

## پهنه بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان، تراکم سطح و هیبریدی قضیه بیز (مطالعه موردی: حوضه بقیع، نیشابور)

مهناز ناعمی تبار\* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.  
محمد علی زنگنه اسدی - دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، سبزوار، ایران.  
مختار کرمی - استادیار هیدرو اقلیم دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، سبزوار، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶      تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

### چکیده

زمین لغزش‌ها همواره نقش موثری در تحول و تکامل دامنه‌ها داشته و مخاطرات جدی را در بیشتر نقاط زمین موجب شده‌اند. شناسایی عوامل موثر در وقوع زمین لغزش و پهنه‌بندی خطر آن جهت برنامه ریزی و انجام اقدامات کنترلی از اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. در این پژوهش، حساسیت زمین لغزش با استفاده از سه مدل عامل اطمینان، تراکم سطح و هیبریدی پهنه‌بندی گردید و مناسب‌ترین مدل معرفی شد. سپس با از تصاویر ماهواره‌ای ETM+، نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰، نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰، نقاط لغزشی مشخص گردید. در این پژوهش با بررسی ۱۹ پارامتر موثر در رخداد زمین لغزش شامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص انحنای سطح، شاخص انحنای مقطع، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه مورد بررسی قرار گرفتند. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم افزار ArcGIS 10.4 به عوامل موثر با استفاده از نظرات کارشناسی اقدام به تهیه وزن کلاس‌ها و در نهایت تهیه نقشه‌های پهنه بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش‌های آماری تراکم سطح، فاکتور اطمینان و هیبریدی بیز در پنج کلاس ریسک خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی گردید. جهت صحت سنجی روش‌ها از شاخص‌های جمع کیفی (QS)، دقت (P) و شاخص نسبت تراکمی (DR) استفاده شده است. مقادیر شاخص‌های مجموع کیفیت و دقت که بیانگر کارایی مدل‌ها در پهنه بندی حساسیت زمین لغزش می‌باشند، به ترتیب برای مدل‌های تراکم سطح (۰/۲۱ - ۰/۰۴)، فاکتور اطمینان (۰/۳۹ - ۰/۰۹) و هیبریدی (۰/۸۸ - ۰/۳۳)، به دست آمد. مقادیر بالای شاخص‌ها در مدل هیبریدی بیانگر کارایی بیشتر این روش نسبت به روش‌های تراکم سطح و فاکتور اطمینان در تهیه نقشه پهنه بندی می‌باشد. روند صعودی نسبت تراکمی برای گستره‌های مواجه با خطر خیلی کم تا گستره‌های مواجه با خطر خیلی زیاد در هر سه روش، نشان از صحت روش‌های مورد استفاده می‌باشد. طبق نتایج عوامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب و جهت شیب بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش داشته‌اند.

واژگان کلیدی: پهنه بندی، زمین لغزش، روش تراکم سطح، روش فاکتور اطمینان، روش هیبریدی بیز.

## مقدمه

زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات ژئومورفیک می‌باشند که در اثر تعامل انواع عوامل محیطی خصوصا در مناطق کوهستانی با ویژگی‌های خاص مورفومتریکی رخ می‌دهند (شیرانی، ۱۳۹۷، ۹۶). روابط فضایی موجود بین منطقه وقوع زمین لغزش و عوامل موثر محیطی، عناصر کلیدی در بررسی حساسیت زمین لغزش است (ساموترا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵، ۳۰۸). از آنجا که پیش بینی زمان رخداد زمین لغزش‌ها امکان پذیر نیست، شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش و پهنه‌بندی این مناطق بر اساس پتانسیل خطر اهمیت این مطالعات را آشکار می‌کند. اکنون مدل‌های مختلفی برای پهنه بندی خطر زمین لغزش در ایران و مناطق مختلف دنیا ارائه شده است که کارایی هر کدام از آن‌ها در مناطق مختلف متفاوت است (رگمای و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴). از آنجا که پیش بینی زمان رخداد زمین لغزش‌ها از توان علم و دانش خارج است، لذا با شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و رتبه‌بندی آن می‌توان تا حدود زیادی خسارات ناشی از بروز زمین لغزش را محدود نمود (ارتر و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹). از عوامل مؤثر در ایجاد زمین لغزش‌ها می‌توان به پارامترهای مربوط به عوامل هیدرولوژی، اقلیم، فیزیوگرافی، زمین شناسی، خاک و پوشش گیاهی اشاره کرد (پتسچیکو و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۴، ۱۱۹). تهیه نقشه حساسیت مهم‌ترین گام در کاهش و مدیریت خطرات این پدیده محسوب می‌گردد. به منظور اینکه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت با دقت بیشتری تهیه شوند لازم است از لایه‌های اطلاعاتی بیشتری که احتمال می‌رود در رخداد زمین لغزش مؤثر باشند استفاده و با مدل‌های مناسب اقدام به پهنه‌بندی نقشه حساسیت نسبت به زمین لغزش گردد. بطور کلی دستورالعمل مشخص و یکپارچه‌ای که بین همه محققین مورد قبول باشد، برای انتخاب عوامل مؤثر در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش وجود ندارد (بابلی موخر و همکاران، ۱۳۹۷، ۹۲).

## مبانی نظری

تاکنون مطالعات فراوانی درباره زمین لغزش‌ها در کشور و جهان صورت گرفته است. صفاری و همکاران (۱۳۹۱) اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در جاده ارتباطی مریوان - سنندج با استفاده از مدل نسبت فراوانی و توابع عضویت فازی نمودند و دریافته‌اند که مدل نسبت فراوانی روش مناسب‌تری برای پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها در این جاده ارتباطی است. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل هیبریدی قضیه بیز و ANP در حوضه اهر چای به نتیجه رسیدند که ۳۴/۰۲٪ از اراضی محدوده مورد مطالعه از پتانسیل بسیار بالایی برای وقوع زمین لغزش برخوردار می‌باشند و درصد قابل توجهی از زمین لغزش‌ها در طبقه با حساسیت زیاد قرار دارند. محمدی ثابت و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی و کارآمدی مدل‌های آماری رگرسیون لجستیک و ارزش اطلاعاتی در پهنه‌بندی بهینه خطر زمین لغزش در بخش اراضی جنوب چالوس پرداختند. قویمی پناه و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی و مقایسه صحت دو روش سلسله مراتبی و رگرسیون چند متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز ولی عصر در استان اردبیل پرداختند. بر پایه این پژوهش روش رگرسیون چند متغیره نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی در منطقه مورد مطالعه دقت بیشتری دارد. عقیلی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی تحت عنوان پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از GIS و مدل آماری دو متغیره ارزش اطلاعات و تراکم سطح در حوضه آبخیز گلورد نکا مازندران به این نتایج دست یافتند که پارامترهای شیب، جهت شیب، وجود گسل، کاربری از نوع کشاورزی و لیتولوژی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. به منظور مقایسه روش‌ها نسبت به یکدیگر و ارزیابی کارایی آن‌ها، شاخص‌های مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار بالاتر این شاخص‌ها برای مدل ارزش اطلاعات کارایی بیشتر آن

1 . Samodra et al

2 . Regmi et al

3 . Erter et al

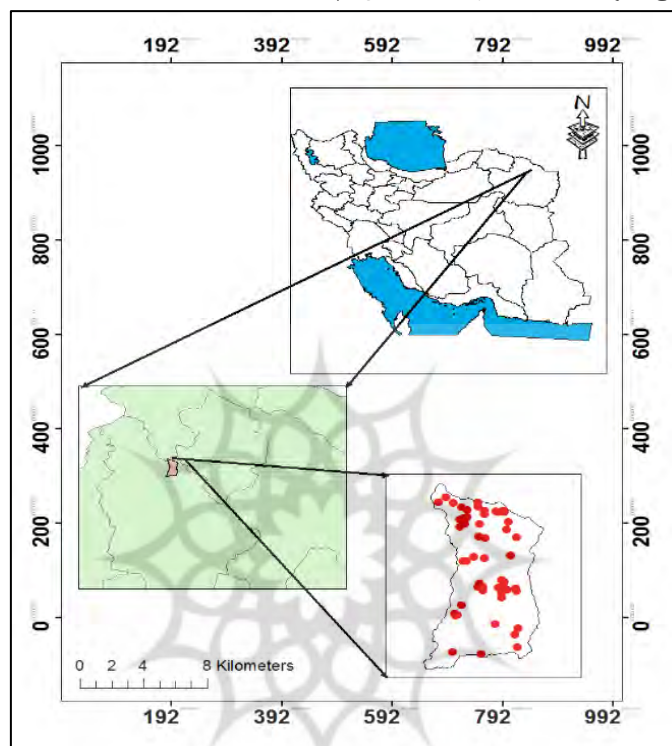
4 . Petschiko

را نسبت به مدل تراکم سطح جهت پهنه‌بندی زمین لغزش نشان میدهد. ثابتی و همکاران (۲۰۱۹) اقدام به پایش و رفتار سنجی جابجایی سطحی ناشی زمین لغزش روستای ماسوله با استفاده از دو روش تداخل سنجی راداری با استفاده از ۱۱ تصویر راداری ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ و روش مشاهدات ژئودیتکی نمودند. نتایج حاصل از بررسی جابجایی سطح زمین در هر دو روش یاد شده بسیار مشابه بوده و جابجایی قابل ملاحظه‌ای در قسمت پایین دست زمین لغزش نشان داد. فیض الله و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی تحت عنوان پهنه بندی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از پرسپترون چند لایه از نوع پیش خور با الگوریتم پس انتشار در حوضه رودخانه سنگورچای به این نتایج دست یافتند که ساختار زمین شناسی شکل گرفته از مارن خاکستری و توف‌های آتشفشانی در کنار منابع رطوبتی بالا باعث شده که ارتفاعات کوه‌های گنجگاه و اسلام آباد در محدوده جنوب غربی حوضه از قابلیت بالایی در رخداد زمین لغزش برخوردار شوند. حمزه و همکاران (۱۳۹۹) پهنه بندی خطر رانش زمین با استفاده از روش‌های همپوشانی وزنی و تحلیل شبکه در منطقه نصرآباد استان گلستان به این نتایج دست یافتند که حدود ۵۰ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل بالای زمین لغزه است و بیشتر زمین لغزش‌ها در مناطق با دامنه‌های پرشیب یا واحدهای سنگی نفوذ ناپذیر نزدیک به سطح زمین رخ داده است. همچنین به کارگیری روش همپوشانی وزنی به همراه تحلیل شبکه توانسته است به عنوان ابزاری کارآمد در پهنه‌بندی خطر زمین لغزه مورد استفاده قرار گیرد و به خوبی قابلیت و توانایی مدل تحلیلی پژوهش را به اثبات برساند. بدنریک و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) با استفاده از توزیع دو متغیره آماری به ارزیابی حساسیت زمین لغزش‌ها در منطقه کارل اونری در اسلوواکی پرداختند و برای محاسبه وزن لایه‌های مورد بررسی استفاده کرده و در نهایت نقشه پهنه‌بندی از منطقه را ارائه کردند. ویرک و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری سنجنده سنتینل ۱ با روش PSInSAR استفاده نمودند. نتایج آنها بیانگر وجود تغییرات سطح زمین در محدوده زمین لغزش و مناطق مجاور آن در بازه ۲۶ ماهه تحقیق بود. از دیگر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به تحقیقات کاوزوگلو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۵)، تسانگاراتوس و لی<sup>۴</sup> (۲۰۱۵)، روش آماری دو متغیره خو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲)، جی وانگ و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۵)، روش آماری چند متغیره وانگ و چن<sup>۷</sup> (۲۰۱۵)، نسبت فراوانی تای فام و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۵) اشاره نمود. هدف از پژوهش حاضر شناسایی مهمترین عوامل موثر زمین لغزش در حوضه آبخیز مورد مطالعه و پهنه‌بندی زمین لغزش‌های رخ داده در این منطقه بوده تا بتواند گامی در جهت مرتفع نمودن مشکلات احتمالی در اثر وقوع این پدیده بر دارد. مدل‌های در نظر گرفته شده برای انجام این کار یک مدل ترکیبی از روش‌های آماری (قضیه بیز) و مدل‌های عامل اطمینان و تراکم سطح می‌باشد که از این نظر نگرشی نو در امر پهنه‌بندی پتانسیل زمین لغزش است چرا که تا کنون این سه مدل به صورت ترکیبی برای پهنه‌بندی زمین لغزش استفاده نشده‌اند.

1. Bednarik, M. et al
2. Virk et al
3. Kavzoglu et al
4. Tsangaratos et al
5. Xu et al
6. Jie Wang et al
7. ang & chen
8. Thai Pham et al

## منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بقیع در شمال شهرستان نیشابور و در بخش سر ولایت در مدار  $30^{\circ} 38' 36''$  شمالی و  $59^{\circ} 38' 58''$  شرقی واقع شده است. روستاهای بجنوی علیا و سفلی، قرونه و بقیع درون منطقه مطالعاتی واقع شده و محدوده مورد مطالعه از غرب به روستای برمهان، از جنوب به روستای بار و از جنوب غرب به روستای تنگه علیا منتهی می‌گردد. مساحت حوضه معادل  $6367$  هکتار و ارتفاع متوسط  $2209$  متر است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

## روش تحقیق

در این پژوهش از نقشه زمین شناسی در مقیاس  $1/25000$ ، تصاویر ماهواره‌ای  $ETM^+$ ، نقشه توپوگرافی با مقیاس  $1/50000$  استفاده شده است. در ابتدا بر اساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی عوامل موثر بر زمین لغزش‌های منطقه شامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، انحنا سطح<sup>۲</sup> و انحنا مقطع<sup>۳</sup> شناسایی شدند. نقشه‌های مربوط به عوامل موثر در رخداد زمین لغزش در محیط نرم افزار ArcGIS10/4 تهیه و جهت پردازش آماده گردیدند. از نقشه توپوگرافی  $1/50000$  جهت تهیه نقشه مدل رقمی ارتفاعی با قدرت تفکیک  $20$  متر استفاده گردید. طبقات ارتفاعی از مدل رقمی ارتفاعی<sup>۴</sup> استخراج گردید (شکل ۲). شاخص‌های ژئومورفومتریک موثر در وقوع زمین لغزش شامل شیب (شکل ۳)، جهت شیب (۴)، انحنا سطح (شکل ۵)، انحنا مقطع (شکل ۶) و شاخص رطوبت

1. Topography Wetness Index
2. Plan Curvature
3. Profile Curvature
4. Digital Elevation Mode

توپوگرافی (شکل ۷) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با قدرت تفکیک  $30 \times 30$  استخراج شدند. برای تهیه نقشه فاصله از گسل از داده‌های ماهواره‌ای  $ETM^+$  استفاده شده است (شکل ۸). نقشه فاصله از جاده (شکل ۹) و فاصله از شبکه زهکشی (شکل ۱۰) با طبقه بندی فواصل معین از شبکه جاده و شبکه هیدروگرافی رقومی شده از نقشه توپوگرافی منطقه تهیه شدند. بر اساس طبقه بندی نظارت نشده تصویر ماهواره‌ای تصحیح شده لندست  $ETM^+$  و بازدید کنترل صحت، نقشه کاربری اراضی منطقه تهیه شد (شکل ۱۱). همچنین بر اساس تفکیک و رقومی کردن پلیگون‌ها، واحدهای سنگ شناسی تهیه شد (شکل ۱۲). پس از تصحیحات لازم و زمین مرجع کردن تصویر NDVI مقدار TM محاسبه شد که به عنوان شاخصی برای وجود گیاهان در آبراهه‌ها از آن استفاده شده است (شکل ۱۳).

$$\text{Slope} = \arctan \sqrt{d^2 + e^2} \quad \text{رابطه ۱: شیب}$$

$$\text{Aspect} = 180 - \arctan\left(\frac{p}{q}\right) + 90 \times \frac{p}{|p|} \quad \text{رابطه ۲: جهت شیب}$$

$$\text{Plan Curvature} = -\frac{q2 \times r - 2 \times p \times q \times s + p2 \times t}{(\sqrt{r^2 + p2 + q2})^3} \quad \text{رابطه ۳: انحنا سطح}$$

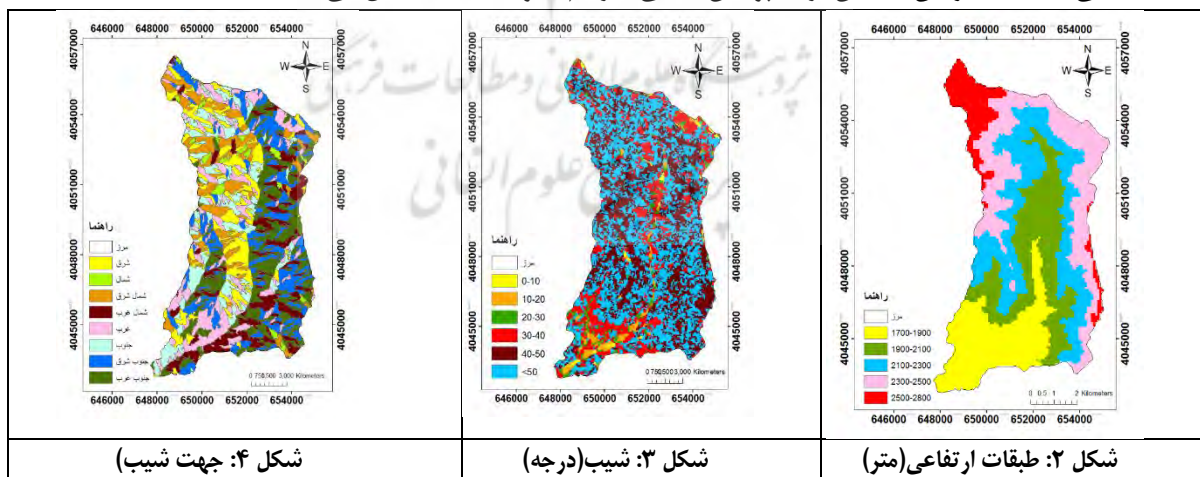
$$\text{Profile Curvature} = -\frac{q2 \times r + 2 \times p \times q \times r \times s + q2 \times t}{(p2 + q2) \times (\sqrt{1 + p2 + q2})^3} \quad \text{رابطه ۴: انحنا مقطع}$$

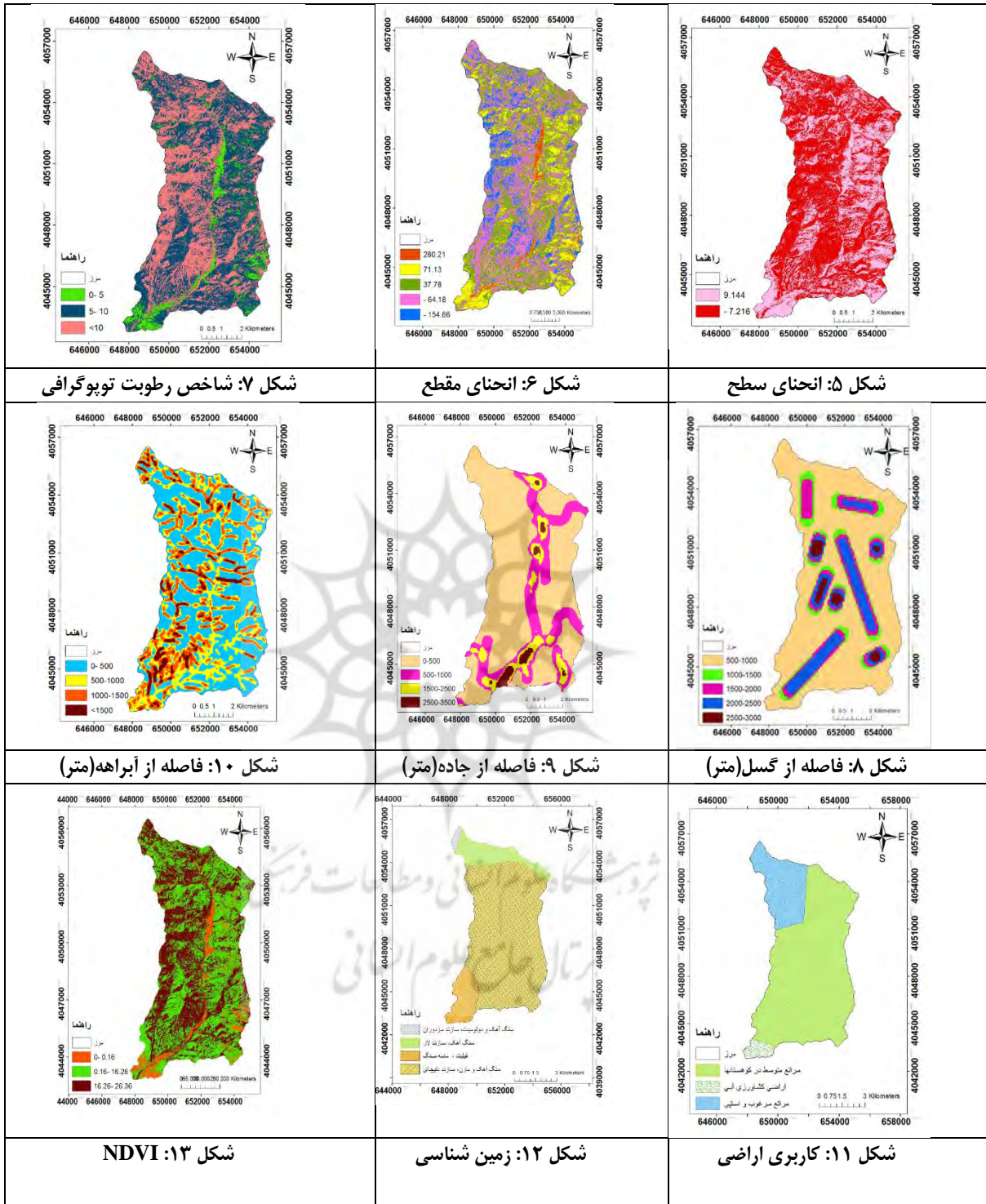
$$\text{TWI} = \ln(As / \tan \beta) \quad \text{رابطه ۵: شاخص رطوبت توپوگرافی}$$

$$\text{NDVI} = \frac{IR - R}{IR + R} \quad \text{رابطه ۶: شاخص تراکم پوشش گیاهی (NDVI)}$$

$d, p, q, r, s, t$  ضرایبی هستند که در نرم افزار محاسبه می‌شوند.  $As$  مساحت حوضه آبخیز و  $\beta$  گرادبان شیب بر حسب درجه می‌باشد. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی از روش‌های دو متغیره تراکم سطح، فاکتور اطمینان و مدل هیبریدی استفاده گردید.

$IR$  باند مادون قرمز و  $R$  باند قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. از دیدگاه نظری مقدار این شاخص در محدوده  $-1$  و  $+1$  می‌باشد. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی مترامک بسوی عدد یک میل می‌کند.





روش آماری دو متغیره تراکم سطح<sup>۱</sup>

در این روش با استفاده از روابط ۶ و ۷ برای هر یک از پارامترها تراکم زمین لغزش محاسبه شد و سپس اقدام به تهیه نقشه پهنه بندی زمین لغزش می‌شود (لی و همکاران<sup>۲</sup>: ۲۰۰۱، ۱۰۹۵).

$$D_{area} = \frac{Npix(Sxi)}{Npix(Xi)} \quad \text{رابطه ۶:}$$

$$W_{area} = 1000 \left[ D_{area} \frac{\sum Npix(Sxi)}{\sum Npix(Xi)} \right] \quad \text{رابطه ۷:}$$

$D_{area}$  تراکم زمین لغزش در هر رده از پارامتر،  $Npix(Sxi)$  تعداد پیکسل‌های زمین لغزش در هر رده از پارامتر مشخص،  $Npix(Xi)$  تعداد کل پیکسل‌ها در هر رده از پارامتر مشخص،  $W_{area}$  وزن متغیر هر رده از هر پارامتر.

## روش آماری دو متغیره فاکتور اطمینان

در این پژوهش به منظور ارزیابی همبستگی بین زمین لغزش و فاکتورهای انتخاب شده از مقادیر وزنی حاصل از مدل فاکتور اطمینان در قالب تحلیل‌های آماری دو متغیره استفاده شده است. همچنین از اوزان محاسبه شده توسط این مدل برای آماده سازی و تبدیل نقشه‌های عامل (طبقات با وزن منفی عدد صفر و طبقات با وزن مثبت عدد یک) برای ورود به آزمون استقلال شرطی نیز استفاده گردید. CF یکی از توابع مطلوب برای مدیریت عدم اطمینان متغیرهای ورودی در سامانه‌های قانون مدار و داده‌های نامتجانس یا ناهمگن می‌باشد (پور قاسمی و روسی، ۲۰۱۷). این مدل مشکل ترکیب لایه‌های اطلاعاتی ناهمگن را برطرف می‌کند. در واقع تفاوت اصلی این مدل با دیگر مدل‌های دو متغیره نحوه تلفیق نقشه‌ها در آن است. به این صورت که ابتدا نقشه‌ها کلاس بندی شده، سپس با استفاده از رابطه (۸) وزن هر یک از پیکسل‌ها به دست می‌آید.

$$F = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{PPa-PPs}{PPa(1-PPs)} & \text{if } PPs \geq PPs \\ \frac{-PPa-PPs}{PPs(1-PPa)} & \text{if } PPa < PPs \end{array} \right\} \quad \text{رابطه ۸:}$$

PPa نسبت تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس به کل پیکسل‌های آن کلاس، PPs نسبت کل پیکسل‌های لغزشی منطقه به کل پیکسل‌های نقشه می‌باشد. با کمک این فرمول هر کلاس به صورت ۱- و ۱+ ارزش گذاری می‌شود. اگر ارزش کلاس مربوطه مثبت باشد نشان دهنده این است که اطمینان وقوع زمین لغزش بالاست و اگر ارزش کلاس مربوطه منفی باشد یعنی اطمینان وقوع لغزش کم می‌باشد و اگر ارزش آن کلاس صفر باشد یعنی در اینجا اطلاعات کافی در مورد متغیر وجود نداشته است و بنابراین عدم اطمینان در وقوع زمین لغزش وجود دارد. در مرحله بعد ترکیب لایه‌ها بر اساس قانون فاکتور اطمینان انجام می‌گیرد، بدین صورت که یک نقشه را با عنوان X و نقشه دیگر را به عنوان Y در نظر گرفته و آنها را طبق رابطه (۹) ترکیب می‌کند که سه فرمول برای حالت‌های مختلف X و Y وجود دارد. دوباره نقشه X و Y جدید بر اساس همین رابطه با هم ترکیب می‌شوند. این ترکیب نقشه‌ها تا آخرین نقشه انجام شده و وزن نهایی محاسبه می‌گردد (گاپتا و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۰، ۱۲۱).

$$Wf = \frac{(TWi)-(TWimin)}{(Twimax)-(TWimin)} \times 100 \quad \text{رابطه ۹:}$$

1. Density Area
2. Lee etal

WF مقدار وزن عامل‌ها برای هر عامل،  $TW_i$  مجموع مقادیر  $W_i$  مربوط به سلول‌هایی که در محدوده زمین لغزش‌ها قرار گرفته‌اند و برای هر عامل محاسبه می‌شوند.  $TW_{i\min}$  کمینه مجموع مقادیر  $W_i$  در میان عوامل انتخاب شده و  $TW_{i\max}$  بیشینه مجموع مقادیر  $W_i$  در میان عوامل انتخاب شده است.

### مدل قضیه بیز یا وزن شواهد

مدل وزن شواهد<sup>۲</sup> بر پایه یک سری فرمول‌های آماری پایه ریزی شده است. در این مدل بر اساس دو دسته اطلاعات کار مدل سازی و پیش بینی صورت می‌گیرد. پارامترهای موثر در وقوع یک پدیده (زمین لغزش) یا عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین لغزش)، سطح وقوع پدیده در گذشته (زمین لغزش‌های رخ داده). در این حالت احتمال وقوع زمین لغزش در آینده بستگی به شرایطی دارد که هنگام وقوع آن در گذشته وجود داشته است (پیاستی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲: ۲۰۰). این مدل طبق رابطه ۱۰ تعریف می‌شود. در این رابطه عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین لغزش)  $B_i$ ، کلاس‌های هر رابطه  $B_i$ ، زمین لغزش‌های رخ داده  $S$  در نظر بگیریم تئوری بیز برای محاسبه احتمال شرطی وقوع زمین لغزش ( $S$ ) در کلاس معین ( $B_i$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P(S/B_i) = \frac{P(B_i/S) \times P(S)}{P(B_i)} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

$P(S)$  احتمال وقوع پیشامد  $S$  در محدوده مورد مطالعه ( $AS$ )،  $P(B_i)$  احتمال وقوع کلاس  $B_i$  در محدوده مورد مطالعه ( $AS$ )،  $P(B_i/S)$  احتمال وقوع پیشامد  $B_i$  به شرطی که پیشامد  $S$  اتفاق افتاده باشد،  $P(S/B_i)$  احتمال وقوع پیشامد  $S$  به شرطی که پیشامد  $B_i$  اتفاق افتاده باشد.

احتمال شرطی وقوع زمین لغزش زمانی که کلاس  $B_i$  اتفاق نیفتاده باشد بصورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$P(S/B_i^{\wedge}) = \frac{P(B_i^{\wedge}/S) \times P(S)}{P(B_i^{\wedge})} \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

$P(S)$  احتمال وقوع پیشامد  $S$  در محدوده مورد مطالعه ( $AS$ )،  $P(B_i^{\wedge}/S)$  احتمال شرطی کلاس  $B_i$  به شرطی که  $S$  اتفاق افتاده باشد. احتمال اولیه نبود کلاس  $B_i$  در محدوده مورد مطالعه ( $AS$ ). در این مدل وزن کلاس‌های هر پارامتر به وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی  $W^+$  و  $W^-$  از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آنها محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ وزن نهایی کلاس‌ها حاصل می‌شود.

$$W^+ = \ln(P/B_i | S) / P(B_i) \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

$$W^- = \ln(P/B_i^{\wedge} | S) / P(B_i^{\wedge}) \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

$$C = W^+ - W^- \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

$$W_{\text{final}} = C / SC \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

$LN$  لگاریتم بر مبنای عدد نپر،  $C$  تفاضل وزن‌های مثبت و منفی،  $W_{\text{final}}$  وزن نهایی استاندارد شده،  $SC$  انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۵، ۱۵۰).

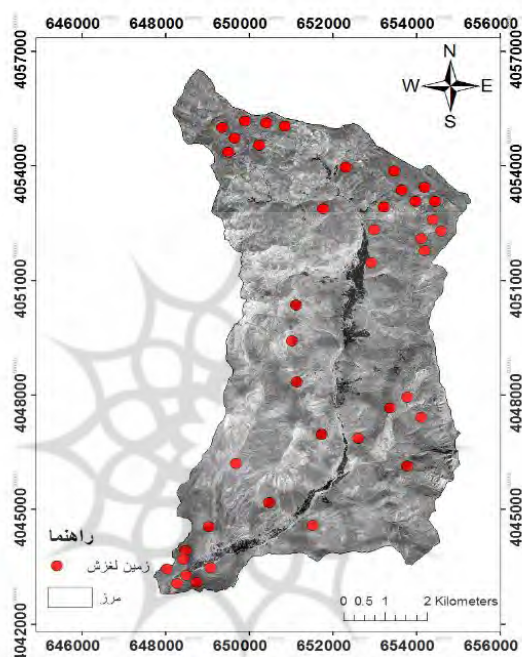
1. Gupta et al
2. weight of evidence (WofE)
3. Piacentini et al



## بحث و یافته‌ها

### نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

نقشه پراکنش زمین لغزش مهم‌ترین بخش کار در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌باشد. نقشه‌های پراکنش زمین لغزش‌ها، پایه‌ای برای اغلب روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش می‌باشند. با وجود این، آن‌ها می‌توانند به عنوان یک فرم مقدماتی از نقشه خطر نیز مورد استفاده قرار گیرند. برای تهیه زمین لغزش‌های منطقه از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل استفاده شده است. زمین لغزش‌ها ۳۱٪ از مساحت محدوده مورد مطالعه را اشغال می‌کند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

### ارزیابی و صحت سنجی روش‌های آماری

در این مرحله با تلاقی نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش‌های آماری ارزش اطلاعات، فاکتور اطمینان و قضیه بیز ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش انجام گرفت. استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم (DI)، به منظور مقایسه بین پهنه‌های خطر در هر روش و شاخص‌های مجموع کیفیت (QS)<sup>۲</sup> و دقت (P)<sup>۳</sup> برای مقایسه روش‌ها نسبت به هم کاربرد دارند، به عبارتی، شاخص مجموع کیفیت و دقت، مدل مناسب منطبق با منطقه مورد بررسی و شاخص نسبت تراکم، دقت تفکیک بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر روش از مدل‌های پهنه‌بندی را معرفی می‌کند.

برای تعیین مجموع کیفیت (QS) ابتدا نسبت تراکم محاسبه شد که طبق رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود (جی، ۱۹۹۲)

1. Density Area
2. Quality Summation
3. Percision
4. Guzzetti et al
5. Gee

$$DR = \frac{\frac{\sum_i S_i}{\sum_i^n S_i}}{\frac{\sum_i A_i}{\sum_i^n A_i}} \quad \text{رابطه ۱۶:}$$

$S_i^n$  مجموع مساحت زمین لغزش‌های واقع در هر رده خطر،  $A_i$  مساحت رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی،  $n$  تعداد رده‌های خطر می‌باشد. هرچه تفکیک بین رده‌های خطر توسط شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش از دقت بالاتری برخوردار است. مقدار مجموع کیفیت (QS) نشان دهنده درستی یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش بینی خطر رانش زمین در منطقه است. معمولاً مقدار این شاخص در روش‌های مختلف در گستره صفر و هفت قرار می‌گیرد. گرچه از نظر تئوری، حدی برای آن وجود ندارد. در ارزیابی روش‌ها هر چه مقدار مجموع کیفیت (QS) بیشتر باشد، روش از درستی و مطلوبیت بیشتری در تفکیک برخوردار است. مقدار مجموعه کیفیت از رابطه ۱۷ به دست می‌آید (جی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱: ۹۴۷).

$$QS = \sum_{i=1}^n ((Dr - 1)2 \times s) \quad \text{رابطه ۱۷:}$$

QS مجموع کیفیت، Dr نسبت تراکم، S نسبت مساحت هر رده خطر نسبت به مساحت کل منطقه، n تعداد کلاس خطر. دقت روش (P) عبارت است از مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به مساحت آن پهنه‌ها (جاده و همکاران<sup>۲، ۳</sup>، ۱۹۹۳: ۲).

$$P = KS/S \quad \text{رابطه ۱۸:}$$

P دقت روش در پهنه‌بندی خطر زیاد و خیلی زیاد، KS مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، S مساحت پهنه‌های خطر مربوطه.

نتایج حاصل از اولویت‌بندی پارامترها نشان داد که عوامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب و جهت شیب بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش داشته‌اند و عوامل انحنای سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از جاده، NDVI و انحنای مقطع در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. برای به دست آوردن وزن هر یک از کلاس‌های عوامل، نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها، با نقشه‌های عوامل تاثیرگذار بر رخداد زمین لغزش‌ها تلفیق شده و تراکم لغزش‌ها در هر یک از طبقه‌های عامل‌های تاثیرگذار به دست آمد. در نهایت با اعمال فرمول‌های ۶ و ۷ وزن کلاس‌های معیارها با مدل تراکم سطح، با اعمال فرمول‌های ۸ و ۹، وزن کلاس‌های معیارها با روش ارزش اطلاعات و با اعمال فرمول ۱۰ وزن کلاس‌ها به دست آمد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: وزن دهی عوامل موثر در وقوع زمین لغزش با مدل‌های عامل اطمینان، تراکم سطح و هیبریدی (قضیه بیز)

فاکتور	کلاس	مساحت (%)	مساحت لغزش (%)	WDA (عامل اطمینان)	WCF (تراکم سطح)	WofE (هیبریدی قضیه بیز)
انحنا سطح	۹/۱۴۴	۴۵	۵۱	۰/۳۳۳	۰/۰۵۸	۵۳/۷
	-۷/۲۱۶	۵۵	۴۹	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۴۵/۰۵
فاصله از آبراهه	۰-۵۰۰	۴۱	۳۳	۰/۱۶۰	۰/۴۱۲	۰/۵۳۰۱
	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۷	۳۰	۰/۱۵۴	۰/۳۶۰	۰/۲۲۱
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۹	۲۳	۰/۱۱۰	۰/۰۸۸	۲۱/۸۳۳

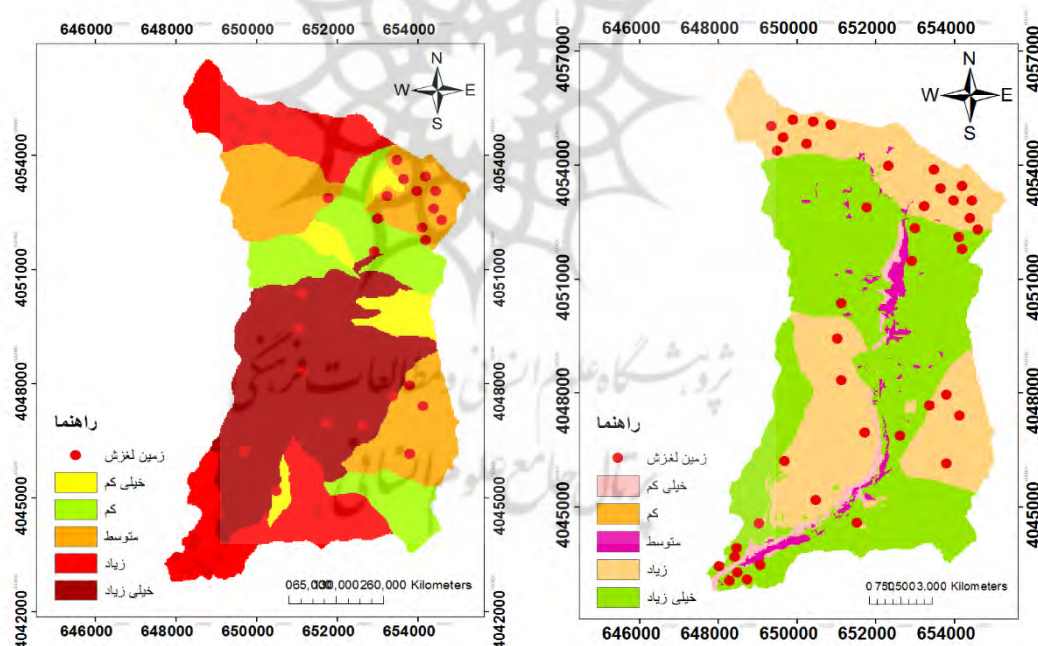
1. Gee
2. Percision
3. Jade et al

	<۱۵۰۰	۱۳	۱۴	۰/۰۳۳	۰/۰۷۱	۲/۰۲۳
فاصله از گسل	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰	۲۹	۰/۰۶۶	۰/۰۵۵	۵۱/۴۴۲۱
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۷	۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	۱۵/۸۱۲
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۲۷	۲۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	۲۴/۸۱۰۱
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۳۳	۱۳	۰/۰۲۳	۰/۰۱۵	۱/۶۶۰۷
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۱۳	۹	۰/۰۳۳	۰/۴۳	۱/۲۶۹۰
لیتولوژی	سنگ آهک و دولومیت (سازند مزدوران)	۲۲	۱۸	۰/۰۹۶	۰/۵۱۶	۲۱/۳۳
	سنگ آهک (سازند لار)	۲۰	۱۷	۰/۰۸۸	۰/۴۳۱	۱۱/۶۶۷۶
	فیلیت، ماسه سنگ	۲۱	۲۰	۰/۰۵۱	۰/۳۱۳	۱۳/۲۵۴۱
	سنگ آهک و مارن (سازند دلیچای)	۳۷	۳۰	۰/۰۳۳	۰/۲۱۲	۱۱/۶۳۹۱
NDVI	۰-۰/۱۶	۲۱	۵۱	۰/۱۱۱	۰/۳۱۰	۱۳/۵۹
	۰/۱۶-۱۶/۲۶	۳۶	۱۹	۰/۰۶۵	۰/۰۴۱۲	۴۰/۰۶
	۱۶/۲۶-۲۶/۲۶	۴۳	۳۰	۰/۱۵۶	۰/۲۶۱	۳۳/۵۳
انحنای مقطع	۲۸۰/۲۱	۱۳	۳۰	۰/۰۱۶	۰/۶۲۱	۰/۰۲۴
	۷۱/۱۳	۱۰	۲۵	۰/۱۴۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲۵
	۳۷/۷۸	۲۳	۲۱	۰/۲۳۳	۰/۱۳۱	۰/۰۵۱
	-۶۴/۱۸	۲۵	۱۷	۰/۴۷۱	۰/۱۱۹	۰/۰۴۹
	-۱۵۴/۶۶	۲۹	۷	۰/۵۲۵	۰/۴۲۷	۰/۱۶۵
کاربری اراضی	مراکز متوسط در کوهستان‌ها	۳۴	۱۴	۰/۰۰۷	۰/۱۲۱	۳/۶۱۲
	اراضی کشاورزی آبی	۱۷	۱۷	۰/۰۱۲	۰/۲۱۳	۳۹/۲۸
	مراکز مرغوب و استپی	۴۹	۳۵	۰/۰۴۴	۰/۳۱۱	۴۸/۹۹
فاصله از جاده	۰-۵۰۰	۱۵	۴۵	۰/۰۷۷	۰/۱۱۱	۵۱/۶۶
	۵۰۰-۱۵۰۰	۲۱	۲۵	۰/۰۴۵	۰/۲۱۷	۴۱/۸
	۱۵۰۰-۲۵۰۰	۳۱	۱۹	۰/۰۱۵	۰/۳۲۱	۶۱/۳
	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۳۳	۱۱	۰/۰۶۶	۰/۳۳۶	۹۹/۲
شیب	۰-۱۰	۸	۲/۱۱	۰/۰۸۵	۰/۷۶۴	۱۲/۴۵۲
	۱۰-۲۰	۹	۳/۲	۰/۰۴۴	۰/۶۲۵	۱۷/۳۷۶
	۲۰-۳۰	۱۰	۸/۳	۰/۰۱۱	۰/۵۲۹	۲۳/۴۴۴
	۳۰-۴۰	۱۵	۱۰/۱	۰/۱۲۳	۰/۴۹۱	۲۱/۵۲۱
	۴۰-۵۰	۱۸	۱۲/۲	۰/۱۴۴	۰/۳۱۷	۳۳/۶۱۸
	<۵۰	۴۰	۱۳/۲	۰/۱۷۶	۰/۳۰۱	۴۶/۸۷۷
ارتفاع	۱۷۰۰-۱۹۰۰	۲۵	۱۱/۱	۰/۱۵۵	۰/۰۱۰	۱/۳۰۰
	۱۹۰۰-۲۱۰۰	۲۰	۱۷/۲	۰/۱۰۱	۰/۰۱۲	۱/۱۱۲
	۲۱۰۰-۲۳۰۰	۱۸	۲۰/۱	۰/۱۷۹	۰/۰۱۷	۰/۱۱۰
	۲۳۰۰-۲۵۰۰	۳۰	۲۵/۵	۰/۲۲۲	۰/۰۳۱	۰/۳۳۰

	۲۵۰۰-۲۸۰۰	۷	۲۷	۰/۲۴۲	۰/۰۴۴	۰/۴۶۰
جهت شیب	شرق	۹	۴/۱	۰/۰۴۵۶	۰/۱۱۱	۱/۳۰۱
	شمال	۱۱	۵/۳	۰/۴۵۵	۰/۲۵۹	۱/۰۷۷
	شمال غرب	۱۴	۸/۱	۰/۰۴۲۲	۰/۳۶۲	۰/۲۷۲۱
	جنوب غرب	۲۷	۱۱	۰/۰۵۷۶	۰/۴۵۵	۱/۰۲۵۴
	جنوب	۲۰	۲۰/۱	۰/۶۱۴	۴۱/۰۱۲	۱/۰۶۲۴
	جنوب شرق	۱۱	۳۰/۲	۰/۹۸۱	۹۹/۰۱۰	۱/۰۹۸۵
	جنوب غرب	۱۸	۲۱/۲	۰/۷۱۶	۸۱/۰۲۰	۱/۰۸۵۵
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰-۵	۲۸	۳۰	۵۰/۶۶	۰/۱۳۳	۳۶/۴۶
	۵-۱۰	۳۱	۳۴	۴۱/۹۵	۰/۱۵۱	۴۵/۹۹
	<۱۰	۴۱	۱۷	۱۰/۱۴	۰/۳۲۱	۳۱/۸۲

نتایج بررسی زیر کلاس‌های عوامل موثر بر زمین لغزش بیانگر این است که در عامل لیتولوژی، سنگ آهک و مارن (سازند دلیچای) در مدل‌های تراکم سطح، عامل اطمینان و هیبریدی به ترتیب با کسب امتیازات (۰/۲۱۲، ۰/۰۳۳، ۰/۱۱/۶۳۹۱)، مراتع متوسط در کوهستان‌ها، مراتع مرغوب و استپی در مدل تراکم سطح (۰/۱۲۱)، عامل اطمینان (۰/۰۴۴) و هیبریدی با وزن (۴۸/۹۹)، شیب بیشتر از ۵۰ درجه در مدل تراکم سطح (۰/۳۰۱)، عامل اطمینان (۰/۱۷۶) و هیبریدی (۴۶/۸۷۷)، جهت جنوب شرق در مدل تراکم سطح (۰/۱۰۹۹)، عامل اطمینان (۰/۹۸۱) و هیبریدی (۱/۰۹۸۵) بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش در منطقه داشته است. عامل لیتولوژی به واسطه تفاوت در جنس رسوبات تشکیل دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری از عوامل مهم در مطالعات زمین لغزش محسوب می‌شود. در منطقه مطالعاتی سازند دلیچای با ۳۷٪ لغزش بیشترین امتیازات را به خود اختصاص داده است. تغییر کاربری اراضی از جنگل به اراضی کشاورزی بیانگر نقش عامل انسانی در وقوع زمین لغزش است. مراتع مرغوب و استپی با ۳۵٪ لغزش بیشترین امتیاز را دارا می‌باشد. افزایش مقدار شیب باعث افزایش میزان وزن در راستای شیب دامنه و سطح لغزش می‌شود. در منطقه مطالعاتی شیب بیش از ۵۰ درجه با ۱۳/۲٪ بیشترین امتیاز را دارا می‌باشد. جهت شیب از طریق تاثیر در روند هیدرولوژیکی از طریق تبخیر و تعرق، هوازگی و پوشش گیاهی تاثیر گذار می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته جهت جنوب شرق با ۳۰/۲٪ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. انحنای سطح بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد. تاثیر انحنای سطح بر روی فرآیند فرسایش شیب به صورت همگرایی و واگرایی آب در طول جریان سرازیری می‌باشد. در منطقه مطالعاتی کلاس ۹/۱۴۴ با ۵۱٪ بیشترین امتیاز زمین لغزش را دارد. انحنای مقطع، معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان در طول مسیر جریان است. این شاخص به دلیل کنترل تغییر سرعت توده‌هایی که به سمت پایین شیب حرکت می‌کنند، مهم می‌باشد. شیب‌های با پستی و بلندی بالا به دلیل تغییرات شیب به سود نفوذ بارندگی در خاک و بنابراین بی ثباتی آن، برای وقوع زمین لغزش مساعدتر می‌باشند. کلاس ۲۸۰/۲۱ با دارا بودن امتیاز ۳۰٪ بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش داشته است. آبراهه‌ها عامل بسیاری از پدیده‌های لغزشی، فرسایش و زیرشویی پای شیب‌ها و دامنه‌ها به وسیله جریان‌های پرسرعت سیلابی یا رواناب‌های سطحی و جریان‌های رودخانه‌ای است. ۴۵٪ از لغزش‌ها در کلاس ۵۰۰-۰ متر اتفاق افتاده است. فاصله از گسل به دلیل شکستگی‌ها و خردشدگی نقش موثری در افزایش پتانسیل ناپایداری دامنه‌ها دارد. با افزایش فاصله از گسل درصد و میزان زمین لغزش کاهش می‌یابد. کلاس ۵۰۰-۱۰۰۰ با ۲۹٪ بیشترین زمین لغزش را داراست. عامل پوشش گیاهی گاهی به عنوان یک عامل مثبت عمل کرده و سبب تثبیت دامنه‌ها می‌شود و گاهی به عنوان یک عامل منفی عمل کرده و سبب

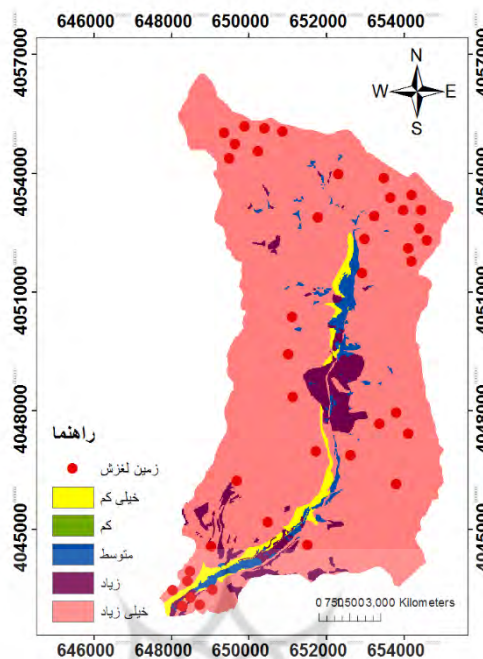
ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد. در این حوضه نقاط با شاخص تراکم پوشش گیاهی غنی که منطبق بر باغات و اراضی آبی هستند، بیشترین درصد لغزش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. بررسی صورت گرفته حاکی از آن است که کلاس ۲۶/۲۶-۱۶/۲۶ با ۴۳٪ بیشترین زمین لغزش رخ داده است. ارتفاع تعیین کننده بسیاری از عوامل مسبب زمین لغزش مانند بارش سالانه، بارش‌های شدید و رگباری، نوع بارش، تغییرات دما، یخبندان و ذوب یخ، تخریب فیزیکی و هوازدگی شیمیایی است. کلاس ۲۵۰۰-۲۸۰۰ متر با ۲۷٪ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. جاده‌ها به دلیل ساخت و ساز در نزدیکی دامنه‌ها شرایط شیب را تغییر می‌دهند. کلاس ۵۰۰-۰ با ۴۵٪ بیشترین وقوع زمین لغزش را داشته است. شاخص رطوبت توپوگرافی شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به نمایش می‌گذارد و شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول چشم انداز زمین است. کلاس ۱۰ < با ۴۱٪ بیشترین وقع زمین لغزش را دارا بوده است. سپس با محاسبه وزن معیارها و زیر معیارها و ترکیب آنها، نقشه‌های پهنه بندی با بهره‌گیری از مدل‌های تراکم سطح (شکل ۱۵)، فاکتور اطمینان (شکل ۱۶) و هیبریدی قضیه بیز (شکل ۱۷) تهیه گردید. نتایج به دست آمده با مطالعات کن و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۵)، شادفر و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۵)، روزس و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۱)، شیرانی و همکاران<sup>۴</sup> (۱۳۹۰)، پرادهان<sup>۳</sup> (۲۰۱۳)، عنایتی مقدم و همکاران<sup>۴</sup> (۱۳۹۰)، رگمی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) مطابقت دارد.



شکل ۱۶: نقشه پهنه‌بندی با روش فاکتور اطمینان

شکل ۱۵: نقشه پهنه‌بندی با روش تراکم سطح

1. Can et al
2. Rozos et al
3. Pradhan
4. Regmi et al



شکل ۱۷: نقشه پهنه‌بندی با روش هیبریدی قضیه بیز

پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، اقدام به صحت‌سنجی مدل‌ها گردید. در جدول ۲ شاخص‌های نسبت تراکم، جمع کیفی و دقت روش در هر سه مدل مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۲: ارزیابی مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

دقت (P)	مجموع کیفیت (Qs)	نسبت تراکم (Dr)	مساحت (%)	مساحت لغزش (%)	کلاس خطر	روش پهنه بندی
۰/۰۴	۲۱%	۰/۰۱	۸	۰	خیلی کم	تراکم سطح
		۰/۰۱	۶	۰	کم	
		۰/۰۱	۱۳	۰	متوسط	
		۰/۶۴	۳۰	۶۱	زیاد	
		۰/۴۲	۴۳	۳۹	خیلی زیاد	
۰/۰۹	۳۹%	۰/۰۱	۱۰	۰	خیلی کم	فاکتور اطمینان
		۰/۰۱	۱۳	۰	کم	
		۰/۴۷	۱۹	۴۸	متوسط	
		۰/۵۱	۳۴	۲۸	زیاد	
		۰/۷۴	۶	۲۴	خیلی زیاد	
۰/۷۶	۰/۸۹	۰	۶	۰	خیلی کم	هیبریدی قضیه بیز
		۰/۱۹	۱۹	۱۸	کم	
		۱/۱۶	۲۱	۴۳	متوسط	
		۱/۶۱	۱۵	۱۲	زیاد	
		۱/۹۹	۳۹	۲۷	خیلی زیاد	

### نتیجه گیری

زمین لغزش‌ها فرآیندهایی می‌باشند که عوامل متعدد و متنوعی در وقوع و تحریک آنها دخالت دارند. در این تحقیق کارایی سه مدل تراکم سطح، فاکتور اطمینان و هیبریدی قضیه بیز در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز بقیع با استفاده از ۱۹ پارامترهای موثر در رخداد زمین لغزش شامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص انحنای سطح، شاخص انحنای مقطع، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه تهیه شد. در بین پارامترهای تاثیر گذار عامل لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب و جهت شیب بیشترین تاثیر را در وقوع زمین لغزش دارا بوده‌اند. نقشه پراکنش لغزش‌ها، با نقشه عامل‌های تاثیر گذار بر رخداد زمین لغزش تلفیق شدند سپس وزن هر یک از کلاس‌ها تعیین و با استفاده از سه مدل فوق با یکدیگر ترکیب گردیدند. در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند. ارزیابی دقت (P) و مجموع کیفیت (QS) نشان داد که مدل هیبریدی کارایی بهتری نسبت به مدل‌های تراکم سطح و فاکتور اطمینان در شناسایی مناطق مستعد خطر زمین لغزش دارد. مقدار (QS) نشان دهنده مطلوبیت عملکرد مدل در پیش بینی خطر زمین لغزش منطقه مورد مطالعه است. مقدار این شاخص برای مدل‌های مختلف در گستره صفر تا صد قرار می‌گیرد. هر چه این مقدار بیشتر باشد نشان دهنده مطلوبیت بهتر عملکرد روش یا مدل پهنه‌بندی خطر زمین لغزش است. نتایج حاصل از شاخص (Dr) نشان داد که در هر سه مدل در تشخیص کلاس‌های با خطر بالا نسبت به کلاس‌های با خطر پایین خوب عمل نموده‌اند. نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی نشان داد که مدل تراکم سطح با ۲۷٪ لغزش، مدل فاکتور اطمینان با ۲۴٪ لغزش و در مدل هیبریدی با ۲۷٪ لغزش در کلاس خیلی زیاد واقع شده‌اند. این مناطق بیشتر مناطق مرکزی حوضه را شامل می‌شوند. از عوامل موثر در بالا بودن میزان پتانسیل وقوع زمین لغزش می‌توان به وجود آبراهه‌های زیاد اشاره کرد که با شستشوی مواد کناره‌های خود باعث ناپایداری مواد دامنه‌ها در بالا دست شده و وقوع زمین لغزش را تسهیل می‌کنند. همچنین این مناطق از نظر کاربری اراضی نیز جزو کاربری‌های مرتع می‌باشد. انسان‌ها با چرای بیش از حد دام‌های خود در این مراتع، باعث نابودی پوشش گیاهی شده و به روند رخداد زمین لغزش بعد از وقوع بارش‌های سیل آسا سرعت می‌بخشند. در بین سازندهای زمین شناسی نیز در مناطقی که سازند مارنی وجود داشته، پتانسیل خطر وقوع زمین لغزش زیاد بوده است. رسوبات مارنی موجود در حوضه در دامنه‌های شمالی به دلیل اینکه زمان کمتری از نور تابش بهره می‌گیرند، دمای پایین‌تری دارند که این عامل باعث کاهش میزان تبخیر و در نتیجه افزایش رطوبت خاک می‌شود. لذا آب به تدریج در زمین نفوذ کرده و موجب آگیری رسیدن به حد خمیری و افزایش نیروی ثقل و حرکت روی دامنه می‌شود. مقایسه نقشه پهنه‌بندی و نقاط پراکنش زمین لغزش که حاصل بررسی‌های صورت گرفته است گویا این مطلب است که در سه مدل مذکور بیش از ۷۰٪ لغزش‌ها در پهنه‌های خطر خیلی زیاد و زیاد رخ داده‌اند. در معیار شیب، لغزش‌ها در شیب‌های بیشتر از ۵۰ درصد رخ داده است. وضعیت شیب بدین علت حائز اهمیت است که ساز و کار بسیاری از حرکت‌های دامنه‌ای در اثر این عامل رخ می‌دهد. تحلیل تقاطع لغزش‌ها با جهات مختلف شیب نشان داد که زمین لغزش‌ها تقریباً در تمامی جهات شیب رخ داده‌اند ولی از میان جهات شیب بیشترین لغزش‌های اتفاق افتاده در جهت جنوب شرقی بوده است. انطباق نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با نقشه طبقات ارتفاعی نشان داد که بیشترین لغزش‌های رخ داده در طبقات ارتفاعی بیش از ۲۰۰۰ متر به وقوع پیوسته است. در معیار فاصله از جاده ارتباطی نیز فاصله ۵۰۰-۵۰ متری از جاده بیشترین لغزش‌ها را داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که دامنه‌های مشرف به جاده که کمترین فاصله را با جاده دارند، ناپایداری بیشتری نسبت به دیگر طبقات فاصله از جاده دارند. تحلیل پیکسل‌های لغزشی در ارتباط با گسل‌ها نشان می‌دهد که هر چه فاصله از گسل‌ها کمتر می‌شود، ناپایداری بیشتر است. کلاس ۱۰۰۰-۵۰۰ متری فاصله از گسل عامل تشدید کننده ناپایداری دامنه‌های مشرف به جاده است. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج پژوهشگرانی همچون اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۳۹۵)، عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)، عرب عامری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. نتایج مقایسه سه مدل بیانگر این است که مدل هیبریدی بر خلاف مدل‌های دیگر علاوه

بر پهنه‌بندی نواحی اطمینان، توانایی پهنه‌بندی نواحی عدم اطمینان می‌تواند به عنوان روش بهینه برای مناطق مشابه نیز معرفی گردد. برای کنترل کردن مناطق آسیب‌پذیر پیشنهاد می‌شود از ساخت و ساز در حریم جاده‌ها، تبدیل جنگل به باغ و دیمزار، دخالت عوامل انسانی و تراس‌بندی و ایجاد سدها جلوگیری شود.

## منابع

- اسفندیاری درآباد، ف و بهشتی جاوید، ا.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز *ANP* (مطالعه موردی: گردنه حیران)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۸، ۱۱۱-۹۳ صص.
- بابلی، ح، موخر، ع و تقیان، ک.، ۱۳۹۷. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۷، شماره ۳، ۱۱۶-۹۱ صص.
- حمزه، س و امیری، ا.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی خطر رانش زمین با استفاده از روش‌های همپوشانی وزنی و تحلیل شبکه (مطالعه موردی: منطقه نصرآباد استان گلستان)، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۹، شماره ۱۱۴، ۱۱۸-۱۱۳ صص.
- سیده نجمه عقیلی، ن.، لشکری پور، غ و حافظی مقدس، ن.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از *GIS* و مدل آماری دو متغیره ارزش اطلاعات و تراکم سطح در حوضه آبخیز گلورد نکا، مازندران، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ۱۱، شماره ۴۱، ۱۱۷-۱۰۲ صص.
- شیرانی، ک و سیف، عبدالله.، ۱۳۹۰. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های آماری (منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون شهر)، مجله علوم زمین، دوره ۲۲، شماره ۸۵، ۱۵۸-۱۴۹ صص.
- شیرانی، ک و عرب عامری، ع.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوضه دز علیا)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی علوم آب و خاک، سال ۱۹، شماره ۷۲، ۳۴۴-۳۲۱ صص.
- صفاری، ا و اخدر، آ.، ۱۳۹۱. مقایسه مدل نسبت فراوانی و توابع عضویت فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی جاده ارتباطی مریوان - سنندج)، مجله جغرافیا مخاطرات محیطی، شماره ۴، دوره ۱، ۹۶-۷۹ صص.
- عابدینی، م.، روستایی، ش و فتحی، م.ح.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز و *ANP* (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیرکندی تا سد ستارخان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۱، ۱۴۲-۱۵۹ صص.
- عابدینی، م؛ روستائی، ش و فتحی، م.ح.؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز-*ANP* (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیر آباد تا سد ستار خان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۱، ۱۴۲-۱۵۹ صص.
- عرب عامری، ع.ر؛ رضایی، خ و شیرانی، ک ۱۳۹۵. پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان، تراکم سطح و تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: حوضه ونک، استان اصفهان)، فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، سال ۱۸، شماره ۲، ۱۱۶-۹۳ صص.
- عنایتی مقدم، ع.ر؛ قاضی فرد، ا؛ صفایی، ه و شیرانی، کورش. ۱۳۹۰. ارزیابی عوامل و ارائه راهکار جهت تثبیت زمین لغزش در منطقه پادانای سمیرم، فصلنامه زمین شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی زاهدان، سال ۱، شماره ۷، ۵۲-۴۱ صص.



- فیض اله پور، م و مومی پور، م.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از پرسپترون چند لایه از نوع پیش خور با الگوریتم پس انتشار (مطالعه موردی: حوضه رودخانه سنگورچای)، فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، سال ۲۰، شماره ۶۹، ۱۱۶-۹۷ صص.
- قویمی پناه، م.ح.، خالدی درویشان، ع و قویمی پناه، م.ر.، ۱۳۹۶. صحت سنجی روش‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه‌بندی زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ولیعصر استان اردبیل)، مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۲، شماره ۹، ۷۹۸-۱۸۹ صص.
- محمدی ثابت، ن.، ۱۳۹۳. تلفیق پارامترهای مستخرج از تصاویر ماکروویو در بهینه سازی مدل‌های تجربی زمین لغزش مطالعه موردی (جنوب شهرستان چالوس)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۲۵.
- Bednarik, M., 2010. Landslide susceptibility Assessment of the kral ovany-liptovsky mikulas Railway case study, physics and chemistry of the Earth, 1(33), PP. 311-331.
- Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H and Duman, Y., (2005). Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchment's by logistic regression analysis, *Geomorphology*, 82, pp. 250-271.
- Erener, A. Sarp, G and Duzgun, S.H., 2019. Use of GIS and Remote Sensing for Landslide Susceptibility Mapping. In *Advanced Methodologies and Technologies in Engineering and Environmental Science*, 55(1), pp. 384-398.
- Gee, M. D., 1991. Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability, *Landslides*, Bell, G, 4(23), PP. 947- 952.
- Gupta, R. P, and Joshi, B. C., 1990. Landslide Hazard Zoning using the GIS Approach a Case study from the Ramang Catchment Himalayas, *Engineering Geology*, 28(5), pp. 119-131.
- Jade, S, Sarkar, S., 1993. models for Slope instability classifications engineering, *Geology*, 36(1), pp. 91-98.
- Kavzoglu, T, Sahin and E.K, Colkesen, I., 2015. An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district, *Natural Hazards*, 76(3), pp. 471-496.
- Lee, S and Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, *The Journal of Environmental Geology*, 50(11), pp. 847-855.
- Petschko, H, Brenning, A, Bell, R, Goetz, J and Glade, T., 2014. Assessing the quality of land slide susceptibility maps- case study Liwer Austria, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 14(1), pp. 95-118.
- Piacentinia, D, Troiani, F, Soldati, M, Notarnicola, C, Savelli, D, Schneiderbauer, S and Strada, C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol(south-eastern Alps, Italy), *Geomorphology*, 151(22), pp. 196-206.
- Pourghasemi, H. R and Rossi, M., 2017. Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods, *Theor Appl Climatol* ,130(14), pp. 609-633.
- 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, *Computers & Geosciences*, 51, pp. 350-365.
- Regmi, N. R., (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA, *Geomorphology*, 115, pp. 172-187.
- Regmi, N.R, Giardino, J.R, McDonald, E.V and Vitek, J.D., 2014. A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA. *Landslides*, 11(3), pp. 247-262.

- Rozos, D. G., Bathrellos, D and Skillodimou, H. D., (2011). Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece, *Environ. Earth Sci*, 63, pp. 49-63
- Sabeti , H, Motagh, M, Sharifi, M A, Akbari, B, Akbarimehr, M and Fard, D., 2019. Determination of the displacement rate of the Masouleh landslide for management of landslide risk by Radar Interferometry, *Jwmseir*, 16 (44),pp.103-113
- Samodra, G, Chen, G, Sartohadi, J and Kasama, K., 2015. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java, *Geomorphology*, 71(35), pp. 111-121.
- Shadfar, S., Yamani, M and Namaki, M., (2005). Landslide hazard zonation using information value, density area and LNRF models in Chalkarood Basin, *Journal of Water and Watershed*, 3, pp. 68-62.
- Thai Pham, B.T, Tien Bui, D, Dholakia, M.B, Prakash, I and Pham, H.V., 2016. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area, *Geotech, Geologi*, 55(9), pp 1-18.
- Tsangaratos, P and Ilia I., 2015. Landslide susceptibility mapping using a modified decision tree classifier in the Xanthi Perfection, Greece Landslides, 1-16 doi: 10.1007/s10346- 015-0565-6.
- Vicari, A, Famiglietti, N. A, Colangelo, G and Cecere, G., 2019. A comparison of multi temporal interferometry techniques for landslide susceptibility assessment in urban area: an example on stigiano (MT), a town of Southern of Italy, *GEOMATICS, NATURAL HAZARDS AND RISK*, 16(3), pp. 836-852.
- Wang, j, Min Guo, b, Kazuhide Sawada, j and Zhanga, j., 2015. Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: A comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models, *Catena*, 44(3), pp. 271-282.
- Wang, Y, Bouten, W and Chen, Q., 2015. ted Landslide Field Data, 12(2), pp. 268-288.
- Xu, C, XiweiXu, a.n, Fuchu Dai, b and ArunK, S., 2012. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China, *Computers & Geosciences*, 46(8), pp.317-329.