



کارایی الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت پذیری زمین لغزش های کم عمق

فائزه رجبزاده^{۱*}، سید سعید غیائی^۲ و امید رحمتی^۳

*^۱ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، ایران

* نویسنده و مسئول مکاتبات: faizehrajabzadeh@yahoo.com

^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۳ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

چکیده

زمین لغزش های کم عمق از جمله بلایای طبیعی است که خسارات جانی و مالی فراوانی در حوزه های آبخیز کوهستانی وارد می آورد. استفاده از روش های مناسب برای ارزیابی خطر لغزش های کم عمق و تعیین عوامل مؤثر وقوع، در کاهش خطرات ناشی از آن بسیار مؤثر است. در این بررسی، پتانسیل الگوریتم حداکثر آنتروپی در مدل سازی حساسیت پذیری زمین لغزش مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق که در حوزه آبخیز خیاوچای واقع در غرب استان اردبیل انجام شد، ۷۴ زمین لغزش شناسایی شد که ۵۲ زمین لغزش (۷۰ درصد) برای آموزش مدل و ۲۲ زمین لغزش (۳۰ درصد) برای صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفت. عوامل محیطی شامل عوامل پیوسته (ارتفاع، شیب، جهت، انحنای سطح، تراکم زهکشی، بارندگی) و طبقه ای (سنگ شناسی و کاربری اراضی) به عنوان داده های ورودی برای مدل حداکثر آنتروپی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از آزمون بهینه بر اساس روش ارزیابی متقابل نشان داد وجود داده های پیوسته و ترکیب آن ها با داده های طبقه ای، بهترین شرایط را برای برآورد امکان پذیر می سازد. نتایج صحت سنجی نشان داد سطح زیر منحنی ROC و AUC برای حصول موفقیت و پیش بینی مدل، به ترتیب برابر با ۹۶/۱ و ۹۷/۶ درصد است. همچنین، تجزیه و تحلیل توزیع عوامل نشان داد لایه های طبقات ارتفاعی و بارندگی به عنوان مؤثرترین فاکتورها است. با تفسیر منحنی پاسخ مشخص شد شیب های تند با خاک های پادگانه آبرفتی قدیمی، نسبت به زمین لغزش بسیار آسیب پذیرترند. پیش بینی عملکرد مدل سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی بسیار بهتر از دیگر مدل ها مانند رگرسیون لجستیک است که به طور گسترده ای در ارزیابی حساسیت پذیری زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. به طوری که سطح زیر منحنی ROC برای آزمون مدل برابر با ۰/۹۶۱ به دست آمد که در مقایسه با مدل رگرسیون لجستیک ($AUC = 0.572$) که در مطالعه ای جداگانه در منطقه مورد مطالعه به کار برده شد، اختلاف قابل توجهی دارد. در نتیجه می توان مطرح نمود مدل سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی یک مدل پیش بینی مؤثر برای حساسیت پذیری زمین لغزش است.

کلید واژه ها: آبخیز خیاوچای؛ بلایای طبیعی؛ منحنی پاسخ؛ منحنی ROC

مقدمه

بهار محرک اصلی وقوع زمین لغزش بوده و این فرآیند را تسریع می بخشد. تولید نقشه یا پیش بینی مناطق آسیب پذیر به زمین لغزش به منظور جلوگیری از خطرات زمین لغزش و برنامه ریزی های آتی برای کاربری اراضی بسیار مهم است (Park, 2015). تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش

زمین لغزش یکی از بلایای زمین شناختی است که خسارت های جانی و مالی جدی به بخش اقتصادی و تأسیسات وارد می آورد (Akgun, 2012). وقوع باران های سنگین و ذوب برف دامنه های سبلان با فرا رسیدن فصل

نیازمند عوامل محیطی مربوط به وقوع زمین‌لغزش و مدل‌های پیش‌بینی کمی است. به‌دلیل پیشرفت در دهه‌های اخیر در زمینه علوم کامپیوتری، سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌طور گسترده‌ای به‌منظور آماده‌سازی و مدیریت عوامل یادشده مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از مدل‌های کمی به‌منظور تلفیق عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و نیز تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش پیشنهادشده و مورد استفاده قرار گرفته است. مدل نسبت حداکثر احتمال^۱ (نسبت فراوانی) و مدل‌های اوزان شاهد^۲ به‌عنوان مدل‌های احتمالاتی و به دلیل سادگی و ارتباط آسان آن‌ها به اپراتور سامانه اطلاعات جغرافیایی مکرراً مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Lee et al., 2004; Lee and Sambath, 2006). رگرسیون لجستیک نیز به‌طور گسترده‌ای در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش استفاده شده است (Greco et al., 2012; Akgun, 2007). مدل‌های استفاده‌شده دیگر شامل مجموعه تئوری فازی (Park et al., 2003)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Choi et al., 2010) و ماشین‌های بردار پشتیبان (Ballabio and Sterlacchini, 2012) است.

مدل‌سازی پراکنش گونه‌های گیاهی نیز با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۳ از قبیل رگرسیون درختان تقویت‌شده^۴ توسط Leathwick و همکاران (۲۰۰۶) و درختان تصادفی^۵ توسط Prasad و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است. مدل‌سازی پراکنش گونه‌های گیاهی بسیار مشابه به حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش است، به‌طوری‌که رخداد شناخته‌شده و متغیرهای محیطی متعدد به‌ترتیب در مدل توزیع هدف و روش مدل‌سازی نقش دارد. مدل‌های یادشده که به‌منظور مدل‌سازی توزیع گونه‌های گیاهی

نیازمند عوامل محیطی مربوط به وقوع زمین‌لغزش و مدل‌های پیش‌بینی کمی است.

در این خصوص، الگوریتم حداکثر آنتروپی مدلی است که به‌منظور پیش‌بینی احتمال پراکنش ناشناس گونه‌های گیاهی با استفاده از داده‌های وجود ارائه شد (Phillips et al., 2006). این مدل برای بررسی پراکنش گونه‌های گیاهی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته (Pineda and Lobo 2009; Tinoco et al. 2009) و با عملکرد رقابتی در برخی مطالعات، با استفاده از هر دو داده وجود و عدم وجود مورد مقایسه قرار گرفته است (Elith and Graham, 2009). نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش را می‌توان به‌عنوان یک مدل در نظر گرفت که تنها با داده‌های وقوع، اقدام به پیش‌بینی می‌کند، چراکه تنها داده‌های در دسترس، زمین‌لغزش‌های رخ داده در گذشته است. علی‌رغم پتانسیل بالقوه مدل حداکثر آنتروپی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، مطالعات اندکی به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش از این الگوریتم بهره گرفته‌اند (Felicísimo et al., 2012; Vorpahl et al., 2012). علاوه بر این، در این مطالعات بدون بررسی جنبه تئوری یا عملی کاربرد مدل‌سازی حداکثر آنتروپی در تجزیه و تحلیل حساسیت‌پذیری زمین

¹Likelihood Ratio

²Weights of Evidence

³Machine Learning Algorithms

⁴Boosted Regression Trees

⁵Random Forests

در محل قله کسری در ارتفاعات جنوبی حوضه و حداقل ارتفاع ۱۳۷۵ متر در نقطه خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع شده است (شکل ۱). الف). خیاو چای رودخانه اصلی حوضه بوده و به دلیل وقوع لغزش‌های متعدد کنار آبراهه‌ای جزء رودخانه‌های پرخطر به لحاظ وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای محسوب شده که تهدیدی بالفعل برای منابع طبیعی و ساکنین منطقه محسوب می‌شود.

پردازش و گردآوری اطلاعات

این بررسی، بر اساس مجموعه داده‌های حاصل از سامانه اطلاعات جغرافیایی صورت گرفت که شامل موقعیت زمین لغزش‌ها و عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش است. بارندگی به عنوان عامل اصلی و شروع کننده و عوامل شیب، جهت، ارتفاع، سنگ شناسی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی و انحنای سطح به عنوان فاکتورهای محیطی مورد استفاده قرار گرفتند. از بین ۱۰ لایه اطلاعاتی به غیر از دو لایه کاربری اراضی و سنگ شناسی که لایه‌های طبقه‌ای^۶ را شامل می‌شوند، بقیه لایه‌ها ماهیت پیوسته^۷ دارند. به منظور تولید و نمایش لایه‌های اطلاعاتی یاد شده، از نرم افزار Arc GIS 10.2 استفاده شد (شکل ۲). همچنین، برای انجام تجزیه و تحلیل وزن‌ها، تمام لایه‌های برداری (.shp) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به لایه‌های رستری تبدیل شد. در محیط Arc Map، درصد مساحت هر کلاس از هر عامل محاسبه شده و تعداد زمین لغزش‌های موجود در آن‌ها مورد شمارش قرار گرفت. با توجه به این که مقیاس‌های متفاوتی از لایه‌های مورد بررسی وجود دارد که به ماهیت و نحوه تهیه آن‌ها مرتبط است، در این تحقیق، تمامی لایه‌ها، حاوی ۲۸۱۰۷۶ پیکسل با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بوده که منطقه‌ای با وسعت تقریبی ۱۲۶ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرند.

لغزش، تنها به مقایسه این الگوریتم با سایر مدل‌ها پرداخته شده است.

Kornejajyl و همکاران (۲۰۱۷) مدل حداکثر آنتروپی را برای ارزیابی حساسیت به لغزش در حوزه آبریز زیارت واقع در استان گلستان به کار بردند که با تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، نتیجه را خوب ارزیابی نمودند.

Davis و Blesius (۲۰۱۵) با مقایسه مدل‌های فیزیکی و حداکثر آنتروپی در کالیفرنیا به نتایج قابل قبول و منطقی‌تر مدل حداکثر آنتروپی رسیدند. بررسی‌های فوق نشان می‌دهد، کاربرد مدل حداکثر آنتروپی نسبت به سایر مدل‌ها غالباً بهتر و نتایج کاربردی‌تر بوده است. به طور کلی می‌توان مطرح نمود، گرچه تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی حساسیت پذیری اراضی به لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی انجام نشده، ولی تحقیقات انجام شده غالباً استفاده از این مدل را کارا و قابل قبول دانسته‌اند.

هدف اصلی از این بررسی، بررسی پتانسیل و کاربرد الگوریتم حداکثر آنتروپی در تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش است، که پس از بررسی مختصر از نحوه مدل سازی حداکثر آنتروپی، مراحل ویژه تجزیه و تحلیل عوامل مختلف ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز خیاو چای به وسعت تقریبی ۱۲۶۰۰ هکتار، در حاشیه غربی کوه سبلان، در جنوب شهرستان مشکین شهر قرار دارد. این منطقه، از نظر تقسیمات سیاسی بخشی از استان اردبیل و از لحاظ تقسیمات جاماب از زیر حوزه‌های آبخیز خزر محسوب می‌شود که با هشت زیرحوضه در محدوده جغرافیایی ۳۸° ۳۷' ۴۷" تا ۱۸° ۴۸' ۴۷" طول شرقی و ۳۸° ۱۱' ۵۰" تا ۳۸° ۲۳' ۵۶" عرض شمالی، با حداکثر ارتفاع ۴۵۶۰ متر از سطح دریا

⁶ Categorical Data

⁷ Continuous Data

نقشه پراکنش زمین لغزش

نقشه پراکنش زمین لغزش منطقه از طریق بررسی های میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره ای لندست ۷ و ۸ تهیه شد (شکل ۱. ب). در نیمه اول سال ۱۳۹۲ بررسی های میدانی تکمیل و ۵۵ مورد زمین لغزش کم عمق شناسایی شد. با توجه به اینکه شناسایی تمامی زمین لغزش ها در بررسی های میدانی دشوار بوده و همواره تعدادی از زمین لغزش ها در نقاط دورافتاده و صعب العبور رخ می دهند که از نظر دورمانده و امکان ثبت آنها وجود ندارد، به همین دلیل با مراجعه به نرم افزار Google Earth و تفسیر تصاویر ماهواره ای مربوط به ماه سپتامبر سال ۲۰۱۳ لندست تعداد ۱۹ زمین لغزش دیگر به مجموع زمین لغزش های تحت مطالعه اضافه شد.

نقشه جهت

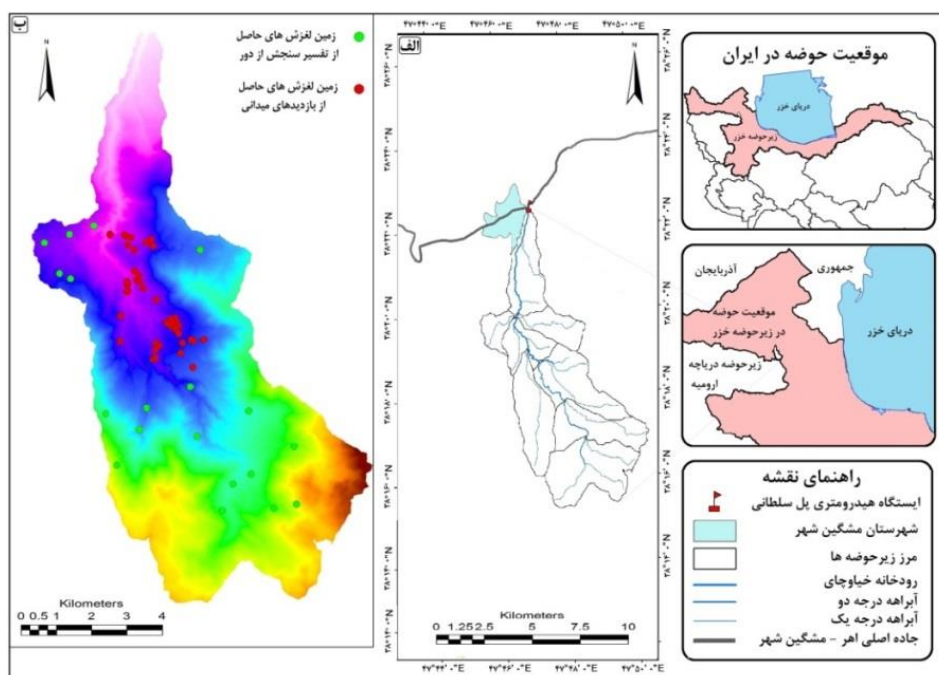
عامل جهت بر عوامل دیگری مانند هوازادگی، شرایط آب و هوا، پوشش اراضی و خاک تأثیرگذار بوده که از عوامل مهم در آماده سازی نقشه حساسیت پذیری است (Meinhardt et al., 2015; Zhang et al., 2016). جهت از مدل رقومی ارتفاع در محیط Arc GIS 10.2 و با استفاده از الحاقی Spatial Analyst Tools تهیه و سپس در هشت کلاس گروه بندی شد (شکل ۲. الف): شمال، شمال شرق، شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، غرب و شمال غرب. بیشترین تعداد زمین لغزش در جهات شمال شرق و شمال به ترتیب با تعداد ۲۲ و ۱۶ عدد مشاهده شد.

نقشه کاربری اراضی

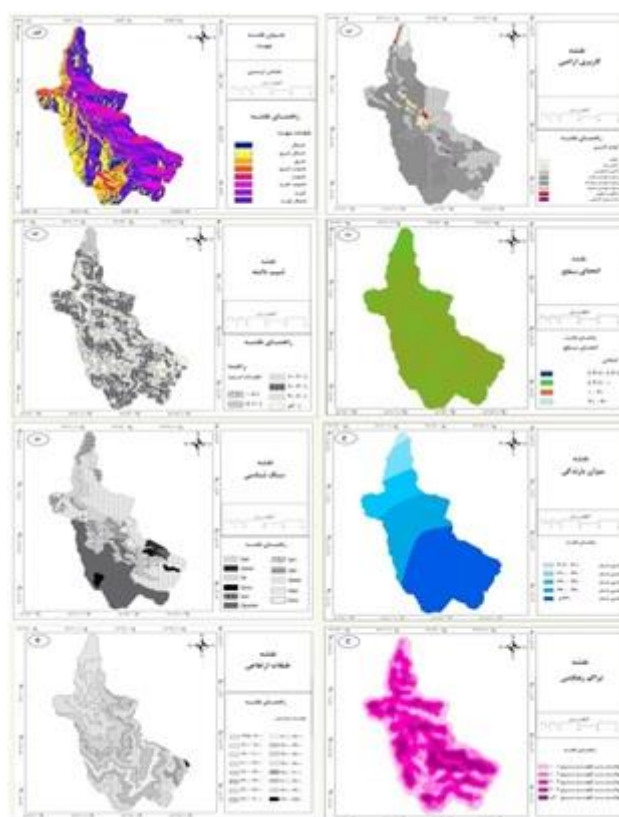
کاربری اراضی به عنوان یک عامل مهم در حساسیت پذیری زمین لغزش های کم عمق به طور گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است (Zhang et al., 2016; Trigila et al., 2015). به منظور تهیه لایه کاربری اراضی از تصویر ماهواره ای اخذ شده از سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا مربوط به ماهواره

لندست ۸، سپتامبر سال ۲۰۱۳ و از باندهای با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. بدین منظور، در نرم افزار ENVI ابتدا تطابق هندسی با استفاده از ۳۲ نقطه کنترل زمینی و با میانگین خطای مربعات ۰/۴۲ بر روی تصویر اعمال شد. در مرحله بعد با توجه به کوهستانی بودن منطقه تصحیح اتمسفری بر روی تصویر انجام شد. سپس با ترکیب باندهای قرمز (۴)، سبز (۳) و آبی (۲)، تصویری با رنگ های طبیعی به دست آمد، در محیط نرم افزار ENVI، با انتخاب مناطق انتخابی متغیر از هر کدام از کاربری ها با استفاده از روش حداکثر احتمال از سامانه طبقه بندی نظارت شده به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب کاپا و صحت کلی (به ترتیب ۰/۸۳ و ۹۱/۲ درصد)، اقدام به تفکیک کاربری های مختلف از یکدیگر شد.

پس از جداسازی کاربری مرتع از سایر کاربری ها، با استفاده از باند ۵ تصویر یاد شده (با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) مراتع منطقه مطالعاتی به لحاظ تراکم پوشش و بر اساس استانداردهای سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری کشور به سه دسته مراتع ضعیف (R_4)، متوسط (R_3) و خوب (R_2) تفکیک شد. به منظور بررسی صحت این تفکیک، با فراخوانی تعداد ۳۰ نقطه از نقاط واقعی زمینی، که در بازدیدهای مکرر میدانی و با استفاده از نقاط مختلف مراتع منطقه برداشت شده بود مورد مطابقت قرار گرفت و صحت تفکیک مورد تأیید قرار گرفت. پس از تهیه نقشه کاربری با مراجعه مجدد به منطقه مطالعاتی نسبت به تدقیق مرز کاربری ها و به ویژه مراتع تفکیک شده اقدام شد. هفت نوع کاربری تشخیص داده شده در حوضه شامل: باغات، مناطق مسکونی، اراضی بایر، اراضی کشاورزی، مراتع با پوشش ضعیف، مراتع با پوشش متوسط و مراتع با پوشش گیاهی قوی است (شکل ۲. ب). بیشترین تعداد زمین لغزش در مراتع با وضعیت پوشش خوب و اراضی بایر به ترتیب با تعداد ۳۰ و ۲۰ عدد مشاهده شد.



شکل ۱. الف) نمایی از منطقه تحت مطالعه و ب) پراکنش زمین لغزش در حوزه آبخیز خیاوچای



شکل ۲. خروجی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش

نقشه شیب

پارامترهای مهندسی شامل نوع سنگ، ساختار فیزیکی و سن زمین‌شناسی در قالب ۱۱ نوع واحد سنگی طبقه‌بندی شد (شکل ۲. ث: ۱) واحد Q_1^{al} ، آبرفت‌های جوان (۲) واحد Q_2^l ، پادگانه‌های آبرفتی جوان (۳) واحد Q^{mo} ، رسوبات یخچالی (۴) واحد Q_1^{la} ، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (۵) واحد Q^l ، نهشته‌های لاهار (۶) واحد Q_{s2}^d ، گدازه و گنبد‌های داسیتی- ریوداسیتی (۷) واحد Q_{sl}^{pad} ، آندزیت- داسیت پورفیری (۸) واحد Q_{sl}^{ta} ، تراکی آندزیت- تراکیت پورفیری (۹) واحد Q_{sl}^l ، گدازه‌های آندزیتی (۱۰) واحد Q^{vb} ، جریان‌های گدازه و گدازه‌های برشی تراکی آندزیتی- تراکی بازالتی و فونولیتیکی (۱۱) واحد Q_{VL} ، لاتیت. بیشترین تعداد زمین‌لغزش در پادگانه آبرفتی جوان با تعداد ۲۸ عدد مشاهده شد.

نقشه بارندگی

بارندگی یکی از عوامل بسیار مهم در راه‌اندازی و تسریع زمین‌لغزش محسوب می‌شود و توزیع زمانی و مکانی آن اغلب به‌عنوان موضوع اصلی در شروع زمین- لغزش است (Duc, 2012). منحنی‌های هم‌باران سالانه بر اساس آمار ۲۰ ساله ۹ ایستگاه باران‌سنجی، با استفاده از مدل دایره‌ای روش کریجینگ معمولی به دلیل داشتن حداقل ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($RMSE = 61/24$) و با استفاده از الحاقی *Geostatistical Analyst* در محیط نرم‌افزار *Arc GIS 10.2* تهیه و سپس در قالب پنج کلاس: ۳۱۰ - ۳۰۶، ۳۲۰ - ۳۱۰، ۳۳۰ - ۳۲۰، ۳۴۰ - ۳۳۰ و ۳۳۰ < ۳۴۰ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۲. ج). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در کلاس ۳۴۰ - ۳۳۰ میلی‌متر با تعداد ۲۸ عدد مشاهده شد. در این تقسیم‌بندی، سعی شده با تعیین فواصل کمتر، دقت مطالعه افزایش یابد. همچنین، تقسیم‌بندی فوق در مناطق مختلف می‌تواند متفاوت باشد.

نقشه ارتفاع

با توجه به ارتباط نزدیک زمین‌لغزش با ارتفاع (Zhu et al., 2014; Meinhardt et al., 2015)، مدل رقومی

افزایش شیب دامنه باعث افزایش حجم و وزن نسبی توده لغزشی بر واحد سطح صفحه لغزش می‌شود و نیروی محرک زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد. عامل شیب یکی از مهم‌ترین فاکتورها در توده مخرب است که به‌صورت مکرر در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang et al., 2016; Meinhardt et al., 2015). نقشه شیب مشابه عامل جهت تهیه و در قالب شش کلاس: ۵ - ۰، ۱۰ - ۵، ۲۰ - ۱۰، ۴۰ - ۲۰، ۶۰ - ۴۰ درصد و بزرگ‌تر از ۶۰ درصد طبقه‌بندی شد (شکل ۲. پ). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در کلاس بزرگ‌تر از ۶۰ درصد با تعداد ۳۹ عدد مشاهده شد.

نقشه انحناى سطح

به‌طور خاص انحناى دامنه اشتقاق خط عمود از حداکثر شیب در راستای جهت دامنه است که امکان برجسته نمودن همگرایی (انحنای مقعر) و واگرایی (انحنای محدب) جریان آب را فراهم می‌آورد (Trigila et al., 2015). انحناى سطح دارای دامنه‌ای از اعداد منفی، صفر و مثبت بوده، که منفی حاکی از حالت تقعر دامنه، مثبت نشانگر تحدب دامنه و صفر مسطح بودن دامنه را نشان می‌دهد. عامل انحناى دامنه با استفاده از روش زونبرگر- تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط *ArcGIS 10.2* در قالب چهار کلاس: $(-20) - (-42)$ ، $0 - (-20)$ ، $20 - 40$ و $40 - 20$ تهیه شد (شکل ۲. ت). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در کلاس $0 - (-20)$ با تعداد ۴۵ عدد مشاهده شد.

نقشه سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی منطقه نقش بسیار مهمی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش ایفا می‌کند (Zhang et al., 2016; Meinhardt et al., 2015). زیرا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف در ناپایداری دامنه و وقوع زمین‌لغزش متفاوت عمل می‌کند. این فاکتور بر اساس

به منظور ممانعت از توزیع احتمال (π) استفاده شد. میانگین مقادیر عوامل مؤثر در تمام موقعیت‌های وجود تعریف شد. برای مثال، ارزش شیب مورد انتظار از توزیع پیش‌بینی شده باید نزدیک به مقدار شیب متوسط از تمام موقعیت‌های وجود باشد. با به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی توزیع یکنواختی از میان بسیاری از توزیعات ممکن انتخاب شد (Dudik and Phillips, 2008).

در این بررسی، بیشتر نقطه نظرات شاخصی از الگوریتم حداکثر آنتروپی مدنظر است که توسط Phillips و همکاران، (2006)؛ Dudik و Phillips، (2008)؛ Elith و همکاران، (2011) به منظور پیش‌بینی در مدل‌سازی ارائه شده است. چنانچه x مکانی تصادفی در کل منطقه تحت مطالعه باشد، $\pi(x)$ مقدار توزیع احتمالی هدف در هر موقعیت x است که غیر منفی بوده و جمعاً برابر یک است. اگر $y = 1$ حاکی از وقوع هدف باشد، همچنین، با توجه به هدف حاضر چنانچه $P(x|y=1) = \pi(x)$ باشد به عنوان احتمالی است که در موقعیت x شناسایی شده است. احتمال اینکه هدف وجود در موقعیت x باشد، حاکی از $P(y=1|x)$ است، که با استفاده از $P(x|y=1)$ بیان شده و به وسیله کاربرد قانون Bayes در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$P(y=1|x) = \frac{P(y=1)P(x|y=1)}{P(x)} = \frac{P(y=1)\pi(x)}{1/|X|} \quad (1)$$

که در آن: $P(y=1)$ میزان رواج وقوع هدف و $|X|$ تعداد پیکسل‌ها یا موقعیت‌های موجود در کل منطقه است. $P(y=1) = 1$ تنها با اکتفا به داده‌های وقوع قادر به تعیین دقیق نیست؛ بنابراین در الگوریتم حداکثر آنتروپی، $\pi(x)$ در رابطه (۱) به جای پیش‌بینی مستقیم $P(y=1|x)$ با استفاده از داده‌های وقوع مدل‌سازی صورت پذیرفته است.

با توجه به بحثی که توسط Phillips و همکاران (۲۰۰۶) صورت پذیرفت، $\pi(x)$ با استفاده از مبنای الگوریتم حداکثر آنتروپی که برابر با توزیع احتمالاتی

ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از سازمان نقشه برداری کشور تهیه و نقشه ارتفاع در قالب ۱۶ کلاس طبقه‌بندی شد. با توجه به وجود اختلاف ارتفاع بالای منطقه از ۱۳۷۵ تا ۴۵۶۰ متر، کلاس‌های ارتفاعی با اختلاف ارتفاع ۲۰۰ متر شکل گرفت (شکل ۲. چ). نزدیک به ۸۵ درصد از زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده در منطقه در محدوده ارتفاعی ۱۶۰۰ تا ۲۴۰۰ متر رخ داده‌اند که بیشترین تعداد زمین‌لغزش در کلاس ۲۲۰۰ - ۲۰۰۰ متر با تعداد ۳۱ عدد مشاهده شد.

نقشه تراکم زهکشی

تراکم زهکشی، عبارت است از نسبت طول کل آبراه‌ها به مساحت حوزه آبریز. هر چه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد (Yalcin, 2008). عامل مهمی که پایداری دامنه را تحت کنترل دارد درجه اشباع مواد روی دامنه است. شبکه آبراه‌ها با فرسایش کناری و یا اشباع بخش تحتانی دامنه اثر معکوسی بر پایداری دامنه دارند (Yalcin, 2005). شبکه آبراه‌ها در محیط ArcGIS 10.2 و با استفاده از الحاقی Spatial Analyst Tools تهیه و سپس در قالب پنج کلاس: ۱ - ۰، ۲ - ۱، ۳ - ۲، ۴ - ۳ و بزرگ‌تر از چهار کیلومتر بر کیلومتر مربع طبقه‌بندی شد (شکل ۲. ح). بیشترین تعداد زمین‌لغزش در کلاس ۳ - ۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع با تعداد ۲۹ عدد مشاهده شد. تقسیم‌بندی فوق، برای این منطقه با توجه شرایط این حوزه انتخاب شده و در شرایط دیگر می‌تواند با توجه به ویژگی‌های هر منطقه متغیر باشد.

روش پژوهش

مبنای الگوریتم حداکثر آنتروپی^۱

هدف از مدل‌سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی در این تحقیق، تعیین توزیع احتمال (π) از وقوع موقعیت کل مجموعه X ‌های موجود در منطقه است. عوامل مؤثر

¹ Maximum Entropy

زمین‌لغزش، تنظیمات بهینه بر مبنای ارزیابی متقابل به-وسیله پیش‌بینی عملکرد اندازه‌گیری‌ها انجام شد. با استفاده از تنظیمات بهینه، نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش برای کل منطقه قابل‌تولید بوده و روابط بین فاکتورهای مؤثر ورودی و حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش قابل تفسیر است. به‌منظور پیش‌بینی عملکرد الگوریتم حداکثر آنتروپی نیز از مقایسه سطح زیر منحنی ROC استفاده شد. منحنی ROC، به‌منظور سنجش صحت مشخصه آزمون که مشابه به میزان پیش‌بینی و موفقیت است، استفاده شده است (Meinhardt et al., 2015). تفسیر این منحنی، از طریق محاسبه سطح زیر منحنی^۲، (ناحیه بین محور افقی و منحنی ROC) انجام می‌گیرد. بدین‌منظور نتایج ارزش‌های حساسیت‌پذیری از کل منطقه مطالعاتی در بین محور X به‌صورت نزولی مرتب‌شده و در برابر وقوع تجمعی زمین‌لغزش در محور Y ترسیم می‌شود (Bui et al., 2011). محدوده ارزشی AUC بین ۰/۵ و ۱ بوده که ارزش بیشتر از ۰/۵ به مفهوم قبول مدل است. هر چه شیب منحنی تندتر باشد، درصد بالایی از ناحیه زیر منحنی قرار می‌گیرد که حاکی از بهتر بودن پیش‌بینی است. مقدار AUC برابر با ۰/۹ یک مدل بسیار خوب را معرفی می‌کند که در آن ۹۰ درصد از زمین‌لغزش‌ها در ۱۰ درصد از منطقه که بالاترین حساسیت را دارند اتفاق می‌افتد (Lee and Talib, 2005)

تنظیمات بهینه

بخش عمده اطلاعات زمین‌لغزش‌های رخ داده در گذشته در دسترس بودند و در طول روش مدل‌سازی داده‌ها و نمونه‌های زمینه مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های زمینه که در تمام موقعیت‌ها به‌عنوان نقاط تصادفی داخل منطقه تعریف شده به‌منظور مقایسه تفاوت‌های احتمالی بین مکان‌های وقوع از سایر مکان‌ها (به‌عنوان مثال، موقعیت‌های زمینه) استفاده شد (Phillips

گیبس^۱ است، به‌عنوان یک توزیع نمایی ابراز شد. اگر مشخصه‌های n به‌صورت $(f_i, I = 1, \dots, n)$ در نظر گرفته شود، توزیع احتمالاتی گیبس به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{\lambda}(x) = \frac{\exp(\sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x))}{Z_{\lambda}} \quad (2)$$

که در آن: Z_{λ} یک عدد ثابت نرمال شده بوده که اطمینان می‌دهد مجموع $q_{\lambda}(x)$ برابر یک است و λ بردار اوزان اختصاص‌یافته به مشخصه‌ها است. در طی پیش‌بینی $q_{\lambda}(x)$ ، الگوریتم حداکثر آنتروپی سعی در شناسایی نزدیک‌ترین توزیع به موانع با استفاده از I_1 به‌منظور ساماندهی برای جلوگیری از تناسب مفرط است. بنابراین، اهداف الگوریتم حداکثر آنتروپی یافتن توزیع گیبس با حداکثر سازی لگاریتم حداکثر احتمال در موقعیت نامساعد است. اگر m تعداد وقوع در منطقه مطالعاتی وجود داشته باشد، اختلاف بین لگاریتم حداکثر احتمال و ساماندهی باید حداکثر سازی شده باشد (Phillips and Dudi'k, 2008). که به‌صورت رابطه (۳) نشان داده می‌شود:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \ln(q_{\lambda}(x_i)) - \sum_{j=1}^n \beta_j |\lambda_j| \quad (3)$$

که در آن: β_j پارامتر ساماندهی برای j زمین مشخصه f_j است. در رابطه (۳) لگاریتم شروع با حداکثر احتمال بوده که تناسب مدل را برای بهبود داده‌ها افزایش می‌دهد. دومین گام در رابطه (۳) به‌منظور ساماندهی استفاده شده است. درنهایت، مدل حداکثر آنتروپی توزیع گیبس را شناسایی می‌کند که تنها تناسب برای داده‌های وقوع نیست اما به‌خوبی قابل استنتاج است (Elith et al., 2011).

روش‌های تولید نقشه برای حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش همانند سایر مدل‌های یادگیری ماشینی، الگوریتم حداکثر آنتروپی نیز نیازمند برخی روش‌های بهینه‌سازی است. بنابراین، پیش از تولید نقشه حساسیت‌پذیری

² Area Under the Receiver Operator Curve (AUC)

¹ Gibbs

حذف شده قابل آزمون است. منحنی پاسخ^۳ نیز به منظور استنتاج روابط بین هر عامل مؤثر و مدل پیش‌بینی استفاده شد. در مرحله آخر اقدام به صحت‌سنجی نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده با الگوریتم حداکثر آنتروپی با استفاده از سطح زیرمنحنی ROC شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و به کمک نرم‌افزار MAXENT نواحی دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گرفت و زمین‌لغزش‌هایی که به منظور آموزش مدل انتخاب شده بود، به عنوان نقاط وقوع به مدل معرفی شد. در این روش همبستگی فاکتورهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با نقاط وقوع (زمین‌لغزش‌های رخ داده) محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به عنوان نقاط زمینه^۴ یا شبه عدم وقوع^۵ مقایسه می‌شود و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان نقاط وقوع زمین‌لغزش و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد. در نهایت مدلی به دست می‌آید که دارای بیشترین قدرت تشخیص در مناطقی با پتانسیل بالای وقوع (مناطق دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالا به زمین‌لغزش) است. از آنجاکه یافتن نقاط عدم وقوع (مناطق دارای پتانسیل حساسیت‌پذیری کم) و اطمینان از این عدم وقوع مشکلات زیادی در مطالعات در پی دارد. استفاده از مدل MAXENT به عنوان یک روش منحصراً وابسته به نقاط وقوع، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم وقوع شود (Phillips et al., 2006).

در پژوهش حاضر، نقاط وجود با فرمت (CSV) و همچنین لایه‌های مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با فرمت (ASCII) آنالیز شدند. همچنین، از سطح زیرمنحنی ROC به عنوان معیاری از عملکرد مدل

اگر تعداد نمونه‌های زمینه استفاده شده برای مدل‌سازی بیش از حد کم باشند، ممکن است تشخیص مناسبی از مکان‌های وقوع زمین‌لغزش از دیگر مکان‌های زمینه صورت نپذیرد. برعکس، استفاده بیش از اندازه از نمونه‌های زمینه (به عنوان مثال، مجموع داده‌های کامل از کل منطقه مطالعه) موجب اتلاف زمان در فرآیند غیرضروری می‌شود. در این مطالعه، مقایسه عملکرد پیش‌بینی مدل مطابق با تعداد متنوعی از نمونه‌های زمینه^۱ برای نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش صورت پذیرفت. ۱۴ نوع زمینه متفاوت برای مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت: ۴۲، ۸۰، ۱۶۰، ۳۲۰، ۶۴۰، ۱۲۸۰، ۲۵۶۰، ۵۱۲۰، ۱۰۲۴۰، ۲۰۴۸۰، ۴۰۹۶۰، ۸۱۹۲۰، ۱۶۳۸۴۰ و ۲۸۱۰۰۰. ۴۲ نمونه زمینه مطابق با تعداد لغزش‌های رخ داده در گذشته است که به عنوان اولین نمونه زمینه انتخاب شد سپس با در نظر گرفتن یک تصاعد هندسی نمونه‌های مختلفی از زمینه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه زمینه نهایی معادل با ۲۸۱۰۰۰ در نظر گرفته شد که مشابه با اندازه کل منطقه مطالعاتی (۲۸۱۰۷۶) است.

آنالیز فاکتور توزیع، حساسیت‌پذیری و صحت

پیش از تنظیمات بهینه، نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش تهیه و تفاسیر مربوط به نتایج انجام شد. علاوه بر این، آنالیز عامل توزیع بر روی نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش نیز انجام شد. فن جک نایف^۲ به منظور تخمین عامل توزیع در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در این رویکرد، به صورت چرخشی هر عامل به صورت آگاهانه از گردونه مدل‌سازی حذف شده و با استفاده از بقیه فاکتورها مدل ساخته می‌شود. سپس، عملکرد پیش‌بینی مدل ایجاد شده با استفاده از تمام عوامل با مدل ساخته شده از بقیه عوامل مقایسه می‌شود. در نتیجه، توزیع عامل

³ Response Curves

⁴ Background Location

⁵ Pseudo-absence Location

¹ Background Samples

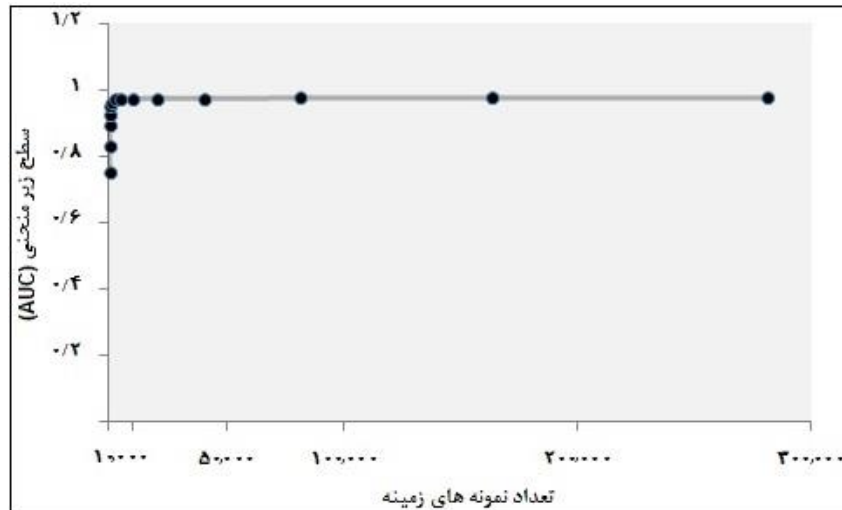
² Jackknife

نتایج و بحث

تنظیم بهینه

نتایج مربوط به تأثیر تعداد نمونه‌های زمينه در شکل (۳) ارائه شده است. آزمون نمونه‌های زمينه نشان داد زمانی که تعداد نمونه‌ها بیش از ۱۰۰۰۰ باشد، عملکرد پیش‌بینی مدل به روند ثابتی می‌رسد که بالاترین مقدار سطح زیرمنحنی را نشان می‌دهد (۰/۹۷۶). کمترین تعداد نمونه زمينه (۷۴) برابر با تعداد زمين لغزش‌های رخ داده در گذشته) بدترین عملکرد پیش‌گويانه را داشته که دليل اين موضوع پايين بودن تعداد نمونه‌های زمينه است که توانایی ارائه زمينه محيطي صحيحی برای مقايسه با خصوصيات موقعيت‌های زمين لغزش را ندارد (۰/۷۵۰). در مطالعه حاضر در طول دوره فرآيند مدل‌سازی، تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه زمينه، به‌عنوان بهترین تعداد انتخاب شد.

به‌دست‌آمده در تشخیص نقاط وقوع (مناطق با حساسیت‌پذیری بالا) از نقاط شبه عدم وقوع استفاده شد. در این مطالعه با استفاده از بازديد‌های مکرر میدانی و نیز با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای مربوط به منطقه مطالعاتی، نقشه پراکنش زمين لغزش تهیه شد و پس از انجام بررسی-های لازم بر روی زمين لغزش‌های ثبت‌شده، از بين تعداد ۷۴ زمين لغزش رخ داده به نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد در آموزش و آزمون مدل، با ثبت مختصات وقوع اقدام به تهیه لایه‌های آموزش و آزمون شد. پس از وارد کردن نقاط انتخابی و متغیرهای موردنظر در نرم‌افزار MAXENT پتانسیل کل منطقه برای پتانسیل‌یابی حساسیت‌پذیری زمين لغزش محاسبه و نقشه حاصل با فرمت رستری به نرم‌افزار ArcGIS 10.2 منتقل و به‌صورت نقشه حساسیت‌پذیری زمين لغزش تهیه شد.



شکل ۳. مقایسه عملکرد پیش‌گويانه (مقادیر AUC) برای تعداد مختلفی از نمونه‌های زمينه

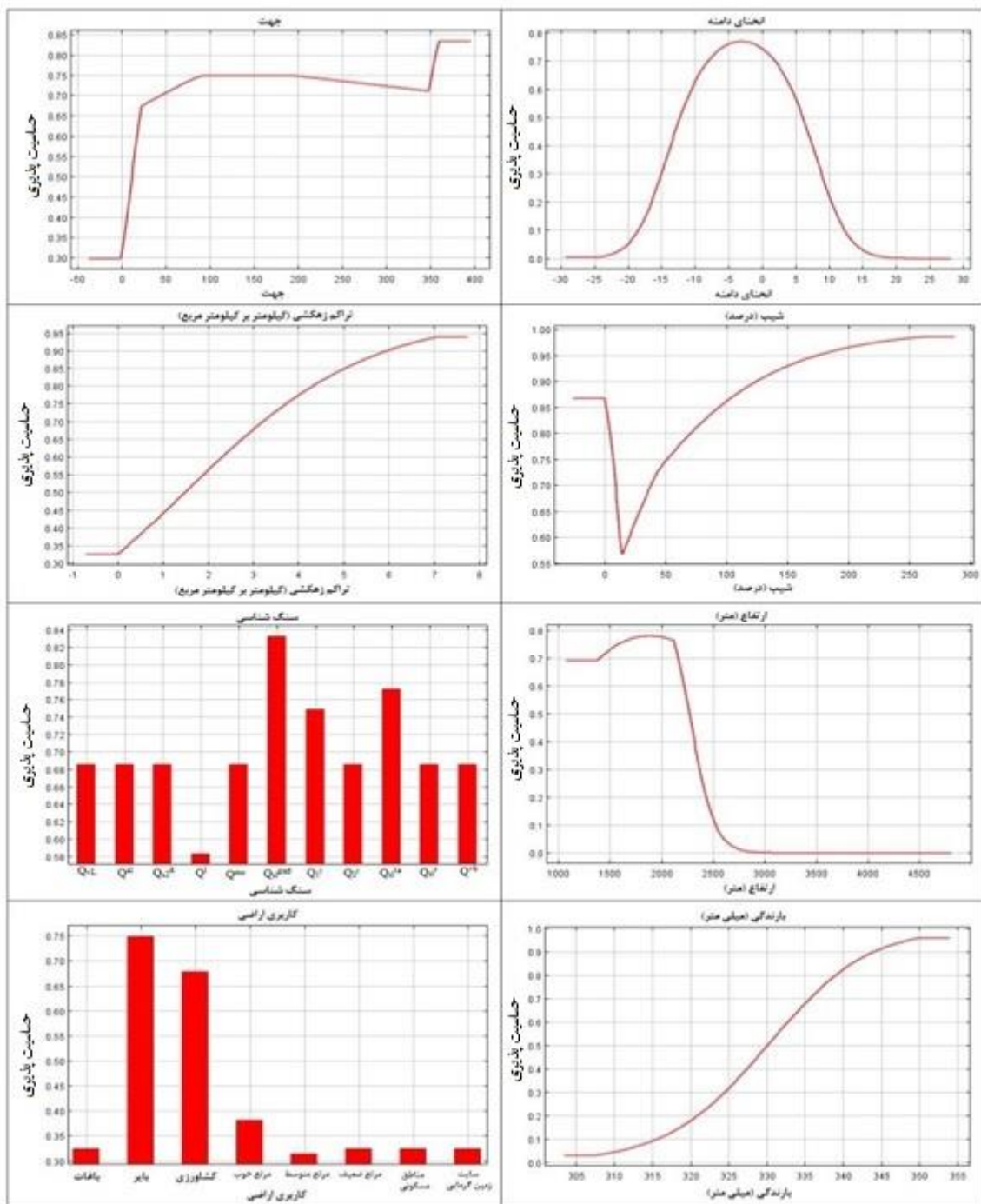
کیلومتر بر کیلومترمربع است، زمين لغزش بیشتری نیز اتفاق افتاده است. همچنین، در دامنه‌های رو به شمال با شیب بالای ۶۰ درصد که با کمی تقعر همراه است و از نظر سنگ‌شناسی با پادگانه آبرفتی قدیمی و جوان و آندزیت - داسیت پورفیری پوشیده شده، حساسیت واحدهای سنگی نسبت به فرسایش و وقوع زمين لغزش بالا است.

فاکتور توزیع

شکل (۴) منحنی‌های پاسخ را برای هشت فاکتور محرک و محيطي استفاده‌شده برای نقشه حساسیت‌پذیری زمين لغزش نشان می‌دهد. بیشترین تعداد زمين لغزش در محدوده ارتفاعی ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متری با میزان بارندگی بین ۳۳۰ تا ۳۴۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است. در مناطقی که اراضی بایر گسترش داشته و تراکم زهکشی بیش از چهار

حذف شده است، صورت می‌پذیرد. بیشترین کاهش نشان‌دهنده بالاترین اثر در بین فاکتورهای حذف شده است. به عبارتی فاکتوری که در زمان حذف بالاترین میزان کاهش را داشته باشد، بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی دارد.

نتایج آزمون با عناوین کاهش مقادیر AUC و درصد نسبی کاهش سطح زیرمنحنی (RD_i) در جدول (۱) ارائه شده که با مقایسه پیش‌بینی بر اساس تمامی فاکتورها، زمانی که یک فاکتور به صورت آگاهانه در روند مدل‌سازی



شکل ۴. منحنی‌های پاسخ برای فاکتورهای مؤثر

جدول ۱. نتایج آزمون جک نایف برای هر متغیر حذف شده از روند الگوریتم حداکثر آنتروپی

فاکتور حذف شده	کاهش AUC	درصد نسبی کاهش سطح زیر منحنی (RD _i)
ارتفاع	۰/۰۴۱	۴/۲۴
بارندگی	۰/۰۳۳	۳/۴۱
تراکم زهکش	۰/۰۲۹	۳/۰۰
جهت دامنه	۰/۰۲۳	۲/۳۸
انحنای دامنه	۰/۰۱۶	۱/۶۵
درصد شیب	۰/۰۱۱	۱/۱۴
سنگ شناسی	۰/۰۱۱	۱/۱۴
کاربری اراضی	۰/۰۰۶	۰/۶۲

افزایش رطوبت خاک دامنه‌ها شده و نهایتاً ناپایداری دامنه‌ها و وقوع زمین‌لغزش را به دنبال دارد.

در مورد عامل بارندگی نیز نتایج مشابهی به دست آمده است. با اینکه تعداد کلاس‌های این عامل بسیار کمتر از عامل طبقات ارتفاعی است اما کلاس بارندگی بیش از ۳۴۰ میلی‌متر بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی زمین‌لغزش دارد. این تغییرات تا ۳۵۰ میلی‌متر روند ثابتی را نشان می‌دهد. که بیشتر بخش میانی حوضه را تحت پوشش دارد. در خصوص عامل تراکم زهکشی نیز باید اذعان داشت با وجود پنج کلاس طبقه‌بندی برای این عامل، مناطق با تراکم زهکشی بالاتر از چهار کیلومتر بر کیلومتر مربع مؤثرترین طبقه در پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش است که تا هفت کیلومتر بر کیلومتر مربع ادامه داشته تا اینکه به روند ثابتی می‌رسد.

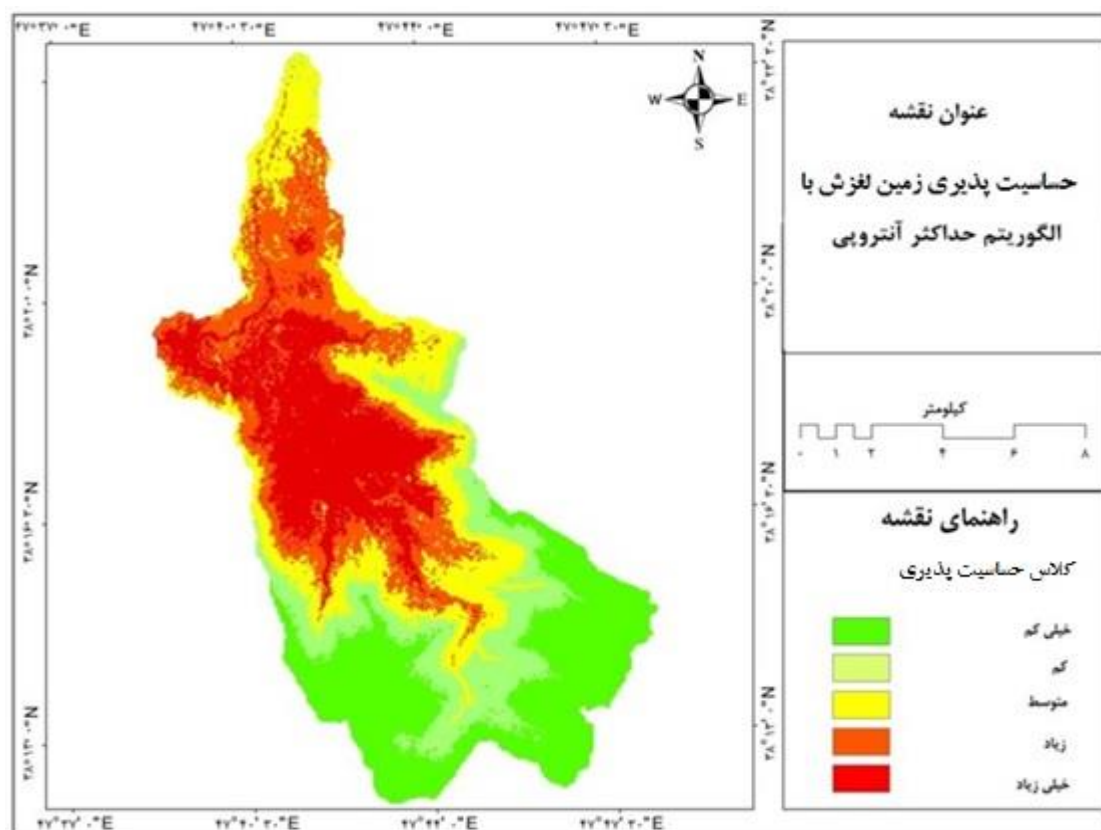
با این وجود، کم‌اهمیت بودن توزیع داده‌های طبقه‌ای به این مفهوم نیست که این داده‌ها برای تولید نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش بی‌فایده هستند. همان‌گونه که پیش‌تر نیز مطرح شد، تمامی فاکتورهای با مشخصه طبقه‌ای زمانی که با داده‌های پیوسته ترکیب می‌شوند در پیش‌بینی نهایی مدل‌سازی تأثیرگذار هستند. علاوه بر این، کلاس اصلی از دو عامل سنگ‌شناسی و کاربری اراضی که دارای بیشترین حساسیت نسبت به حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش است، تشکیل شده‌اند که به ترتیب عبارت‌اند از

مؤثرترین عواملی که بالاترین کاهش در مقدار AUC را داشته، ارتفاع بوده که در روند مدل‌سازی حذف شده است ($RD = 4/24\%$). نتایج مندرج در جدول (۱) را می‌توان از طریق منحنی‌های پاسخ مربوط به هر عامل در شکل (۴) تشریح نمود. در نقاطی از حوضه که فرسایش آبراه‌های گسترش دارد زمین‌لغزش‌های کنار آبراه‌های بسیاری رخ داده است. بنابراین، مکان‌های خیلی نزدیک به فرسایش‌های آبراه‌ای از دیگر نقاط جداسازی شده و بالاترین توزیع برای پیش‌بینی را به دست می‌دهد.

بعد از فاکتور ارتفاع که بالاترین تأثیر را در پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش دارد به ترتیب فاکتورهای بارندگی، تراکم زهکشی و جهت دامنه به عنوان فاکتورهای با مشخصه پیوسته نقش قابل‌توجهی در پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش دارند. به‌طورکلی، توزیع داده‌های با مشخصه پیوسته نسبت قوی‌تر از داده‌های با مشخصه طبقه‌ای است. می‌توان نتایج یادشده را در قالب کلاس‌های هر فاکتور نیز بیان نمود. عامل ارتفاع با توجه به اختلاف ارتفاع ۳۰۰۰ متری به ۱۶ کلاس تقسیم شده که طبقه ارتفاعی ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متری (محدوده ارتفاعی کمربند میانی حوضه) بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر دارد. محدوده ارتفاعی یادشده در منطقه مطالعاتی در مرز محدوده پیشروی یخچال‌ها قرار دارد که هر سال با گرم شدن هوا در فصل بهار باعث ذوب برف و

تولید نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش شد. که نقشه نهایی با انتقال به محیط Arc Map 10.2 در قالب پنج کلاس با حساسیت پذیری خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید آماده شد (شکل ۵)

واحدهای سنگی آندزیت-داسیت پورفیری و اراضی بایر. به خصوص در نواحی میانی حوضه که زمین لغزش‌های متعددی رخ داده، این موضوع بیشتر قابل تأمل است. در نهایت، با استفاده از ترکیبی از داده‌ها با مشخصه پیوسته و طبقه‌ای با تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه زمینه، اقدام به



شکل ۵. نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی

شمال و غرب گسترش دارند از حساسیت پذیری بالایی برخوردارند. مناطق با رخساره دامنه منظم با فرسایش سطحی کم به دلیل خاک‌زایی ناچیز که در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر گسترده شده‌اند از حساسیت پذیری کم تا خیلی کم برخوردارند.

تجزیه و تحلیل حساسیت پذیری زمین لغزش به پیش-بینی وقایع ناشناس آتی وابسته است. به منظور جلوگیری از خطر زمین لغزش، سودمند است برای نقشه حساسیت پذیری، تفسیر عملکرد پیش‌بینی صورت پذیرد.

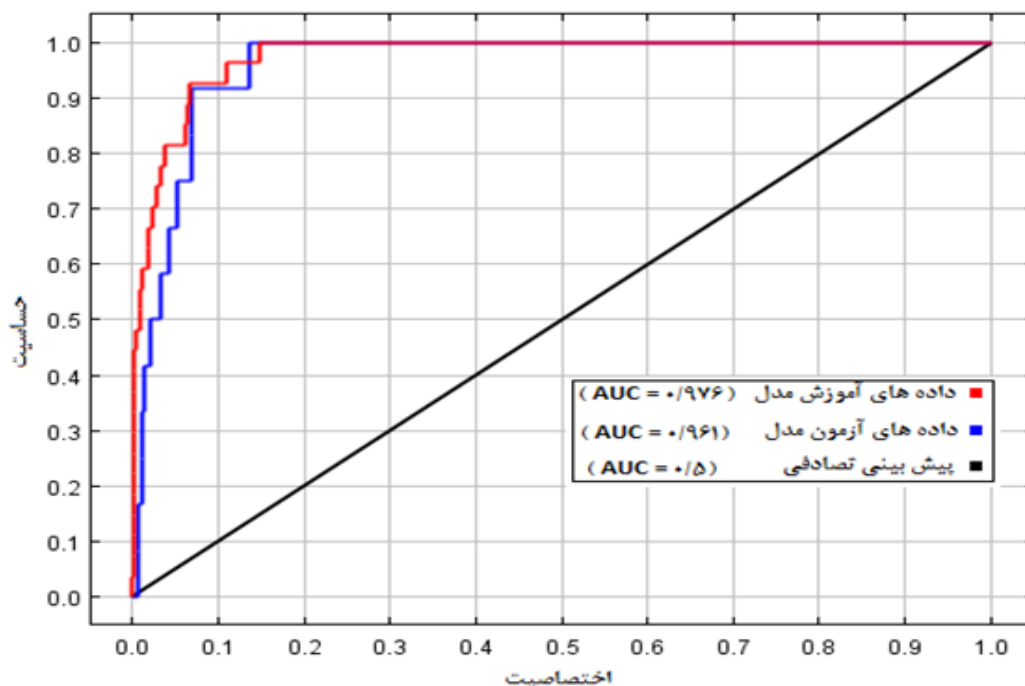
به دلیل اینکه هدف اصلی این پژوهش، نشان دادن سطوح حساسیت پذیری نسبی در منطقه مطالعاتی است از بصری سازی استفاده شد. در نقشه حساسیت پذیری زمین-لغزش، مناطق با حساسیت پذیری بالا در مناطق میانی حوضه که پادگانه آبرفتی قدیمی و جوان به همراه آندزیت-داسیت پورفیری که اراضی بایر و کشاورزی به همراه مراتع با پوشش گیاهی متوسط گسترش دارد، شناسایی شد. به طور کلی، مناطق با شیب تند که فرسایش آبراه‌های با تراکم زهکشی بالایی از آبراه‌ها در دامنه‌های رو به

همکاران (۲۰۱۴) نیز از این مدل در برآورد فرسایش یک حوزه آبخیز استفاده نموده و کارآئی آن را مورد تأیید قرار دادند. م

به طور کلی، سطح زیرمنحنی ROC برای آزمون مدل برابر با ۰/۹۶۱ به دست آمد که در مقایسه با مدل رگرسیون لجستیک ($AUC = 0/572$) که در مطالعه ای جداگانه در منطقه مورد مطالعه به کار برده شد، اختلاف قابل توجهی است. دلیل این امر مربوط به ماهیت مدل‌ها است، بطوریکه رگرسیون لجستیک شکل ویژه‌ای از مدل‌های ساماندهی شده خطی است که به منظور سنجش روابط خطی در یک فضای منطقی طراحی شده است. بنابراین ممکن است برای روابط غیرخطی مناسب نباشد. برعکس، الگوریتم حداکثر آنتروپی برای روابط پیچیده با استفاده از مشخصه‌های متنوع کارایی بالایی دارد.

منحنی نرخ پیش‌بینی که برای محاسبه مقدار AUC استفاده شده، به منظور تفسیر نقشه حساسیت‌پذیری در منطقه مطالعاتی با هدف پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های آینده استفاده شد. به منظور آزمون مدل‌سازی حداکثر آنتروپی، از روش صحت‌سنجی منحنی ROC استفاده شد. شکل (۶) نشان می‌دهد دقت الگوریتم حداکثر آنتروپی در پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش بسیار بالا است. این مدل در مقایسه کارایی نسبت فراوانی و حداکثر آنتروپی در تهیه نقشه مناطق مستعد سیل در استان گلستان مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل رضایت‌بخش بوده است (سیاه-کمری، ۱۳۹۴).

Blesins و Jerry (۲۰۱۵) مدل حداکثر آنتروپی برای پیش‌بینی حساسیت اراضی به زمین‌لغزش را مورد استفاده قرار داده و مناسب ارزیابی کرده‌اند. همچنین Pitchford و



شکل ۶. منحنی نرخ پیش‌بینی بر مبنای ارزیابی متقابل برای الگوریتم حداکثر آنتروپی

یک نقشه قابل اطمینان برای حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، داشتن چهارچوب تلفیقی از عوامل مؤثر محرک و محیطی مورد نیاز است. در این پژوهش کاربرد مدل‌سازی حداکثر

تولید نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش می‌تواند به عنوان گامی ابتدایی و مهم برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. به منظور تولید

نتیجه‌گیری

منحنی‌های پاسخ مشخص شد برخی از کلاس‌های اصلی مربوط به هر عامل طبقه‌ای از سایر کلاس‌های مربوطه، حساسیت‌پذیری بیشتری دارد. برای مثال، اکثر زمین‌لغزش‌ها در واحدهای سنگی پادگانه آبرفتی قدیمی و جوان و آندزیت-داسیت پورفیری اتفاق افتاده که در اراضی بایر و کشاورزی گسترش دارد.

از مقایسه با رگرسیون لجستیک، مشاهده شد که مدل حداکثر آنتروپی عملکرد بسیار بهتری دارد که دلیل این امر توانایی نامحدود الگوریتم حداکثر آنتروپی در سنجش روابط پیچیده خطی و غیرخطی در مقایسه با رگرسیون لجستیک است که توانایی سنجش روابط خطی در فضای منطقی را داراست که با نتایج Park (2015) کامل مطابقت دارد. به منظور افزایش کاربرد ویژه حساسیت‌پذیری زمین-لغزش باید بررسی‌های موردی دیگری با بررسی تعداد متفاوتی از زمین‌لغزش‌های رخ داده و یا تعداد زیادی داده صورت پذیرد. همچنین، باید مطالعه‌های موردی گسترده-ای شامل مقایسه کمی با دیگر مدل‌ها در آینده صورت پذیرد.

آنتروپی که به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی توزیع گونه‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته، اما برای بررسی کامل حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش بررسی نشده، مورد آزمون قرار گرفت. بر اساس مطالعه موردی در حوزه آبخیز خیاوچای، خصوصیات ویژه مدل‌سازی حداکثر آنتروپی برای تولید نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش نمایان شد. الگوریتم حداکثر آنتروپی توانایی مناسبی در ارتباطات همبسته یا غیرخطی بین داده‌های ورودی پیوسته با استفاده از انواع مشخصه‌های دیگر را دارد. برخلاف جعبه سیاه سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین از قبیل شبکه عصبی، الگوریتم حداکثر آنتروپی اطلاعات مفیدی را برای تفسیر فراهم می‌آورد. برای مثال، تجزیه و تحلیل فاکتور توزیع، نشان داد که فاکتور طبقات ارتفاعی به‌عنوان تأثیرگذارترین فاکتور در منطقه مطالعاتی است و پس از آن عامل بارندگی دومین عامل تأثیرگذار محسوب می‌شود. از بین دو عامل با مشخصه طبقه‌ای توزیع دو عامل سنگ-شناسی و کاربری اراضی بسیار کمتر از فاکتورهای با مشخصه پیوسته است. با این وجود، به دنبال تفسیر

منابع مورد استفاده

سیاه‌کمری، ص. ۱۳۹۴. مقایسه کارایی مدل‌های نسبت فراوانی و حداکثر آنتروپی در تهیه نقشه مناطق مستعد سیل (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مادرسو استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه لرستان. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. ص: ۱۶۸.

- Akgun, A. 2012. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*, 9(1), 93-106.
- Ballabio, C. and Sterlacchini, S. 2012. Support vector machines for landslide susceptibility mapping: the Staffora River Basin case study, Italy. *Mathematical geosciences*, 44(1), 47-70.
- Bui, D., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Nat. Hazards*, 59, 1413-1444.
- Chang-Jo, F.C. 2003. GIS-based data-driven geological data integration using fuzzy logic: theory and application. *Economic and Environmental Geology*, 36(3), 243-255.
- Davis, J. and Blesius, L. 2015. A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model. *Entropy in Hydrology*. 17(6), 4271-4292.
- Duc, D.M. 2012. Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh District, Binh Dinh Province, Vietnam. *Landslides*, 10, 219-230.
- Elith, J. and Graham, C. H. 2009. Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*, 32(1), 66-77.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudi K.M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Divers Distrib*, 17:43-57.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., and Catalano, E. 2007. Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology*, 89(1), 47-66.
- Jaynes, E.T. 1957. Information theory and statistical mechanics. *Phys Rev*, 106:620-630.
- Kornejady, A., Ownegh, M., and Bahremand, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152:144-162.

- Leathwick, J. R., Elith, J., Francis, M. P., Hastie, T. and Taylor, P. 2006. Variation in demersal fish species richness in the oceans surrounding New Zealand: an analysis using boosted regression trees. *Marine Ecology Progress Series*, 321, 267-281.
- Lee, S., Choi, J., and Min, K. 2004. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11), 2037-2052.
- Lee, S., and Sambath, T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*, 50(6), 847-855.
- Lee, S. and Talib, J.A. 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environ. Geol.*, 47, 982-990.
- Meinhardt, M., Fink, M. and Tunschel, H. 2015. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology*, 234, 80-97.
- Park, N. W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 937-949.
- Phillips, S.J., Anderson, R. P., and Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3), 231-259.
- Phillips, S.J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., and Ferrier, S. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19(1), 181-197.
- Phillips S.J. and Dudík K. M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31:161-175.
- Pineda, E., and Lobo, J.M. 2009. Assessing the accuracy of species distribution models to predict amphibian species richness patterns. *Journal of Animal Ecology*, 78(1), 182-190.
- Pitchford, J., Strager, M., Riley, A., Lin, L., and Anderson, J. 2014. Modeling streambank erosion potential using maximum entropy in a central Appalachian watershed. Proceedings of a symposium held in New Orleans, Louisiana, USA. IAHS Publ. 367/122.
- Prasad, A. M., Iverson, L. R., and Liaw, A. 2006. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9(2), 181-199.
- Tinoco, B. A., Astudillo, P. X., Latta, S. C., and Graham, C. H. 2009. Distribution, ecology and conservation of an endangered Andean hummingbird: the Violet-throated Metaltail (*Metallura baroni*). *Bird Conservation International*, 19(01), 63-76.
- Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C., and Scarascia-Mugnozza, G. 2015. Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249, 119-136.
- Van Der Wal, J., Shoo, L. P., Johnson, C. N., and Williams, S. E. 2009. Abundance and the environmental niche: environmental suitability estimated from niche models predicts the upper limit of local abundance. *The American Naturalist*, 174(2), 282-291.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M., and Schröder, B. 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides. *Ecological Modelling*, 239, 27-39.
- Yalcin, A. 2005. An investigation on Ardesen (Rize) region on the basis of landslide susceptibility. PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey (in Turkish).
- Yalcin, A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1-12.
- Zhang, G., Cai, Y., Zheng, Z., Zhen, J., Liu, Y., and Huang, K. 2016. Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *CATENA*, 142, 233-244.
- Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., and Zhu, T. 2014. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-1.



The performance of the maximum entropy algorithm and geographic information system in shallow landslide susceptibility assessment

Faezeh Rajabzadeh^{1*}, SeidSaeed Ghiasi² and Omid Rahmati³

1) Assistant professor, Shahr-e-qods Branch, Islamic Azad University, Iran.

2) Young Researchers and Elite Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3) Ph.D in watershed management, Lorestanuniversity, Khoram Abad, Iran.

*Corresponding author email: faizehrajabzadeh@yahoo.com

Received: 18-12-2016

Accepted: 23-05-2018

Abstract

Shallow landslide is one of the natural hazards that damage life and property of people in mountainous watershed. Due to the fact that a lot of landslides events have been occurred in this watershed, assessment the risk of shallow landslides by using appropriate methods and determine of effective factors in reduce the hazards is so effective. The potential of using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping is investigated. In the case study west of Ardabil province, 74 landslide occurrences were identified, 52 landslides (70%) used for training and the 22 landslides (30%) applied for validation purpose. environmental factors including continuous (altitude, slope, aspect, plan curvature, drainage density, and rainfall) and categorical (lithology and landuse) data were used as inputs for modeling. From the optimal setting test based on cross-validation, a continuous data and its combination with categorical data showed the best predictive performance. The results of validation showed that the *ROC* and *AUC* for success and prediction rate of model was 96.1 and 97.6%, respectively. Factor contribution analysis indicated that altitude and rainfall layers were the most influential factors. From interpretations on a response curve, steeply sloping areas that consisted of excessively covered with old alluvial terrace soils were very susceptible to landslides. Predictive performance of maximum entropy modeling was slightly better than that other models like of a logistic regression which has been used widely to assess landslide susceptibility. *ROC* for this model is 0.961 and for logistic regression *AUC* is 0.572 in different investigation at this region. Therefore, Maximum entropy modeling is shown to be an effective prediction model for landslide susceptibility mapping.

Keywords: Prediction; Response Curve; *ROC* Curve; Shallow landslide; Susceptibility