

## ارزیابی و پیش‌بینی مکانی مخاطره زمین‌لغزش در جاده کوهستانی سنندج- کامیاران با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی

صالح میرزانی

کارشناسی ارشد رشته مخاطرات محیطی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

همین شهابی\*

استادیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۴ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲)

### چکیده

زمین‌لغزش‌ها از بلاای طبیعی هستند که سالانه خسارت‌های مالی و جانی زیادی را در کشور ایجاد می‌کنند. شناخت مناطق پرخطر می‌تواند در کاهش خسارت‌ها و تصمیم‌گیری در زمینه سیاست‌های توسعه اراضی مؤثر باشد. هدف این پژوهش، پیش‌بینی مکانی خطر زمین‌لغزش در محدوده جاده ارتباطی سنندج-کامیاران در استان کردستان است. در این تحقیق، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی از قبیل مدل تابع شواهد قطعی (EBF) و شواهد وزنی (WOE) انجام گرفت. ابتدا ۷۹ زمین‌لغزش با استفاده از پیمایش میدانی شناسایی شد. سپس این نقاط به‌طور تصادفی به‌منظور تهیه مدل و اعتبارسنجی به‌ترتیب به دو گروه آموزش (۷۰ درصد، ۵۵ نقطه) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد، ۲۴ نقطه) تقسیم شدند. در این پژوهش، با توجه به تحقیقات قبلی و شرایط منطقه، چهارده عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، کاربری اراضی، جنس خاک، انحنای شیب، لیتولوژی، شاخص تفرق پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص توان آبراهه (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) برای پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در نظر گرفته شدند. همچنین در این پژوهش با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC)، عملکرد هر دو مدل بررسی شد. نتایج تحلیل منحنی ویژگی عملگر نسبی نشان داد که مدل‌های EBF و Woe به‌ترتیب دارای مقدار AUC ۰/۷۹ و ۰/۸۹ هستند؛ بنابراین مدل Woe نسبت به EBF دارای بیشترین مقدار AUC بوده و بهترین مدل برای پیش‌بینی مکانی خطر زمین‌لغزش در منطقه پژوهش است. افزون‌بر آن، نتایج نشان داد که الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی بنا به ساختار خود از دقت کافی در پیش‌بینی مکانی زمین‌لغزش در منطقه پژوهش برخوردارند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی، تابع شواهد قطعی، جاده سنندج-کامیاران، زمین‌لغزش، مدل شواهد وزنی.

## مقدمه

راه‌های ارتباطی از عناصر مهم تمدن نوین هستند و زمینه‌های رشد و توسعه اقتصادی و اجتماعی مناطق مختلف را فراهم می‌آورند [۳]. سرمایه‌هایی که برای احداث، حفظ و نگهداری شبکه راه‌ها صرف می‌شود، جزو سرمایه‌های ملی به شمار می‌رود. بنابراین نگهداری این سرمایه‌های ملی به منظور بهره‌برداری طولانی‌مدت از شبکه راه‌ها الزامی است [۱۰]. از طرف دیگر، یکی از دلایل اصلی ایجاد زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی، احداث جاده است. اصطلاح زمین‌لغزش به حرکت مواد فرسایش‌یافته از جمله سنگ، مواد آواری و خاک در طول شیب دامنه به سبب نیروی جاذبه اطلاق می‌شود [۲۵]. این پدیده «حرکت توده‌ای» نیز نامیده می‌شود. ناپایداری دامنه یکی از پدیده‌های زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی است که تأثیر زیادی در تغییر شکل سطح زمین دارد و وقتی که فعالیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند به پدیده خطرناکی تبدیل شود [۱]. زمین‌لغزش و دیگر انواع حرکت توده‌ای دامنه، از شایع‌ترین بلايا در جهان است که مجموعه تهدیدهایی از جمله تلفات جانی، خسارات اقتصادی، تخریب زیرساخت‌ها و مشکلات زیست‌محیطی را برای جامعه بشری ایجاد می‌کند [۲۴].

حرکات توده‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش و ریزش از مهم‌ترین بلايای طبیعی هستند. وجود عواملی مانند مستعد بودن ناهمواری‌ها از نظر زمین‌شناسی و دینامیک، قطع درختان و بهره‌برداری‌های بی‌رویه از جنگل‌ها و دیگر پوشش‌های گیاهی، رعایت نکردن اصول فنی و ملاحظات کوتاه‌مدت مالی در انتخاب مسیر و ساخت جاده‌ها سبب تشدید این مخاطرات شده است [۵]. همچنین در مناطق کوهستانی و شیب‌دار، احداث راه‌های جدید یا بهسازی راه‌های ساخته شده، می‌تواند شرایط را برای بروز یا تشدید حرکات توده‌ای در دامنه‌های مجاور جاده فراهم کند که این خود هم به لحاظ مخاطرات جاده‌ای و هم به لحاظ تغییر و تخریب در محیط زیست مسئله‌ساز خواهد بود. پژوهشگران مختلف، عوامل متفاوتی را برای وقوع ناپایداری دامنه‌ای در نظر گرفته شده‌اند؛ عواملی همچون طبقات ارتفاع [۱۲، ۱۷]، شیب [۱۳، ۱۷]، جهت شیب [۱۷]، فاصله از گسل [۸]، فاصله از آبراهه [۱۳، ۱۷]، [۸، ۱۲]، فاصله از جاده [۸، ۱۷]، تراکم گسل [۶، ۱۷]، تراکم آبراهه [۶]، بارش [۱۳، ۱۷]، لیتولوژی [۸، ۱۳، ۱۷]، کاربری اراضی [۱۷، ۱۳، ۱۲، ۱۰]، NDVI [۱۷، ۱۸]، [۶، ۱۷] TWI، [۶، ۱۷] SPI، [۹، ۱۷] خاک [۸، ۱۳]، انحنای طولی شیب [۶، ۱۹]، انحنای عرضی شیب [۹، ۱۱]، تابش خورشید [۱۴] و انحنای شیب [۱۳].

از طرف دیگر، پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش، اولین و مهم‌ترین گام در جلوگیری از زمین‌لغزش است. الگوریتم‌های داده‌کاوی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر به‌منظور

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شده است. این الگوریتم‌ها به لحاظ به‌کارگیری مدل‌های تخمین توزیع، طبیعت داده‌محور و تکرار زیاد فرایند مدل‌سازی، توانایی زیادی در شناسایی رفتار وقوع پدیده زمین‌لغزش دارند و می‌توانند ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌ها را برحسب عوامل تأثیرگذار در وقوع آنها انجام دهند. الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی در پژوهش‌های متعددی برتری نسبی خود بر مدل‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره را اثبات کرده‌اند که می‌توان به برخی از آنها اشاره کرد، از جمله روش جنگل تصادفی [۴۰، ۲۳، ۱۷، ۶]، سیستم عصبی-فازی [۱۶]، درخت تصمیم [۲۷، ۱۸]، الگوریتم ماشین پشتیبان [۳۵، ۲۳، ۱۰]، درخت بیز<sup>۱</sup> [۱۷، ۱۸]، رگرسیون منطقی [۱۹]، مدل ترکیبی الگوریتم ماشین یادگیری و مدل شواهد وزنی [۱۹]، مدل ترکیبی ماشین یادگیری و تابع شواهد قطعی EBF<sup>۲</sup> [۱۹]، روش حداکثر آنتروپی [۲۸]، روش نسبت فراوانی [۳۳، ۲۷]، شواهد وزنی<sup>۳</sup> (WOE) [۳۳]، تابع شواهد قطعی [۳۴]، رگرسیون لجستیک [۳۶، ۲۷، ۲۳] و تحلیل سلسله‌مراتبی [۳۷، ۶].

وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در محورها و راه‌های ارتباطی به‌خصوص در مناطق کوهستانی، از جمله مواردی است که هرساله خسارت‌های زیادی را به راه‌های مواصلاتی کشور وارد می‌سازد. در برخی موارد، وقوع این نوع از مخاطرات طبیعی در گردنه‌ها و تنگه‌هایی با شیب تندتر و جاده‌هایی با انحنای بیشتر، سبب مرگ مسافران می‌شود [۲]. در جاده‌های استان کردستان نیز به‌دلیل شرایط کوهستانی و آب‌وهوایی، هرساله و به‌طور دائم، حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش و ریزش سنگ روی می‌دهد و ده‌ها هزار دلار خسارت ایجاد می‌کند [۳۸].

مسیر جاده سنندج - کامیاران به‌سبب کوهستانی بودن نیز از مناطقی است که با توجه به موقعیت قرارگیری و با تنوع متغیرهای محیطی مؤثر در آن شامل شرایط اقلیمی، تکتونیکی، لیتولوژیکی و پوشش گیاهی از پتانسیل زیادی در این زمینه از مخاطرات برخوردار است و بر همین اساس، پیش‌بینی مکانی حرکات دامنه‌ای و پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش در جاده کوهستانی سنندج-کامیاران با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی از قبیل روش شواهد وزنی (WOE) و تابع شواهد قطعی (EBF) ضروری است.

## مواد و روش‌ها

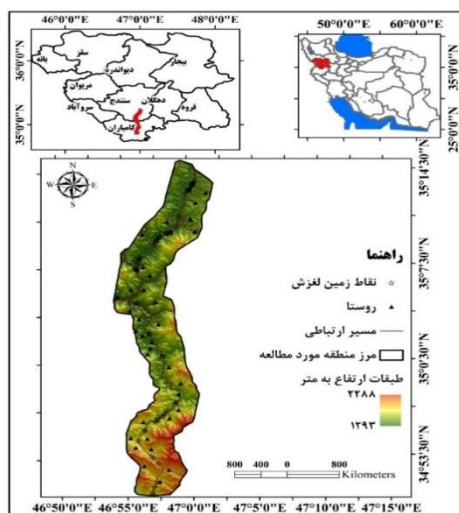
### معرفی منطقه پژوهش

جاده تحت مطالعه در استان کردستان در غرب ایران با وسعت ۲۴۲۰۶/۷ هکتار در موقعیت

---

1. Naïve Bayes  
2. Evidential Belief Function  
3. Weight of Evidence

جغرافیایی "۳۰' ۵۵" ۴۶° تا "۱۰' ۲' ۴۷° طول جغرافیایی شرقی و "۳۵' ۱۵" ۳۵° عرض جغرافیایی واقع شده است. موقعیت منطقه پژوهش در ایران و استان کردستان در شکل ۱ ارائه شده است. حداقل، حداکثر و میانگین ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۲۹۳، ۲۲۸۸ و ۱۵۸۸ متر است. جاده سنندج - کامیاران، سنندج مرکز استان کردستان را به کامیاران متصل می‌کند و از جمله محورهای مهم و ترانزیتی این استان است که استان کردستان را به کرمانشاه وصل می‌کند. این جاده از گردنه‌های مهمی از جمله گردنه مروارید و درکه عبور می‌کند. این گردنه‌ها و به‌طور کلی جاده کامیاران سنندج، به دلیل کوهستانی بودن دارای تعداد زیادی حرکات دامنه‌ای از جمله سنگ‌افتان و زمین‌لغزش است. محور سنندج - کامیاران به دلیل کوهستانی بودن، برفگیر است و در بعضی از روزهای زمستان، گردنه‌های مروارید و درکه مسدود می‌شوند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه، لایه‌های «سنگ‌های آتشفشانی»، «شیل، ماسه‌سنگ، مارن، لوم»، «سنگ‌آهک نرومولیتی»، «ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا»، «شیل خاکستری تیره»، «طبقات قرمز متشکل از کنگلومرا»، «فلیش، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک»، «رسوبات دشت سیلابی» و «رسوبات تراس دره‌ای» مشاهده شده که بیشترین سطح منطقه از شیل خاکستری تیره تشکیل شده است. همچنین شکل ۲ نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در جاده سنندج-کامیاران را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جاده تحت مطالعه در استان کردستان و ایران



شکل ۲. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در جاده تحت مطالعه

#### عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

در این تحقیق، با توجه به پژوهش‌های قبلی و شرایط منطقه، عامل‌های درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، کاربری اراضی، جنس خاک، انحنای شیب، لیتولوژی، شاخص تفرق پوشش گیاهی<sup>۱</sup> (NDVI)، شاخص توان آبراهه<sup>۲</sup> (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۳</sup> (TWI) برای پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در نظر گرفته شدند. شایان ذکر است که طبقه‌بندی لایه‌ها با توجه به شرایط منطقه و نظر کارشناسی انجام گرفت.

ابتدا مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵×۱۲/۵ از ماهواره ALOS PALSAR و از سایت Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>) تهیه شد. در ادامه نقشه طبقات ارتفاع با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با پیکسل ۱۲/۵×۱۲/۵ متر در محیط نرم‌افزارهای Arc GIS 10.3 به دست آمد. نقشه شیب زمین به دلیل تأثیر مستقیم بر نفوذ، یکی از عوامل مهم در وقوع زمین‌لغزش به شمار می‌رود. این نقشه با تکیه بر مدل رقومی (با قدرت تفکیک

1. Normalized difference vegetation index

2. Stream power index

3. Topographic wetness index

۱۲/۵ متر) تهیه و به هفت کلاس با استفاده از روش شکست طبیعی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 طبقه‌بندی شد. نقشه جهت شیب، یکی از عوامل مهم در وقوع زمین‌لغزش به شمار می‌رود. این نقشه با تکیه بر مدل رقومی (با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر) و نرم‌افزار ArcGIS تهیه و به نه کلاس طبقه‌بندی شدند. تراکم زهکشی نسبت طول کل آبراهه‌ها به مساحت حوضه آبریز است. نقشه تراکم شبکه زهکشی با استفاده از نقشه توپوگرافی رقومی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور با استفاده از روش شکست طبیعی در محیط ArcGIS 10.3 تهیه شد. نقشه فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل و فاصله از جاده با استفاده از نقشه توپوگرافی رقومی ۱:۵۰۰۰۰ و اعمال توابع Distance در محیط ArcGIS تهیه شد. لایه کاربری اراضی نیز براساس کاربری‌های مختلف به کلاس‌های مختلف تقسیم شد. به منظور استخراج لایه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. لایه خاک‌شناسی منطقه از نقشه منابع و قابلیت اراضی کردستان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین مرجع شد. نقشه پوشش گیاهی یا شاخص NDVI از تصاویر لندست ۸ تهیه شد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): این شاخص، شاخص ترکیب پستی و بلندی است که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به نمایش می‌گذارد. شاخص خیزی، شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول چشم‌انداز زمین است که با رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$TWI = \ln \left( \frac{As}{tg \beta} \right) \quad (1)$$

که در آن  $As$ ، مساحت بالادست شیب که به یک نقطه زهکش می‌شود ( $m/m^2$ ) و  $\beta$  زاویه شیب در آن نقطه (رادیان) است.

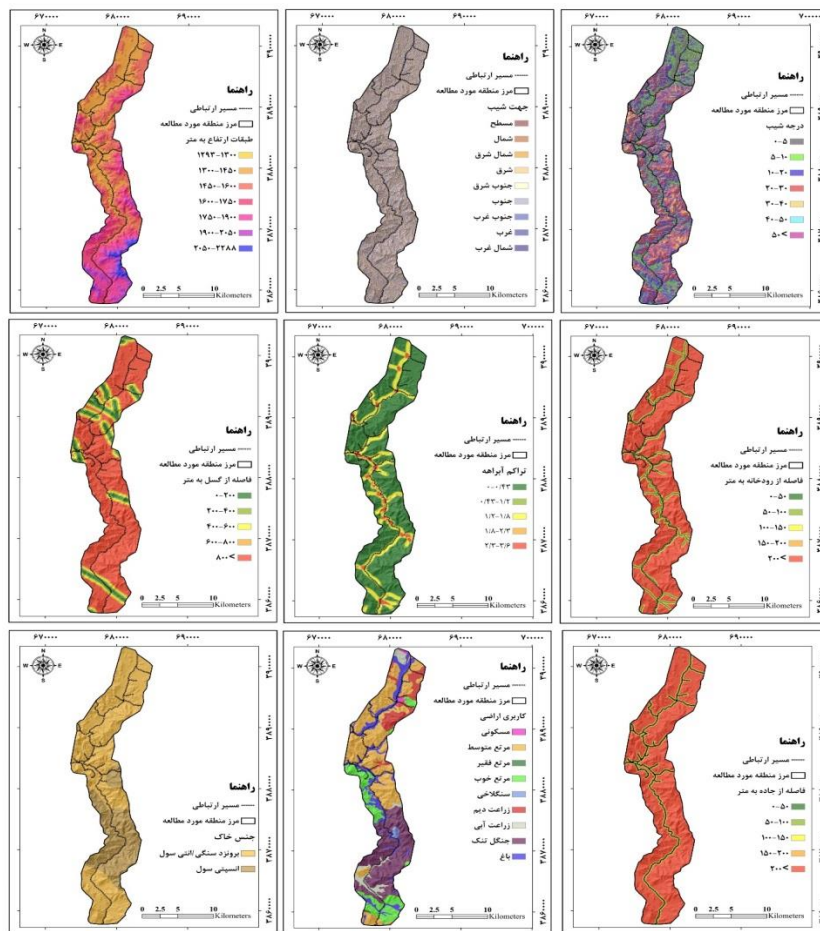
شاخص توان آبراهه (SPI): برای کمی کردن اثر توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود [۲۱]. مقدار این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$SPI = As \times tg \beta \quad (2)$$

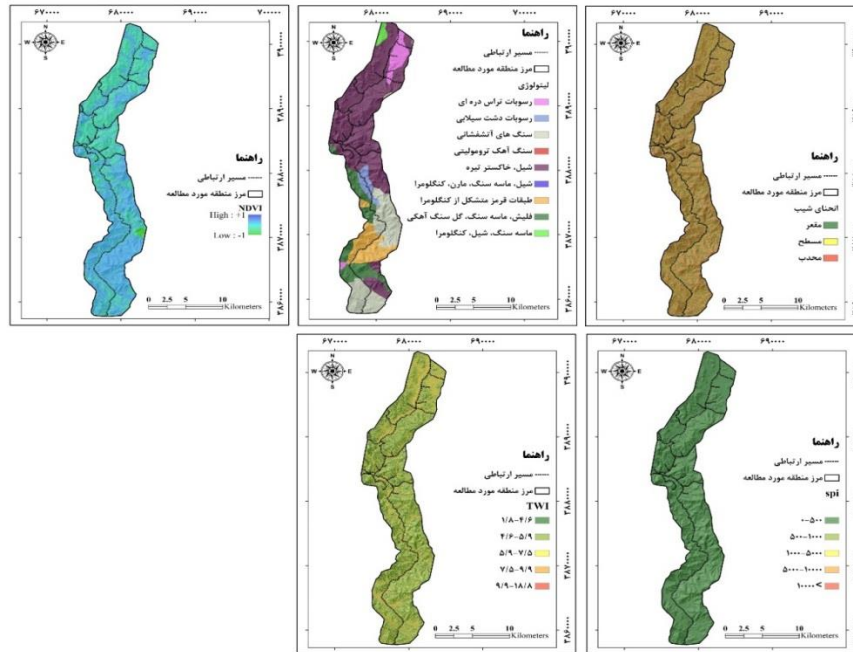
که در آن  $As$  مساحت بالادست شیب که به یک نقطه زهکش می‌شود ( $m/m^2$ ) و  $\beta$  زاویه شیب در آن نقطه (رادیان) است.

این پارامتر، قدرت فرسایندهی آب جاری را اندازه می‌گیرد؛ به عبارتی فرسایش را در نواحی دارای تحدب نیمرخ و تقعر مماسی (زون‌های با همگرایی و سرعت زیاد جریان) و رسوب را در نواحی دارای تقعر نیمرخ (زون‌های کاهنده سرعت جریان) برآورد می‌کند [۲۲].

نقشه شکل شیب<sup>۱</sup>: محاسبه شکل شیب این است که آیا بخش مشخصی از یک سطح محدب<sup>۲</sup> یا مقعر<sup>۳</sup> است. تحدب و تقعر یک سطح با استفاده از فواصل بین خطوط توپوگرافی متوالی در سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین می‌شود. به‌طور کلی انحنای زمین بین مقادیر مثبت (محدب) و منفی (مقعر) در نوسان است [۳۳]. براساس مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر) و نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. نقشه مزبور به سه کلاس انحنای مقعر، انحنای محدب و تخت (بدون انحنای) طبقه‌بندی شد. در شکل ۳ نقشه پارامترهای مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش نشان داده شده است.



1. Curvature
2. Convex
3. Concave



شکل ۳. نقشه فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

### کاربرد الگوریتم‌های پیشرفته داده کاوی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مدل تابع شواهد قطعی (EBF)

این مدل شامل Bel یا درجه اطمینان، Dis درجه عدم اطمینان، Unc درجه عدم قطعیت و Pls درجه معقولیت در محدوده بین صفر تا یک است [۳۳]. بخش اصلی این تئوری توسط درجه اطمینان و درجه معقولیت ارائه می‌شود، به همین دلیل، درجه معقولیت بزرگ‌تر یا مساوی درجه اطمینان است. داده استخراج شده از EBFs هم همبستگی مکانی بین فاکتورهای مؤثر و رخداد زمین لغزش و هم همبستگی مکانی بین کلاس‌های هر یک از فاکتورهای مؤثر را برآورد می‌کند [۲۷]. پارامترهای روابط مدل توسط معادله‌های ۳ تا ۶ برآورد می‌شود: معادله‌های ۳ تا ۷ برای تعریف ادغام لایه‌های Bel، Dis، Pls و Unc تعریف می‌شوند.

$$Disbelief \ Dis = \frac{Dis_2 + Dis_3 + \dots + Dis_n}{\beta} \quad (3)$$



$$Disbelief \ Dis = \frac{Dis_2 + Dis_3 + \dots + Dis_n}{\beta} \quad (۴)$$

$$Uncertainty \ Unc = \frac{\sum_{i=2}^n (Unc_{i-1}Unc_i + Bel_{i-1}Unc_i + Bel_iUnc_{i-1} + Dis_{i-1}Unc_i + Dis_iUnc_{i-1})}{\beta} \quad (۵)$$

$$Plausibility \ Pls = Bel + Unc \quad (۶)$$

$$\beta = 1 - \sum_{i=2}^n (Bel_{i-1}Dis_i - Dis_{i-1}Bel_i) \quad (۷)$$

$Bel_n$  درجه کمتر از اعتماد برای هر نوع عامل یا محدوده است.  $Dis_n$  درجه عدم اعتماد برای هر نوع عامل یا محدوده است.  $Unc_n$  درجه عدم قطعیت هر نوع عامل یا محدوده است.  $n$  تعداد عوامل است. یکی از ویژگی‌های مدل EBF این است که  $Bel$ ،  $Dis$  و  $Unc$  در محدوده [۰، ۱] هستند. بنابراین اگر  $Unc$  برابر با ۱ باشد،  $Bel$  و  $Dis$  صفر می‌شوند و در صورتی که مجموع  $Bel$  و  $Dis$  برابر ۱ شود، درجه  $Unc$  برابر صفر است.

#### مدل شواهد وزنی (WOE)

روش شواهد وزنی (WOE) یا احتمال شرطی ابتدا برای شناسایی و اکتشاف نهشته‌های معدنی توسعه داده شد [۱۵]. در دهه گذشته این روش در قالب چند پژوهش ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش آزمایش شده است. کرارا و همکاران [۱۶] معتقدند که آنالیز احتمال شرطی ابزاری ارزشمند در تعیین پهنه‌بندی خطر است. به‌ویژه وقتی عوامل مناسب و آگاهی خوبی از عامل لغزش در دسترس باشد. تئوری وزن واقعه روشی داده‌محور است [۲۱] که به‌عنوان یکی از مدل‌های نظریه بیزین در قالب لگاریتم خطی شناخته شده است و از احتمال قبلی (غیرشرطی) و خلفی (شرطی) بهره می‌گیرد [۳۵].  $N_{pix1}$  تعداد پیکسل‌های وقوع زمین‌لغزش در هر کلاس،  $N_{pix2}$  (تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر نقشه - تعداد پیکسل‌های وقوع زمین‌لغزش در هر کلاس)،  $N_{pix3}$  (تعداد پیکسل‌های هر کلاس - تعداد پیکسل‌های وقوع زمین‌لغزش در هر کلاس)،  $N_{pix4}$  (تعداد کل پیکسل‌های هر نقشه - تعداد کل پیکسل‌های وقوع زمین‌لغزش در هر نقشه - تعداد پیکسل‌های هر کلاس + تعداد پیکسل‌های وقوع زمین‌لغزش در هر کلاس است) که از رابطه‌های ۸ و ۹ تعیین می‌شود [۴۰].

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad (۸)$$

$$W_i^- = \log_e \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad (۹)$$

وزن مثبت ( $W^+$ ) نشان می‌دهد که عامل علتی در محل وقوع زمین لغزش وجود دارد و بزرگی این وزن، همبستگی بین آن عامل و وقوع زمین لغزش را بیان می‌کند؛ اما وزن منفی ( $W^-$ ) بیانگر نبود عامل مورد نظر در محل بروز زمین لغزش است و سطح منفی همبستگی را نشان می‌دهد. اختلاف بین دو وزن مثبت و منفی ( $Wf$ ) بزرگی ارتباط مکانی عامل علتی و وقوع زمین لغزش را نشان می‌دهد که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود [۳۸].

$$Wf = W_i^+ - W_i^- \quad (۱۰)$$

برای به‌دست آوردن وزن نهایی هر عامل، وزن‌های مثبت و منفی کلاس‌های متعدد هر عامل با هم جمع می‌شوند. اگر وزن عاملی مثبت باشد، در وقوع زمین لغزش نقش دارد و اگر عامل منفی باشد، بیانگر نبود اثر عامل در بروز زمین لغزش است. برخی عوامل هم تأثیر ناچیزی در وقوع زمین لغزش دارند و وزن آنها صفر یا نزدیک به صفر است. با وارد کردن وزن‌ها در محیط ArcGIS روی نقشه‌های موضوعی، نقشه موضوعی وزنی به‌دست می‌آید. از مجموع این نقشه‌ها، نقشه پیش‌بینی استعداد وقوع زمین لغزش محاسبه شد.

#### ارزیابی مدل‌ها

در این پژوهش، با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی<sup>۱</sup> (ROC)، عملکرد هر مدل بررسی شد. منحنی ROC نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع زمین لغزش به‌وسیله مدل به‌درستی پیش‌بینی شده روی محور افقی (مثبت درست<sup>۲</sup> یا I-Specificity) در برابر مقادیر مکمل آن یعنی نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند

1. Relative Operating Characteristic  
2. True positive

مثبت غلط<sup>۱</sup> یا Sensitivity) روی محور عمودی ترسیم می‌شود. این منحنی در نرم‌افزار SPSS16 محاسبه و رسم شد. مساحت زیر این منحنی یا AUC<sup>۲</sup> نام دارد و مدلی که بیشترین مقدار AUC را دارا باشد، دارای عملکرد نسبی بیشتری است. AUC برابر ۰/۵ معادل مدل خنثی است و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر شود، کارایی مدل افزایش می‌یابد [۳۲].

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارتباط بین هر یک از عوامل مؤثر و نقاط وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو مدل جهت شمال غرب (۱/۰۶) دارای بیشترین تأثیر و در مدل شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب جهت‌های جنوب غرب (۱/۳۳-) و مسطح (۰/۰) دارای کمترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش بودند. همچنین در هر دو مدل شیب ۴۰-۵۰ درجه (۲/۱۹) دارای بیشترین تأثیر و در مدل شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب شیب‌های ۱۰-۲۰ درجه (۰/۴۰۳-) و بیشتر از ۵۰ درجه (۰/۰) دارای کمترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش بودند. از طرفی دیگر، بیشترین تعداد زمین‌لغزش در هر دو مدل در طبقه ارتفاعی ۱۴۵۰-۱۳۰۰ متر مشاهده شده و کمترین زمین‌لغزش در دو مدل شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب در طبقات ارتفاعی ۱۶۰۰-۱۴۵۰ و ۱۳۰۰-۱۲۹۳ متر مشاهده شد. جنس خاک انسپتی سول دارای بیشترین تأثیر در ایجاد زمین‌لغزش بود. با افزایش فاصله از رودخانه، احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش یافت. در مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب تراکم رودخانه متوسط (۱/۴) و تراکم رودخانه کم (۰/۲۷) دارای بیشترین تأثیر و تراکم زیاد رودخانه دارای کمترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش بودند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از وزن‌دهی، بین فاصله از جاده و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش رابطه عکس وجود دارد، یعنی هرچه فاصله از جاده کمتر باشد، احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. بررسی نقشه انحنای شیب نشان داد که بیشترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در هر دو مدل در شیب مقعر (۰/۱) رخ می‌دهد و کمترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب در شیب‌های محدب (۰/۱-) و مسطح (۰/۳۲) اتفاق می‌افتد. بررسی نقشه زمین‌شناسی نشان داد که در مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به ترتیب سازندهای «شیپل خاکستری تیره» با امتیاز ۰/۶۷ و «رسوبات دشت سیلابی» با امتیاز ۰/۲۸ دارای بیشترین تأثیر در ایجاد زمین‌لغزش بودند. از طرف دیگر، در

1. False positive  
2. Area Under Curve

مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به‌ترتیب سازندهای «سنگ‌های آتشفشانی» و «سنگ‌آهک ترمولیتی» کمترین تأثیر را داشتند. در نهایت در مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی به‌ترتیب فاکتور TWI (خیلی کم) و TWI (متوسط) دارای بیشترین تأثیر و به‌ترتیب طبقه خیلی کم و خیلی زیاد دارای کمترین تأثیر در ایجاد زمین‌لغزش بودند. همچنین در هر دو مدل فاکتورهای SPI (خیلی کم)، NDVI (۰-۰/۲) و فاصله از گسل (خیلی زیاد) دارای بیشترین تأثیر در وقوع پتانسیل زمین‌لغزش در جاده تحت مطالعه بودند. بررسی نقشه کاربری اراضی نشان داد که زمین‌لغزش در اراضی با کاربری باغ (۱/۹۸) بیشتر اتفاق می‌افتد.

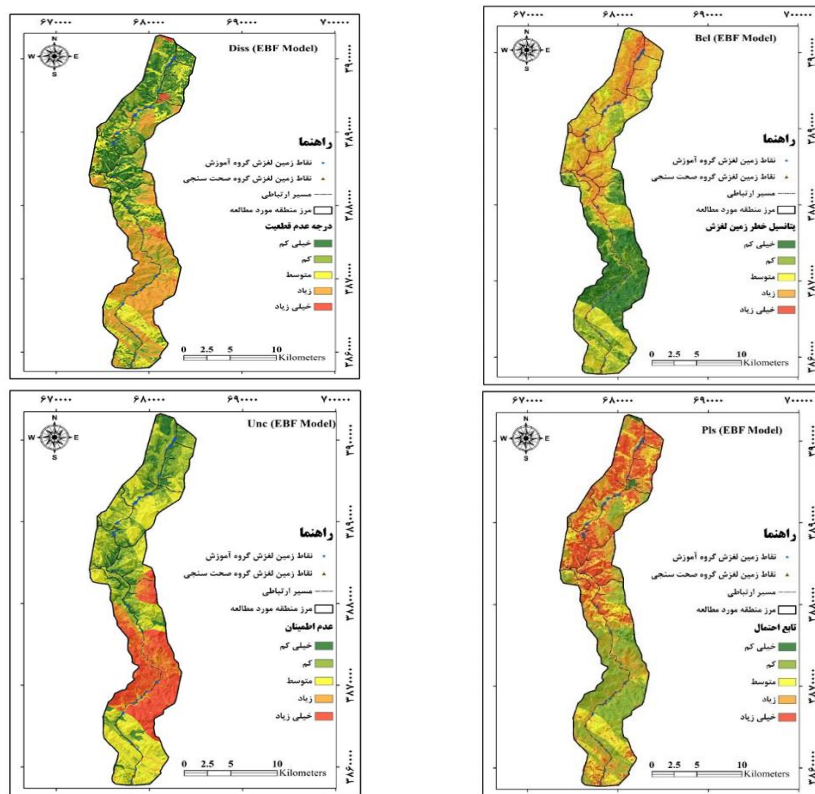
جدول ۱. تعداد پیکسل، تعداد نقاط زمین‌لغزش و امتیاز طبقات پارامترها در روش شواهد وزنی

Wfinal	EBF مدل				تعداد زمین‌لغزش	تعداد پیکسل	فاصله طبقات	پارامتر
	Plusibility	Unc	Dis	Bel				
-0/005	0/889	0/889	0/111	0/000	0	720	فلات	جهت شیب
0/3088	0/894	0/731	0/106	0/163	9	195122	شمال	
-0/9076	0/880	0/825	0/120	0/055	3	194295	شمال شرق	
-0/1436	0/887	0/777	0/113	0/110	6	192361	شرق	
0/3074	0/894	0/731	0/106	0/163	9	195360	جنوب شرق	
-0/0015	0/889	0/764	0/111	0/125	7	197944	جنوب	
-1/3309	0/878	0/841	0/122	0/036	2	194087	جنوب غرب	
-0/8847	0/880	0/825	0/120	0/056	3	190435	غرب	
1/0624	0/910	0/617	0/090	0/293	16	192898	شمال غرب	
0/177	0/861	0/783	0/139	0/079	7	169052	0-5	شیب (درجه)
-0/206	0/854	0/797	0/146	0/057	8	268719	5-10	
-0/403	0/838	0/786	0/162	0/051	16	590825	10-20	
-0/101	0/855	0/792	0/145	0/062	14	425843	20-30	
0/996	0/871	0/706	0/129	0/165	8	91886	30-40	
2/197	0/863	0/277	0/137	0/586	2	6486	40-50	
0/000	0/858	0/858	0/142	0/000	0	411	>50	
0/000	0/856	0/856	0/144	0/000	0	392	1293-1300	ارتفاع
2/022	0/951	0/259	0/049	0/692	42	465291	1300-1450	
-1/150	0/816	0/706	0/184	0/110	7	489917	1450-1600	
-0/891	0/840	0/718	0/160	0/123	4	249378	1600-1750	
-0/103	0/840	0/764	0/160	0/076	2	202753	1750-1900	
-0/075	0/844	0/844	0/156	0/000	0	112466	1900-2050	
-0/021	0/852	0/852	0/148	0/000	0	33025	2050-2288	
4/67	0/987	-1/034	0/013	2/021	49	110618	انستیتی سول	جنس خاک
-1/19	0/859	0/798	0/141	0/062	6	444839	انستیتی سول ورتی سول	
0/378	0/768	0/676	0/232	0/092	4	79074	0-50	فاصله از رودخانه
0/727	0/774	0/647	0/226	0/127	5	71528	50-100	
0/787	0/774	0/640	0/226	0/134	5	67557	100-150	
0/766	0/774	0/642	0/226	0/131	5	68910	150-200	
0/978	0/911	0/395	0/089	0/516	36	126393	>200	
0/828	0/786	0/603	0/214	0/183	8	107480	خیلی کم	
1/416	0/818	0/539	0/182	0/279	16	140686	کم	تراکم رودخانه
1/571	0/854	0/593	0/146	0/261	26	244046	متوسط	
0/002	0/767	0/677	0/233	0/091	2	54182	زیاد	
0/793	0/774	0/588	0/226	0/186	3	39527	خیلی زیاد	

ادامه جدول ۱. تعداد پیکسل، تعداد نقاط زمین‌لغزش و امتیاز طبقات پارامترها در روش شواهد وزنی

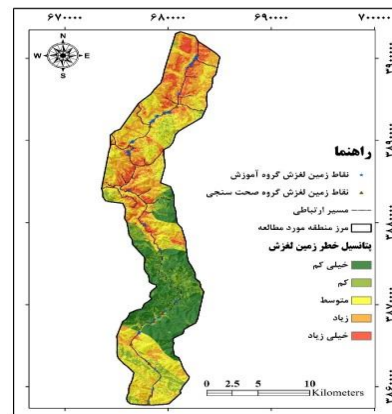
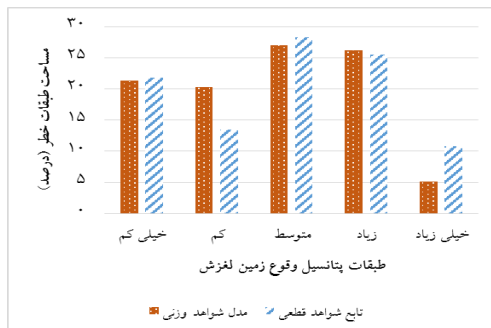
Wfinal	EBF مدل				تعداد زمین‌لغزش	تعداد پیکسل	فاصله طبقات	پارامتر	
	Plausibility	Unc	Dis	Bel					
0/167	0/999	0/025	0/001	0/974	3	72140	زراعت آبی	کاربری اراضی	
1/989	1/000	0/981	0/000	0/019	29	205245	باغ		
-0/079	1/000	1/000	0/000	0/000	0	117111	زراعت دیم		
-2/063	1/000	0/999	0/000	0/001	1	197194	مرتع خوب		
-0/640	1/000	0/997	0/000	0/003	8	378252	جنگل تنک		
-0/504	1/000	0/997	0/000	0/003	14	559888	مرتع متوسط		
-0/001	1/007	1/007	0/007	0/000	0	1902	مرتع فقیر		
-0/006	0/928	0/928	0/072	0/000	0	9645	اراضی سنگلاخی		
-0/006	0/066	0/066	0/934	0/000	0	8983	مسکونی		
7/091	0/995	0/016	0/005	0/980	54	66876	0-50		فاصله از جاده
-0/772	0/757	0/737	0/243	0/020	1	59875	50-100		
-0/037	0/753	0/753	0/247	0/000	0	56770	100-150		
-0/038	0/753	0/753	0/247	0/000	0	58015	150-200		
-0/088	0/741	0/741	0/259	0/000	0	131170	>200		
0/101	0/680	0/326	0/320	0/354	23	611585	مقعر	انحنای شیب	
-0/006	0/666	0/334	0/334	0/332	12	340424	فلات		
-0/100	0/654	0/340	0/346	0/313	20	601213	محدب		
-0/786	0/875	0/793	0/125	0/082	5	279208	سنگ آتشفشانی	لیتولوژی	
0/000	0/887	0/887	0/113	0/000	0	698	شیل، ماسه‌سنگ، مارن، لوم		
0/000	0/887	0/887	0/113	0/000	0	315	سنگ آهک نرمولیتی		
-0/014	0/886	0/886	0/114	0/000	0	21159	ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا		
0/673	0/924	0/712	0/076	0/213	37	793976	شیل خاکستری تیره		
0/119	0/889	0/709	0/111	0/180	6	152112	طبقات قرمز متشکل از کنگلومرا		
-0/123	0/872	0/872	0/128	0/000	0	179367	فلیش، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک		
0/599	0/890	0/603	0/110	0/287	3	47665	رسوبات دشت سیلابی		
0/413	0/890	0/651	0/110	0/239	4	76520	رسوبات تراس دره‌ای		
0/213	0/811	0/504	0/189	0/308	17	412430	خیلی کم		TWI
-0/108	0/791	0/544	0/209	0/247	20	604238	کم		
0/079	0/815	0/484	0/185	0/331	16	361177	متوسط		
-0/051	0/789	0/675	0/211	0/114	2	130810	زیاد		
-0/029	0/794	0/794	0/206	0/000	0	44567	خیلی زیاد		
2/33	1/000	0/000	0/000	1/000	55	150971	خیلی کم	SPI	
-0/01	0/749	0/749	0/251	0/000	0	18895	کم		
-0/01	0/748	0/748	0/252	0/000	0	20548	متوسط		
0/00	0/751	0/751	0/249	0/000	0	2845	زیاد		
0/00	0/752	0/752	0/248	0/000	0	1224	خیلی زیاد		
-0/006	0/758	0/758	0/242	0/000	0	9412	کمتر از صفر	NDVI	
1/875	0/930	0/065	0/070	0/865	46	682363	۰-۰/۲		
-1/835	0/553	0/418	0/447	0/135	9	855258	۰/۲-۰/۵		
-0/004	0/759	0/759	0/241	0/000	0	6104	بیشتر از ۰/۵		
0/123	0/768	0/689	0/232	0/079	4	100763	۰-۲۰۰	فاصله از گسل	
0/370	0/773	0/673	0/227	0/100	5	100371	۲۰۰-۴۰۰		
0/587	0/778	0/656	0/222	0/121	6	98996	۴۰۰-۶۰۰		
-0/594	0/759	0/719	0/241	0/040	2	99386	۶۰۰-۸۰۰		
3/327	0/922	0/263	0/078	0/659	38	115372	بیشتر از ۸۰۰		

نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی در شکل ۴ ارائه شده است. نقشه‌های حاصل از مدل EBF شامل درجاتی از قطعیت (Bel)، عدم قطعیت (Dis)، اطمینان (Unc) و احتمال (Pls) در دامنه بین صفر و ۱ است و مجموع مقادیر قطعیت، عدم قطعیت و عدم اطمینان ۱ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۶۴ درصد از سطح منطقه در کلاس خطر متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد. مقادیر زیاد شاخص قطعیت و مقادیر کم شاخص عدم قطعیت بیانگر احتمال بیشتر وقوع زمین لغزش است؛ در حالی که مقادیر کم شاخص قطعیت و مقادیر زیاد شاخص عدم قطعیت بیانگر احتمال کمتر وقوع زمین لغزش است؛ در حالی که مقادیر کم شاخص قطعیت و مقادیر زیاد شاخص عدم قطعیت بیانگر احتمال کم رخداد زمین لغزش است. نقشه احتمال منطبق بر مناطقی است که در آنجا مقادیر شاخص قطعیت کم است. نقشه عدم اطمینان نشان داد که در مناطقی درجه عدم اطمینان زیاد است، مقادیر درجه عدم قطعیت و احتمال زیاد است.



شکل ۴. نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل شواهد قطعی (تابع قطعیت)

نقشه پتانسیل زمین‌لغزش با استفاده از مدل شواهد وزنی در شکل ۵ ارائه شده است. مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش براساس دو مدل تابع شواهد قطعی و شواهد وزنی در جدول ۲ و شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج تحقیق نشان داد که حدود ۶۰ درصد از سطح منطقه تحقیق در کلاس متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد.



شکل ۶. مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش براساس دو مدل تابع شواهد قطعی و شواهد وزنی

شکل ۵. نقشه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل شواهد وزنی

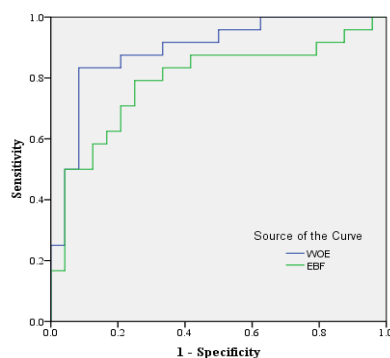
جدول ۲. مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش براساس دو مدل تابع شواهد قطعی و شواهد وزنی

طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش	مدل شواهد وزنی		تابع شواهد قطعی	
	مساحت طبقات (هکتار)	درصد مساحت	مساحت طبقات (هکتار)	درصد
خیلی کم	۵۱۶۸/۹	۲۱/۳۵	۵۲۸۸/۳	۲۱/۸
کم	۴۹۰۸/۱	۲۰/۲۷	۳۲۷۷/۷	۱۳/۵
متوسط	۶۵۴۶/۹	۲۷/۰۴	۶۸۵۶/۵	۲۸/۳
زیاد	۶۳۳۱/۲	۲۶/۱۵	۶۱۷۴/۸	۲۵/۵
خیلی زیاد	۱۲۵۱/۵	۵/۱۷	۲۶۰۹/۲	۱۰/۸

به منظور اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، از منحنی ROC استفاده شد. مساحت زیر منحنی ROC که AUC نام دارد، در صورتی که کمتر از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده صحت نداشتن مدل است و از ۰/۵ تا ۱ نشان‌دهنده صحت مدل برای پیش‌بینی وجود یا نبود پتانسیل وقوع زمین‌لغزش است. مقدار AUC برای مدل‌های تحت ارزیابی با توجه به داده‌های اعتبارسنجی در جدول ۳ و همچنین منحنی ROC مدل‌های مورد ارزیابی با توجه به داده‌های اعتبارسنجی در شکل ۷ ارائه شده است. از میان مدل WOE و EBF تحت مطالعه، بیشترین صحت به مدل EBF (۰/۸۷۵) اختصاص داشت؛ بنابراین در زمینه پتانسیل‌یابی وقوع زمین‌لغزش، مدل EBF نسبت به مدل WOE دارای عملکرد بهتری است.

جدول ۳. مقدار AUC مدل‌های پیش‌بینی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش

ردیف	مدل پیش‌بینی	داده‌های اعتبارسنجی
۱	WOE	۰/۸۹
۲	EBF	۰/۷۹



شکل ۷. منحنی ROC مدل‌های استفاده‌شده با توجه به داده‌های اعتبارسنجی

محور ارتباطی سنندج-کامیاران در استان کردستان به طول ۷۵ کیلومتر به دلیل موقعیت جغرافیایی و اهمیت زیاد در حمل‌ونقل بین‌المللی و به‌ویژه دسترسی به بازارهای غرب کشور از پرترددترین محورهای ارتباطی ایران است. این مسیر در محدوده کوهستانی به دلیل داشتن شیب زیاد دامنه‌ها و ارتفاع زیاد منطقه و به‌واسطه آن ناپایداری دامنه‌ها در بخش‌هایی از مسیر دارای وضعیتی نامناسب است. برای پتانسیل‌یابی خطر زمین‌لغزش در یک منطقه



مشخص، تعداد عوامل دخیل بیش از مواردی است که در این پژوهش استفاده شده است که نبود داده‌های لازم، یکی از دلایل است. پارامترهای استفاده‌شده در این پژوهش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، کاربری اراضی، انحنای شیب، لیتولوژی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، TWI، SPI، NDVI و جنس خاک بود.

سطوح ارتفاعی منطقه تحقیق دارای حداقل ارتفاع ۱۲۹۳ متر و حداکثر ارتفاع ۲۲۸۸ متر است. تهیه نقشه سطوح ارتفاعی منطقه و استفاده از مدل شواهد وزنی و همچنین مدل تابع شواهد قطعی نشان داد که پهنه ارتفاعی ۱۴۵۰-۱۳۰۰ متر بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش در منطقه داشته است. بررسی نقشه جهت شیب با توجه به مدل شواهد وزنی نشان داد که بیشترین و کمترین فراوانی زمین‌لغزش به ترتیب در جهت شمال غرب و جنوب غرب اتفاق می‌افتد؛ اما در تابع شواهد قطعی بیشترین و کمترین فراوانی وقوع زمین‌لغزش به ترتیب در جهت‌های شمال غرب و مسطح مشاهده شد. عرب عامری و همکاران [۹] در مطالعه‌ای از مدل شواهد وزنی برای بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش استفاده کردند نتایج بررسی نشان داد که شیب‌های شرقی بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند؛ اما شیب‌های شمالی کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش داشتند. در مطالعه اوه و همکاران [۳۱] شیب‌های جنوب شرق و شرق بیشترین تأثیر را در ایجاد زمین‌لغزش داشتند. بررسی نقشه شیب نشان داد که در مدل شواهد وزنی و شواهد قطعی، شیب ۵۰-۴۰ درجه بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد، اما در این دو مدل به ترتیب شیب‌های ۲۰-۱۰ درجه و ۵۰ درجه کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. اوه و همکاران [۳۱] از تابع شواهد قطعی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که شیب بیشتر از ۲۷ درجه بیشترین تأثیر را در ایجاد زمین‌لغزش دارد و در مدل شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی با افزایش فاصله از رودخانه، احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش می‌یابد.

بررسی نقشه تراکم رودخانه در مدل‌های شواهد وزنی و تابع شواهد قطعی نشان داد که به ترتیب تراکم رودخانه متوسط و کم بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند، اما به ترتیب تراکم زیاد و خیلی زیاد کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. نتایج پژوهش عرب عامری و همکاران [۹] نشان داد که تراکم رودخانه خیلی کم بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد. بررسی لایه اطلاعاتی فاصله از جاده در مدل شواهد وزنی و شواهد قطعی نشان داد که با کاهش فاصله از جاده، احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. در پژوهش عرب عامری و همکاران [۹] نیز نتایج مشابهی به دست آمد و با کاهش فاصله از جاده، فراوانی وقوع زمین‌لغزش افزایش یافت. نتایج مدل شواهد وزنی و شواهد قطعی نشان داد که شیب مقعر

بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارد. در این دو مدل به ترتیب شیب‌های محدب و مسطح کمترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارند.

بررسی لایه‌های اطلاعاتی در مدل شواهد وزنی نشان داد که TWI با طبقه خیلی کم، SPI با طبقه خیلی کم و فاصله از گسل در طبقه خیلی زیاد بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارند؛ اما در مدل شواهد قطعی، TWI با طبقه متوسط و طبقه خیلی زیاد به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تأثیر در وقوع زمین لغزش بودند. همچنین SPI در طبقه خیلی کم و فاصله از گسل در طبقه خیلی زیاد دارای بیشترین تأثیر در ایجاد پتانسیل زمین لغزش بودند. در تحقیق عرب عامری و همکاران [۳۷] فاصله از گسل ۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ متر بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشت. در این تحقیق، لایه NDVI به سه طبقه کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی شده و بیشترین فراوانی وقوع زمین لغزش در طبقه کم مشاهده شد.

در پژوهش عرب عامری و همکاران [۹] بیشترین فراوانی وقوع زمین لغزش در سازندهای آهک، کنگلومرا و شیل مشاهده شد، اما بررسی نقشه کاربری اراضی نشان داد که ارتفاعات بایر و مرتع بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش و زراعت آبی، باغ‌ها و دیم کمترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشتند. کینگ و همکاران [۳۴] به بررسی و تهیه نقشه نقاط حساس به زمین لغزش در شهر تایل‌بای چین با استفاده از روش‌های نسبت فرکانس (FR)، وزن شواهد (WOE) و مدل تابع شواهد قطعی (EBF) پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که عملکرد هر سه مدل به طور تقریبی در یک محدوده قرار داشت، اما مدل نسبت فراوانی نسبت به دو مدل دیگر دارای عملکرد بهتری بود. عرب عامری و همکاران [۹] پتانسیل زمین لغزش را با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و شواهد وزنی (WOE) بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مدل نسبت فراوانی از مدل شواهد وزنی عملکرد بهتری دارد.

تهیه نقشه‌های پتانسیل وقوع زمین لغزش در مشخص کردن مناطق حساس به وقوع زمین لغزش ضروری و از گام‌های نخست در کاهش خسارت است. با استفاده از نقشه‌های احتمال وقوع زمین لغزش به راحتی می‌توان مناطق دارای احتمال خطر زیاد را شناسایی کرد تا از وقوع خسارات جلوگیری شود. برای این کار در این تحقیق، ۸۰ نقطه وقوع زمین لغزش در مسیر سندیج-کامیاران که پیشتر با استفاده از GPS ثبت شده بود، استفاده شد. از این تعداد نقاط وقوع زمین لغزش ۵۵ نقطه برای مدل سازی و ۲۵ نقطه برای اعتبارسنجی استفاده شد. با استفاده از منحنی‌های مشخصه عملکرد سیستم، نتایج مدل‌های به کاررفته در این تحقیق، ارزیابی و راستی‌آزمایی شد. با توجه به معیار ارزیابی استفاده‌شده در این تحقیق (ROC) و داده‌های اعتبارسنجی، مدل تابع WOE از مدل EBF عملکرد بهتری داشت. از طرف دیگر،

بر اساس مساحت اختصاص‌یافته به طبقات پتانسیلی مختلف مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق، مدل EBF نسبت به WOE با اختصاص کمترین مساحت به کلاس پتانسیلی خیلی کم و کم و بیشترین مساحت به کلاس پتانسیلی متوسط تا خیلی زیاد، خوش‌بینانه‌ترین مدل بود. زندی و همکاران [۴] در مطالعه‌ای، حرکت‌های دامنه‌ای جاده‌ای را با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی پیش‌بینی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که الگوریتم‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی مکانی حرکات دامنه‌ای، کارآمد و مفیدند. چن و همکاران [۲۰] نیز در مطالعه‌ای عملکرد تکنیک‌های داده‌کاوی مبتنی بر GIS را برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها بر عملکرد خوب این مدل‌ها تأکید داشتند.

### نتیجه‌گیری

محور ارتباطی سنندج- کامیاران در استان کردستان به طول ۷۵ کیلومتر به دلیل موقعیت جغرافیایی و اهمیت زیاد در حمل‌ونقل بین‌المللی و به‌ویژه دسترسی به بازارهای غرب کشور، از پرترددترین محورهای ارتباطی ایران است. این مسیر در محدوده کوهستانی به دلیل داشتن شیب زیاد دامنه‌ها و ارتفاع زیاد منطقه و در نتیجه ناپایداری دامنه‌ها در بخش‌هایی از مسیر وضعیت نامناسبی دارد. در این پژوهش ابتدا ۸۰ نقطه وقوع زمین‌لغزش در مسیر سنندج- کامیاران که پیشتر با استفاده از GPS ثبت شده بود، استفاده شد. سپس از این تعداد، از ۵۵ نقطه برای مدل‌سازی و از ۲۵ نقطه برای اعتبارسنجی استفاده شد. همچنین در این پژوهش، دو مدل EBF و WOE برای پیش‌بینی پتانسیل خطر زمین‌لغزش استفاده شدند. نقشه‌های حاصل از این دو مدل به پنج طبقه پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شدند که از این میان فقط مناطق با پتانسیل خیلی زیاد مدنظر است. بیشترین مساحت مناطق با پتانسیل خیلی زیاد در مدل EBF مشاهده شد.

در ادامه با استفاده از منحنی‌های مشخصه عملکرد سیستم، نتایج مدل‌های به‌کاررفته در این تحقیق، ارزیابی و راستی‌آزمایی شد. با توجه به معیار ارزیابی به‌کاررفته در این مطالعه (ROC) و داده‌های اعتبارسنجی، مدل تابع WOE عملکرد بهتری از مدل EBF داشت. از طرف دیگر، بر اساس مساحت اختصاص‌یافته به طبقات پتانسیلی مختلف مدل‌های استفاده‌شده در این مطالعه، مدل EBF نسبت به WOE با اختصاص کمترین مساحت به کلاس پتانسیلی خیلی کم و کم و بیشترین مساحت به کلاس پتانسیلی متوسط تا خیلی زیاد، خوش‌بینانه‌ترین مدل بود. همچنین باید اذعان کرد که مناطقی که بر اساس نقشه نهایی از پتانسیل خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش برخوردارند، باید هنگام برنامه‌ریزی بیشتر در نظر گرفته شوند. در پایان، می‌توان

گفت دستیابی به یک نقشه پیش‌بینی مکانی دقیق زمین‌لغزش در مسیرهای ارتباطی به مدیران بخش حمل‌ونقل و برنامه‌ریزان شهری در شناسایی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش برای مدیریت بحران نواحی مستعد کمک شایانی می‌کند. همچنین نقشه پهنه‌بندی که دارای صحت زیاد و معقول در شناسایی و تفکیک مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش باشد، به مهندسان برای معرفی مناطق با حساسیت‌های مختلف وقوع زمین‌لغزش کمک شایانی می‌کند که در برنامه‌ریزی شهری و مسائل آمایش سرزمین و توسعه جغرافیایی و فیزیکی راهگشا خواهد بود. در نهایت برپایه نتایج پژوهش حاضر برخی پیشنهادهای کاربردی برای پژوهش‌های آتی به صورت موردی مطرح می‌شود که عبارت‌اند از:

- پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با استفاده از دیگر مدل‌های داده‌کاوی از جمله الگوریتم درخت تصمیم، الگوریتم بیز، شبکه عصبی، خوشه‌بندی زنجیره‌ای و مقایسه نتایج حاصل از این مدل‌ها با هم؛
- استفاده از مدل‌های تجربی و ریاضی از نظر دقت در کار به منظور شناخت استعداد محل استقرار جاده ارتباطی و سازه‌های دیگر در زمینه حرکت توده‌ای و اعمال مدیریت صحیح (با توجه به اینکه یکی از رویکردهای علم ژئومورفولوژی، رویکرد مدیریت محیطی است)؛
- استفاده از علائم هشداردهنده به رانندگان در نقاطی که احتمال سقوط و واژگونی توده‌های سنگی روی جاده وجود دارد؛
- کاهش بار اضافی دامنه‌ها و نیز در صورت لزوم بتن‌پاشی روی سنگ‌های دامنه به‌ویژه مخروط‌های واریزه‌ای که از ثبات کافی برخوردار نیستند.

#### منابع

- [۱]. رجایی، عبدالحمید (۱۳۷۳). کاربرد ژئومورفولوژی در آمایش سرزمین و مدیریت محیط، تهران: قومس.
- [۲]. روستایی، شهرام؛ مختاری، داوود؛ و خدایی، فاطمه (۱۳۹۴). «کاربرد روش رگرسیون لجستیک در پهنه‌بندی خطر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در جاده‌های کوهستانی (محدوده مورد مطالعه: تنگه دره دیز)»، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۴، ش ۶، ص ۱۰۳-۸۹.
- [۳]. ریاضی، برهان؛ کرمی، نعمت‌الله؛ کرمی، محمود؛ و هوشیاردل، بنفشه (۱۳۸۵). «بررسی اثرات حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی بر حیات وحش جانوری و ارائه رهنمودهای لازم»، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۸، ش ۳، ص ۶۰-۵۳.

- [۴]. زندی، دانش؛ شهابی، هیمین؛ چپی، کامران؛ و شیرزادی، عطالله (۱۳۹۷). پیش‌بینی مکانی حرکت‌های دامنه‌ای جاده‌ای با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی (گردنه صلوات‌آباد سنندج). پایان‌نامه کارشناسی ارشد مخاطرات طبیعی، دانشگاه کردستان.
- [۵]. شادفر، صمد؛ نوروزی، علی‌اکبر؛ قدوسی، جمال؛ و غیومیان، جعفر (۱۳۸۴). «پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه لاکتراشان»، حفاظت خاک و آب، دوره ۱، ش ۳، ص ۱۰-۱.
- [۶]. شیرزادی، عطالله؛ سلیمانی، کریم؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ و چپی، کامران (۱۳۹۶). «معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا به‌منظور پیش‌بینی حاسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار»، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۴، ش ۴۶، ص ۲۲۵-۲۴۶.
- [۷]. شیرزادی، عطالله؛ سلیمانی، کریم؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ کاویان، علی؛ و قاسمیان، بهاره (۱۳۹۴). «مقایسه روش‌های رگرسیون لجستیک، نسبت فراوانی و تحلیل سلسله‌مراتبی در تهیه نقشه حساسیت ریزش سنگ (مطالعه موردی: استان کردستان، گردنه صلوات‌آباد)»، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۱۲، ش ۵، ص ۲۰۳-۱۹۳.
- [۸]. صفاری، امیر؛ و اخدر، آرش (۱۳۹۱). «مقایسه مدل نسبت فراوانی و توابع عضویت فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: جاده ارتباطی مریوان-سنندج)»، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱، ش ۴، ص ۹۶-۷۹.
- [۹]. عرب عامری، علیرضا؛ شیرانی، کورش؛ و رضایی، خلیل (۱۳۹۶). «ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ونک، اصفهان)»، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۸، ش ۱۵، ص ۱۴۳-۱۴۷.
- [۱۰]. فلاح‌تبار، نصراله (۱۳۷۹)، «تأثیر برخی عوامل جغرافیایی بر راه‌های کشور»، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۲، ش ۳۸، ص ۴۷-۵۵.
- [۱۱]. قاسمیان، بهاره؛ عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ و شیرزادی، عطالله (۱۳۹۶). «ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)»، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، ش ۳، ص ۱۵-۳۶.
- [۱۲]. متولی، صدرالدین؛ حسین‌زاده، محمد؛ اسماعیلی، رضا؛ و درفشی، خه‌بات (۱۳۹۴). «ارزیابی دقت روش‌های رگرسیون چندمتغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبخیز طالقان»، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، ش ۱۳، ص ۱-۲۰.

- [۱۳]. موسوی، معصومه؛ و عابدینی، موسی (۱۳۹۲). «پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه‌های آبخیز شهری با استفاده از مدل (WLC) مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر ایزده خوزستان»، دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی، تهران، دانشگاه خوارزمی.
- [14]. Bonham-Carter, G.F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon Press, Canada, p: 398.
- [15]. Carrara, A.; G.B. Crosta.; & P. Frattini. (2003). "Geomorphologic and historical data in assessing andslide hazard", *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, pp: 1125-1142.
- [16]. Chen, W.; Hong, H.; Panahi, M.; Shahabi, H.; Wang, Y.; Shirzadi, A.; & Rezaie, F. (2019). "Spatial Prediction of Landslide Susceptibility Using GIS-Based Data Mining Techniques of ANFIS with Whale Optimization Algorithm (WOA) and Grey Wolf Optimizer (GWO)", *Applied Sciences*, 9(18), p: 3755.
- [17]. Chen, W.; Shahabi, H.; Zhang, S.; Khosravi, K.; Shirzadi, A.; Chapi, K.; Pham, B.; Zhang, T.; Zhang, L.; Chai, H.; & Ma, J. (2018). "Landslide Susceptibility Modeling Based on GIS and Novel Bagging-Based Kernel Logistic Regression", *Applied Sciences*, 8(12), p: 2540.
- [18]. Chen, W.; Xie, X.; Peng, J.; Wang, J.; Duan, Z.; & Hong, H. (2017). "GIS-based landslide susceptibility modelling: a comparative assessment of kernel logistic regression, Naïve-Bayes tree, and alternating decision tree models", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, pp: 1-24.
- [19]. Chen, W.; Zhang, S.; Li, R.; Shahabi, H. (2018). "Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling", *Science of the Total Environment*, 644, pp: 1006-1018.
- [20]. Constantin, M.; Bednarik, M.; Jurchescu. M.C.; & Vlaicu. M. (2011). "Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania)", *Environment. Earth Sci*, 63, pp: 397-406.
- [21]. Crosby, D. A. (2006). *The effect of DEM resolution on the computation of hydrologically significant topographic attributes*. M.S. Thesis Arts, Department of Geography, College of Arts and Sciences, University of South Florida.
- [22]. Devkota, C. K.; Regmi, D. A.; Pourghasemi, R. H.; Yohida, K.; Pradhan, B.; Ryu, C. L.; Dhital, R. M.; & Althuwaynee, F. O. (2012). "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(1), pp: 135-165.
- [23]. Goetz, J. N.; Brenning, A.; Petschko, H.; & Leopold, P. (2015). "Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling", *Computers & Geosciences*, 81, pp: 1-11.
- [24]. Huang, F.; Chen, L.; Yin, K.; Huang, J.; & Gui, L. (2018). "Object-oriented change detection and damage assessment using high-resolution remote sensing images, Tangjiao Landslide, Three Gorges Reservoir, China", *Environmental Earth Sciences*, 77, p: 183.

- [25]. Hunger, O.; Evans, S.J.; Bovis, M.U.; & Hutchinson, J.N. (2001). "A review of the classification of landslides of the flow type Environ", *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, pp: 221-238
- [26]. Jebur, M.; Pradhan, B.; & Tehrany, M. (2014). "Manifestation of LiDAR-derived parameters in the spatial potential in the area of Pohang City, Korea", *Journal of Hydrology*, 399, pp: 158-172.
- [27]. Kavzoglu, T.; Kutlug Sahin, E; & Colkesen, I. (2015). "An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district", *Natural Hazards*, 76 (1), pp: 471 - 496.
- [28]. Kornejady, A.; Ownegh, M.; & Bahremand, A. (2017). "Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods", *Catena*, 152, pp:144-162.
- [29]. Nefeslioglu, H.A.; Duman, T.Y.; & Durmaz. S. (2008). "Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey)", *Geomorphology*, 94, pp: 401-418.
- [30]. Oh, H. J.; Kadavi, P. R.; Lee, C. W.; & Lee, S. (2018). "Evaluation of landslide susceptibility mapping by evidential belief function, logistic regression and support vector machine models. *Geomatics*", *Natural Hazards and Risk*, 9(1), pp: 1053-1070.
- [31]. Pontius, R.G.; & L.C. Schneider. (2001). "Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture*", *Ecosystems and Environment*, 85(1), pp: 239- 248.
- [32]. 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, pp: 221-236.
- [33]. Qing, F.; Wie, C.; & Haeyuan, H. (2016). "Application of frequency ratio weights of evidence and evidential belief function model in land slide susceptibility mapping", *Geocarto International*, (6)32, pp: 619 – 639.
- [34]. Regmi, A.D.; Devkota, K.C.; Yoshida, K.; Pradhan, B.; Pourghasemi, H.R.; Kumamoto, T. & Akgun. A. (2014). "Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya", *Arabian Journal of Geosciences*, 7, pp: 725-742.
- [35]. Roodposhti, M. S.; Safarrad, T.; & Shahabi, H. (2017). "Drought sensitivity mapping using two one-class support vector machine algorithms", *Atmospheric Research*, 193, pp: 73-82.
- [36]. Shahabi, H.; Khezri, S.; Ahmad, B. B.; & Hashim, M. (2014). "Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: a comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models", *Catena*, 115, pp: 55-70.
- [37]. Shirzadi, A.; Bui, D. T.; Pham, B. T.; Solaimani, K.; Chapi, K.; Kavian, A.; & Revhaug, I. (2017). "Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach", *Environmental Earth Sciences*, 76(2), pp: 60.-71.

- 
- [38]. Song, K.Y.; Oh, J.; Choi, J.; Park, I.; Lee, C.; & Lee, S. (2012). "Prediction of landslides using ASTER imagery and data mining models", *Advances in Space Research*, 49, pp: 978-993.
- [39]. Yilmaz, C.; Topal, T.; & Suzen, M.L. (2012). "GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey)", *Environmental Earth Science*, 65, pp: 2161- 2178.
- [40]. Zhang, K.; Wu, X.; Niu, R.; Yang, K.; & Zhao, L. (2017). "The assessment of landslide susceptibility mapping using random forest and decision tree methods in the Three Gorges Reservoir area, China", *Environmental Earth Sciences*, 76(11), pp: 405-414.