (چاپوهان و همکاران ۲۰۱۰).

از آن‌جاکه مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه پوشش گیاهی و کاربری زمین است، پیشنهاد می‌شود عمده‌ی کارهای پیش‌گیری در منطقه باید جهت جلوگیری از تغییردادن کاربری زمین و ساخت‌وساز (که سبب افزایش بار در سازندهای حساس به زمین‌لغزش می‌شود) و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی باشد. بر پایه‌ی تأثیر زیاد جاده‌سازی‌های نا اصولی در وقوع زمین‌لغزش‌ها، و برای جلوگیری کردن از پی‌آمدهای مخرب آن توصیه می‌شود که در هنگام طراحی و ساخت جاده‌ها، به‌خصوص جاده‌های جنگلی، از کارشناسان منابع طبیعی نظرخواهی شود.

- Abadinejad SA, Yamani M, Maghsoudi M, Shadfar S. 2007. Evaluation of Fuzzy Logic Operators in landslide analysis case study: Shirood Watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 1(2):39–44. (In Persian).
- Abadini M, Fathi MH, Bahashti javid A. 2015. Landslide hazard zonation using fuzzy logic model (Case study: Gory hay River Basin). *Conference on Geographical Sciences of Iran*, 31(1): 43–64. (In Persian).
- Ahmadi A. 2007. *Applied Geomorphology of Iran, Water Erosion (1)*. University of Tehran Publications, 715 p. (In Persian).
- Akgun A, Kincalanc C, Pradhan B. 2011. Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (West Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9): 5453–5470.
- Akgun A, Sezer EA, Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Pradhan B. 2012. An easy-to-use MATLAB program (Maylands) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Computers & Geosciences*, 38(1): 23–34.
- Althuwaynee OF, Pradhan B, Park HJ, Lee JH. 2014. A novel ensemble decision tree-based Chi squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11(6): 1063–1078.
- Amir Ahmadi A, Kamrani Dalir H, Sadeghi M. 2011. Landslide Hazard Zonation, through hierarchical analysis method (HAM), the case of chelav. *Geography*, 8(27): 182–203.
- Asghari S, Khodabandehlou B, Naseri A, Moradi A. 2019. Extracting Land Use Map based on a comparison between Pixel-Based and Object-Oriented Classification Methods. Case study: Zanzan City Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 28(110):195–208. (In Persian).
- Bai SB, Wang J, Lü GN, Zhou PG, Hou SS, Xu SN. 2010. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1–2): 23–31.
- Breiman L, HFriedman J, Olshen RA, Stone CJ. 1984. *Classification and regression trees*. Chapman & Hall, New York.
- Caniani D, Pascale S, Sado F, Sole A. 2008. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards*, 45 (1): 55–72.
- Catani F, Lagomarsino D, Segoni S, Tofani V. 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards Earth System Science*, 13: 2815–2831.
- Chauhan S, Sharma M, Arora MA. 2010. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*, 7(4): 411–423.
- Chen W, Li X, Wang Y, Chen G, Liu S. 2014. Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges. *China. Remote Sensing of Environment*, 152: 291–301.
- Demir G, Aytekin M, Akgun A, Ikizler SB, Tatar O. 2013. A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods. *Natural Hazards*, 65(3): 1481–1506.
- Devkota KC, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu IC, Dhital MR, Althuwaynee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entro-

- py and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65(1): 135–165.
- Eemini L, Catani F, Casagli N. 2005. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1–4): 327–343.
- Garaei P, Mousavi SR, Kavian A. 2009. Regional Modeling of Landslide Hazard, Using Multivariate Statistic Method in Lajemrood –Sari Basin. *Geosciences*, 19(73): 29–36.
- Glade T. 1997. Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. *Environmental Geology*, 35(2–3): 160–174.
- Geographical Organization of the Army. 2006. Topographic maps of Iran. Sheet No. 37. Armed Forces Publications. Tehran.
- Guns M, Vanacker V. 2014. Shifts in landslide frequency–area distribution after forest conversion in the tropical Andes. *Anthropocene*, 6: 75–5.
- Haštie T. 2001. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, In Springer series in statistics New York, xvi: 533 p.
- Ilanlo M, Moghimi E, Servati MR, Ghahroodi tali M. 2010. Hazard zonation of mass movements using fuzzy logic method (case study: Sierra catchment). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 5(11): 12–26. (In Persian).
- Jaafari A, Mafi Gholami D. 2017. Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2): 232–243. (In Persian).
- Jaafari A, Najafi A, Pourghasemi H.R, Rezaeian J, Sattarian A. 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4): 909–926.
- Jebur MN, Pradhan B, Shafri HZ.M, Yusoff ZM, Tehrany MS. 2015. An integrated user-friendly ArcMap tool for bivariate statistical modeling in geoscience applications. *Geoscientific Model Development*, 8(3): 881–891.
- Kavian A, Safari A, Parsakhoo A. 2016. Comparison of soil loss from experimental plots established in different parts of a forest road. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3): 25–45.
- Kelarestaghi A, Habibnejad M, Ahmadi H, 2007. A study of landslide occurrence in relation to land use changes and road construction: Case study Tadjan Watershed, Sari. *Geographical Research Quarterly*, 39(62): 81–91. (In Persian).
- Koehorst BAN, Kjekstad O, Patel D, Lubkowski Z, Knoeff JG, Akkerman GJ. 2005. Work Package 6, Determination of Socio-Economic Impact of Natural Disasters. *Assessing Socio-Economic Impact in Europe*. 173 p.
- Komac M. 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in per alpine Slovenia. *Geomorphology*, 74(1): 17–28.
- Le EM, Jones, DK. 2004. Landslid risk assessment. London: Thomas Telford. 454 p.
- Lieb M, Glaser B, Huwe B. 2012. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170: 70–79.
- Lin WT, Chou W, Lin CY. 2008. Earthquake-induced landslide hazard and vegetation recovery assessment using remotely sensed data and a neural network-based classifier: A case study in central Taiwan. *Natural Hazards*, 47(3): 331–347.
- Mathew J, Jha VK, Rawat GS. 2007. Application of binary logistic regression analysis and its validation for landslide susceptibility mapping in part of Garhwal Himalaya, India. *Inter-*

- national Journal of Remote Sensing, 28(10): 2257–2275.
- Mohamadnia M, Amirahmadi A, Akbari E, Bahrami SH. 2016. Landslide hazard zonation in Binalud Mountains by Bayesian method (Torghabeh- Darrod new Transit road). Journal of Geographic Space, 16(55):217–238. (In Persian).
- Mohammady M, Pourghasemi HR, Pradhan B. 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer and weights of evidence models. Journal of Asian Earth Sciences, 61: 221–236.
- Mohammady M, Pourghasemi HR, Moradi HR, Fiznia S. 2007. Landslide hazard analysis in GIS environment and its application in soil and water conservation, 4th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran Watershed Management, 6 p. (In Persian).
- Mohammady M, Pourghasemi HR. 2017. Prioritization of landslide-conditioning factors and its landslide susceptibility mapping using random forest new algorithm (Case study: A part of Golestan Province). Journal of Watershed Management Research. 8 (15):161–170. (In Persian).
- Mokhtari D, Ebrahimi H, Salmani, S. Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment). RS & GIS for Natural Resources, 10(3): 93–105. (In Persian).
- Mosaffaie J, Ownegh M, Mesdaghi M, Shariat Jafari M. 2009. Comparing the efficiency of statistical and empirical landslide hazard zonation models in Alamout watershed. Journal of Water and Soil Conservation, 16: 43–61.
- Mosaffaie J, Ownegh M. 2011. Landslide hazard zonation by AHP and regression model, Case study: Alamout Watershed. Watershed Engineering and Management, 3 (1): 149–158. (In Persian).
- Mosavi Khatir SZ, Kaviani A, Soleimani K. 2009. Landslide susceptibility mapping in Sajaroud Basin using logistic regression Model. Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), 14 (53): 99–112. (In Persian).
- National Cartographic Center. 1949. Geological Survey & Mineral Exploration of IRAN. Tehran Iran.
- Nandi A, Shakoor A. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. Engineering Geology, 110(1): 11–20.
- Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Sonmez H. 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. Engineering Geology, 97 (3–4): 171–191.
- Oh H-J, Pradhan B. 2011. Application of a neuro-fuzzy model to landslide susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. Computers & Geosciences, 37 (9): 1264–1276.
- Ownegh M. 2004. Assessing the Applicability of Australian Landslide databases for hazard management. In 13 th International Soil Conservation Organization Conference-Brisbane, July. Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions.
- Pachauri AK, Pant M. 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. Engineering Geology, 32(1–2): 81–100.
- Pachauri AK, Gupta PV, Chander R. 1998. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. Environmental Geology, 36: 325–334.
- Pahlavan Rad MR, Khormali F, Toomanian N, Kiani F, Komaki ChB. 2015. Digital soil mapping using Random Forest model in Golestan Province. Journal of Water and Soil Conservation, 21(6): 73–93. (In Persian).
- Peters J, Verhoest N, Samson R, Boeckx P, De

- Baets B. 2008. Wetland vegetation distribution modelling for the identification of constraining environmental variables. *Landscape Ecology*, 23 (9): 1049–1065.
- Pourghasemi HR, Kerle N. 2016. Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(185): 1–17.
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Fatemi Aghda SM. 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Nat Hazards*, 69:749–779.
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Mohammadi M, Mostafazadeh R, Goli Jirandeh A. 2013. Landslide hazard zoning using bayesian theory. *Journal of Water and Soil Science*, 16(62): 109–121. (In Persian).
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Mohammadi M. 2014. Landslide susceptibility zoning, using weight of evidence probabilistic model. *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 1(2): 69–80. (In Persian).
- Pradhan B, 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computer & Geoscience*, 51: 350–365.
- Pradhan B, Lee S. 2010. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60(5): 1037–1054.
- Pradhan B, Lee S. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. *Environmental Modeling and Software*, 25 (6): 747–759.
- Rahmati O, Pourghasemi HR, Melesse AM. 2016. Application of GIS-based data-driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137: 360–372.
- Rajabi M, Feyzolahpour M. 2014. Zoning the Landslides of Givichay River Basin by Using Multi-Layer Perceptron Model. *Geography and Development Iranian Journal*, 2(36): 161–180. (In Persian).
- Rastegarnia M, Sanati A. 2016. Determination of hydrological units using random forest method for one of Iran's oil reservoirs. *Promotional Science Monthly Oil and Gas Exploration and Production*, 135: 55–59. (In Persian).
- Safari A, Moghimi A. 2011. Geomorphologic assessment of urban development and vulnerability caused by landslide in mountainous hillsides of Tehran Metropolis. *Physical Geography Research Quarterly*, 41(67): 53–71.
- Sah MP, Mazari RK. (1998). Anthropogenic ally accelerated mass movement, Kulu Valley, Himachal Pradesh, India. *Geomorphology*, 26(1), 123–138.
- Samareh H, Rezazadeh R. 2012. Landslide hazard spatial analysis using Kanagava model. 5th National Conference on Watershed Management and Water Resources Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, IRAN. (In Persian).
- ShariatJafari M. 1996. Landslide (principles and basics of stability of natural slopes). Sazeh Publications, 218 p. (In Persian).
- Shirani K, Chavoshi S, Ghayoumian J. 2006. Investigation and evaluation of landslide hazard zonation methods in Marbor River

- Basin. Research Journal of University of Isfahan «SCIENCE», 23(1): 22–38. (In Persian).
- Stumpf A, Kerle N. 2011. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. Remote Sensing of Environment, 115 (10): 2564–2577.
- Talebi A, Goudarzi S, Pourghasemi HR. 2018. Investigation of the possibility of landslide hazard mapping using the Random Forest algorithm (Case study: Sardarabad Watershed, Lorestan Province). Journal of Natural Environmental Hazards, 7(16): 45–64. (In Persian).
- Trigila A, Catani F, Casagli N, Crosta G, Esposito C, Frattini P, Iadanza C, Lagomarsino D, Lari S, Scarascia Mugnozza G, Segoni S, Spizzichino D, Tofani V. 2012. The landslide susceptibility map of Italy at 1: 1 million scale. In EGU General Assembly Conference Abstracts, 22–27 April, Vienna, Austria.
- Trigila A, Iadanza C, Esposito C, Scarascia-Mugnozza G. 2015. Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). Geomorphology, 249: 119–136.
- United States Geological Survey. 2020. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Accessed: 20/10/2019.
- Urmiae A, Safaei M. 1996. Comparison of two methods of Kanagawa and Anbalagan in landslide hazard zonation in Nkarood watershed. Proceedings of the Second Iranian Geological Society Conference, pp. 23–40. (In Persian).
- Varnes DJ. 1984. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice (No. 3). Vorpahl P, Elsenbeer H, Marker M, Schroder B. 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides? Ecological Modelling, 239: 27–39.
- Yalcin A, Reis S, Aydinoglu AC, Yomralioglu T. 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. Catena, 85(3): 274–287.
- Yesilnacar EK. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, Ph.D. Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 p.
- Youssef AM, Pourghasemi HR, Pourtaghi ZS, Al-Katheeri MM. 2015. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. Landslides, 13(5): 839–856.
- Zabihi M, Pourghasemi HR, Behzadfar M. 2015. Groundwater potential mapping using Shannon's Entropy and random forest models in the Bojnourd Township. Iranian Journal of Eco Hydrology, 2(2): 221–231. (In Persian).
- Zongji Y, Jianping Q, Xiaogang Z. 2010. Regional landslide zonation based on entropy method in Three Gorges area, China. In Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Seventh International Conference 10–12 Aug, Yantai, China.



Watershed Management Research

VOL. 34, No. 1, Ser. No: 130, Spring 2021, pp. 74 -92
DOI: 10.22092/wmej.2020.341619.1311

Evaluation of Random Forest Method in Landslide Susceptibility Mapping in Sadat Mahalleh Watershed of Sari

Ataollah Kavian*

(Corresponding Author) Professor, Department of Watershed Management Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

Mohammad Rezaei

M.Sc. Student, Department of Management Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Kaka Shahedi

Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

Mohammad Ali Hadian Amri

Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran

Corresponding Author Email: A.kavian@sanru.ac.ir

Received: 20 January 2020

Accepted: 20 September 2020

Abstract

Landslides are one of the major types of slope instability which cause enormous financial losses and casualties; therefore, it is imperative to consider them in the study of geomorphology, erosion and sedimentation in important watershed. The aim of the present study was to investigate and rank the landslide susceptibility using a random forest method in the Sadat Mahalleh Watershed, Sari. Elevation from the sea level, geology, land use, slope (degree, direction, shape and length), distance from linear elements such as faults, streams and roads, normalized difference vegetation index and slope form were considered as effective parameter in the landslide occurrence. Zoning landslide sensitivity was achieved by coding in the R and GIS10.3 soft wares. In order to determine the weight of each of the factors and classes effective in zoning the landslide sensitivity and validation of landslide potential prediction maps, the abundance ratio method and the receiver operating characteristics (ROC) were used. The results indicated that among the effective factors, vegetative cover and land use, had the most paramount impact on the landslide occurrence in the study area. A landslide sensitivity map was prepared using the random forest method by dividing into five class, namely: very low (3.85%), low (5.38%), moderate (23.08%), high (50%) and very high (7.69%) sensitivities. Validation of the results of the landslide sensitivity zoning maps, using the relative factor characteristics index diagram, indicated that the area under the curve (AUC) for random forest method was 0.709 and its standard error was 0.10. It is reasonable to claim that the forest method provided an acceptable accuracy for mapping the landslide sensitivity. A landslide sensitivity map provides prone complete and accurate information for natural resource managers to detect the landslide areas.

■ **Keywords:** Frequency ratio method, susceptibility zoning, validation, vegetation index ■